

Научная статья

УДК 621.318.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-39-48

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СПЕЧЕННЫХ МАГНИТОВ Pr–Dy–Fe–Co–B НА ИХ КОЭРЦИТИВНУЮ СИЛУ*Д.В. Королев¹, Р.А. Валеев¹, Р.Б. Моргунов¹, В.П. Пискорский¹*

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

Аннотация. Коэрцитивная сила спеченных магнитов Pr–Dy–Fe–Co–B имеет определяющее значение для качества и точности динамически настраиваемых гироскопов и других навигационных приборов. Остаточная намагниченность при этом также имеет важное значение, определяя порог чувствительности и точность гироскопа. Подбор химического состава не дает в полной мере реализовать лучшие характеристики магнита, поэтому определенных успехов можно добиться, применяя термообработку. Показано, что подбор режима термической обработки спеченных магнитов позволяет улучшить их характеристики до технически приемлемых значений, что значительно упрощает технологию их изготовления.

Ключевые слова: динамические гироскопы, кольцевые магниты с радиальной текстурой, коэрцитивная сила, термическая стабильность

Для цитирования: Королев Д.В., Валеев Р.А., Моргунов Р.Б., Пискорский В.П. Влияние термической обработки спеченных магнитов Pr–Dy–Fe–Co–B на их коэрцитивную силу // Труды ВИАМ. 2022. № 12 (118). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-39-48.

Scientific article

EFFECT OF HEAT TREATMENT OF SINTERED Pr–Dy–Fe–Co–B MAGNETS ON THEIR COERCIVITY*D.V. Korolev¹, R.A. Valeev¹, R.B. Morgunov¹, V.P. Piskorsky¹*

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

Abstract. The coercive force of sintered Pr–Dy–Fe–Co–B magnets plays a decisive role for the quality and accuracy of gyroscopes and other navigation devices. The residual magnetization also plays an important role in determining the sensitivity threshold and the accuracy of the such systems. The chemical design of magnets, i. e. the selection of chemical composition, does not fully realize the best characteristics. Therefore, some success can be achieved by applying heat treatment. The article shows that the selection of the heat treatment mode of sintered magnets allows to improve their characteristics to technically acceptable values, which greatly simplifies the manufacturing technology of such magnets.

Keywords: gyroscopes, ring magnets with radial texture, coercive force, thermal stability

For citation: Korolev D.V., Valeev R.A., Morgunov R.B., Piskorsky V.P. Effect of heat treatment of sintered Pr–Dy–Fe–Co–B magnets on their coercivity. *Trudy VIAM*, 2022, no. 12 (118), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-39-48.

Введение

С увеличением содержания кобальта в сплаве системы Pr–Dy–Fe–Co–V величина коэрцитивной силы по намагниченности (H_{cl}) уменьшается до нуля при любых сочетаниях тяжелых редкоземельных металлов, таких как тербий, диспрозий и т. д. [1–4]. Одним из путей предотвращения этого явления и повышения величины H_{cl} является подбор режима термической обработки. Магниты с высоким содержанием кобальта важны для приборов инерциальной навигации – динамически настраиваемых гироскопов (ДНГ). Гироскопы данного типа обладают рядом преимуществ по сравнению с другими типами гироскопов [5–8]. Совокупность элементов ДНГ представляет собой сложную систему с набором резонансных частот, отвечающих различным элементам. К таким элементам относятся: упругий подвес и ротор, вращение которого обеспечивается карданным кольцом, соединяющим его с валом двигателя. Эти элементы образуют систему с тремя взаимно перпендикулярными вращательными степенями свободы. Ротор вращается со скоростью 20–30 тыс. оборотов в минуту. Принципиальной возможностью работы такого устройства является условие совпадения резонансных частот перечисленных элементов. При таком совпадении удается добиться компенсации демпфирующих факторов, например, таких как вязкое трение. В результате при малых углах отклонения, когда дифференциальные уравнения, описывающие поведение такой системы, линеаризуются, можно показать, что гироскоп обладает астатическими свойствами. Это придает гироскопу необходимую высокую точность [6–8]. В настоящее время требования к точности ДНГ весьма высоки. Это связано с тем, что в случае позиционирования космических аппаратов с телескопами и камерами на борту необходимо иметь очень прецизионное определение координат таких устройств в пространстве. Конечно, помимо гироскопов для этих целей используются и иные системы. Например, важное значение приобрели так называемые электронные гироскопы, в которых чувствительным элементом позиционирования является сенсор гигантского магнитосопротивления, который очень точно определяет ориентацию по отношению к магнитному полю Земли. Однако использование таких систем требует картирования магнитного поля Земли, что является основной трудностью. Аналогичными недостатками обладают оптоволоконные и лазерные системы. Поэтому, несмотря на обилие новых инженерных решений, ДНГ продолжают быть одними из главных приборов навигации [9, 10]. Важным свойством гироскопа является уход измеряемого угла от контрольной точки. В современных ДНГ эта величина не превышает 10^{-4} – 10^{-2} градусов в час [9].

Какую же роль в работе гироскопов играют магниты? Магнит является принципиально важной деталью ДНГ потому, что именно вращение катушки в магнитном поле генерирует электродвижущую силу (ЭДС) индукции и напряжение, по которому измеряется скорость вращения ротора. Следовательно, от качества магнита зависит результат измерения углов. При аксиальной симметрии вращающейся системы требуются магниты в форме кольца, причем намагниченность должна быть направлена радиально. Это требует радиального текстурирования магнитов, что возможно не для любого материала [10]. Как правило, сплавы для магнита легируют кобальтом [11] и тяжелыми редкоземельными металлами, такими как диспрозий, тербий и т. д. [12, 13]. Однако эти виды легирования могут вызывать уменьшение остаточной индукции (B_r), хотя именно она является ключевым параметром, определяющим величину ЭДС индукции в катушках, а следовательно, и отношение сигнал/шум в гироскопе.

Цель данной работы – исследование сплавов с церием, который обладает уникальными магнитными свойствами, проявляет эффект Кондо и рассматривается как перспективная добавка. Его преимуществом является низкая цена и большая распространенность в природе. Магниты на основе церия могли бы стать основой для компонентов ДНГ.

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

Сплавы выплавляли методом индукционной плавки в набивном керамическом тигле. В качестве исходных шихтовых материалов использовали чистые редкоземельные металлы: празеодим марки ПрМ-1, церий марки ЦеМ-1, диспрозий марки ДиМ-1, кобальт марки К0, железо АРМКО. Бор вводили в плавку в виде лигатуры FeB марки ФБ-20. Спеченные материалы изготовлены методом порошковой технологии, которая включала дробление слитка, мокрый помол в защитной среде, прессование в магнитном поле для создания текстуры, спекание в вакуумной печи электросопротивления (вакуум – не менее 10^{-5} мм рт. ст.) и отжигом в той же печи при температуре 1000 °С. Плотность образцов определяли методом взвешивания в дистиллированной воде и на воздухе. Анализ локального химического состава фаз проводили на спеченных образцах методом качественного и количественного электронно-зондового микроанализа на аппарате Superprob-733 (JСМА-733, фирма Jeol, Япония). Локальность анализа 1 мкм², глубина анализа 1 мкм. Рентгеновский дифракционный анализ проводили на установке ДРОН-3М с излучением трубки Fe K_α. Петлю магнитного гистерезиса измеряли на спеченных образцах постоянных магнитов сферической формы диаметром 2–3 мм с помощью вибромагнетометра. Измерения проводили при комнатной температуре.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 представлены режимы изготовления образцов, плотность и коэрцитивная сила по намагниченности (H_{cl}).

Таблица 1

Режимы изготовления и характеристики образцов

Состав образца, атомн. долей	Режим изготовления		Плотность, кг/м ³	H_{cl} , кА/м
	температура, °С	продолжительность, ч		
(Pr _{0,52} Dy _{0,48}) _{14,05} (Fe _{0,62} Co _{0,38}) _{79,02} B _{6,79}	1130	1	7620	1152
	1000	8	7730	1208
(Pr _{0,52} Dy _{0,48}) _{14,17} (Fe _{0,59} Co _{0,41}) _{79,02} B _{6,66}	1150	1	7800	688
	1000	8	7820	512
(Pr _{0,49} Dy _{0,51}) _{14,42} (Fe _{0,56} Co _{0,44}) _{78,99} B _{6,49}	1150	1	7810	200
	1000	8	7860	248
(Pr _{0,56} Dy _{0,44}) _{14,43} (Fe _{0,50} Co _{0,50}) _{79,13} B _{6,35}	1150	1	7760	64
	1000	8	7870	104

В результате отжига спеченных образцов постоянных магнитов увеличивается их плотность, а также величина коэрцитивной силы (табл. 1) из-за того, что происходят перераспределение межзеренной фазы/фаз по объему магнита и уменьшение количества пор. Наблюдаются также смачивание расплавом межзеренной фазы и сглаживание границ зерен основной магнитной фазы, тем самым снижается количество центров зарождения доменов обратной намагниченности. Результаты электронно-зондового микроанализа образцов после спекания представлены в табл. 2.

Результаты электронно-зондового микроанализа основных фаз
в спеченных материалах $(Pr_{1-x}Dy_x)-(Fe_{1-y}Co_y)-B$ в зависимости от содержания кобальта

Состав материала, атомн. долей	Фаза	Состав фазы, атомн. долей
$(Pr_{0,82}Dy_{0,18})_{12,1}(Fe_{0,85}Co_{0,15})_{79,8}B_{8,1}$	A R ₃ FB ₇ R ₃ F	$(Pr_{0,80}Dy_{0,20})_2(Fe_{0,88}Co_{0,12})_{14}B$ $(Pr_{0,94}Dy_{0,06})_3(Fe_{0,81}Co_{0,1})_7B_7$ $Pr_3(Fe_{0,18}Co_{0,82})$
$(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,4}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{78,6}B_{8,0}$	A (ц) A (к) RF ₂ R ₃ F RF ₃	$(Pr_{0,38}Dy_{0,62})_2(Fe_{0,83}Co_{0,17})_{14}B$ $(Pr_{0,61}Dy_{0,39})_2(Fe_{0,81}Co_{0,19})_{14}B$ $(Pr_{0,71}Dy_{0,29})(Fe_{0,49}Co_{0,51})_2$ $Pr_3(Fe_{0,20}Co_{0,80})$ $(Pr_{0,58}Dy_{0,42})(Fe_{0,82}Co_{0,18})_3$
$(Pr_{0,55}Dy_{0,45})_{12,8}(Fe_{0,79}Co_{0,21})_{72,3}B_{14,9}$	A RF ₃ RF ₂ R ₃ F	$(Pr_{0,50}Dy_{0,50})_2(Fe_{0,81}Co_{0,19})_{14}B$ $(Pr_{0,34}Dy_{0,66})(Fe_{0,85}Co_{0,15})_3$ $(Pr_{0,88}Dy_{0,12})(Fe_{0,45}Co_{0,55})_2$ $Pr_3(Fe_{0,17}Co_{0,83})$
$(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{12,0}(Fe_{0,77}Co_{0,23})_{80,1}B_{7,9}$	A RF ₃ R ₃ F R ₄ F ₃	$(Pr_{0,48}Dy_{0,52})_2(Fe_{0,79}Co_{0,21})_{14}B$ $(Pr_{0,75}Dy_{0,25})(Fe_{0,68}Co_{0,32})_3$ $(Pr_{0,70}Dy_{0,30})_3(Fe_{0,64}Co_{0,36})$ $(Pr_{0,98}Dy_{0,02})_4(Fe_{0,39}Co_{0,61})_3$
$(Pr_{0,65}Dy_{0,35})_{13,1}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{78,9}B_{8,0}$	A (ц) A (к) RF ₂ B ₂ R ₅ F ₂ B ₆	$(Pr_{0,52}Dy_{0,48})_2(Fe_{0,78}Co_{0,22})_{14}B$ $(Pr_{0,57}Dy_{0,43})_2(Fe_{0,78}Co_{0,22})_{14}B$ $(Pr_{0,90}Dy_{0,10})(Fe_{0,43}Co_{0,57})_2B_2$ $Pr_5(Fe_{0,09}Co_{0,91})_2B_6$
$(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,2}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{76,3}B_{10,5}$	A (ц) A (к) RF ₄ B RF ₂ R ₅ F ₂ B ₆	$(Pr_{0,45}Dy_{0,55})_2(Fe_{0,78}Co_{0,22})_{14}B$ $(Pr_{0,47}Dy_{0,53})_2(Fe_{0,78}Co_{0,22})_{14}B$ $(Pr_{0,41}Dy_{0,59})(Fe_{0,54}Co_{0,46})_4B$ $(Pr_{0,74}Dy_{0,26})(Fe_{0,44}Co_{0,56})_2$ $(Pr_{0,99}Dy_{0,01})_5(Fe_{0,12}Co_{0,88})_2B_6$
$(Pr_{0,42}Dy_{0,58})_{13,2}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{78,9}B_{7,9}$	A (ц) A (к) RF ₂ B ₂ R ₅ F ₂ B ₆	$(Pr_{0,31}Dy_{0,69})_2(Fe_{0,79}Co_{0,21})_{14}B$ $(Pr_{0,35}Dy_{0,65})_2(Fe_{0,79}Co_{0,21})_{14}B$ $(Pr_{0,73}Dy_{0,27})(Fe_{0,48}Co_{0,52})_2B_2$ $(Pr_{0,99}Dy_{0,01})_5(Fe_{0,17}Co_{0,83})_2B_6$
$(Pr_{0,27}Dy_{0,73})_{14,4}(Fe_{0,74}Co_{0,26})_{78,7}B_{6,9}$	A RF ₂ R ₃ F R ₃ F R ₃ F RF ₃ B ₂	$(Pr_{0,43}Dy_{0,57})_2(Fe_{0,79}Co_{0,21})_{14}B$ $(Pr_{0,80}Dy_{0,20})(Fe_{0,46}Co_{0,54})_2$ $(Pr_{0,76}Dy_{0,24})_3(Fe_{0,46}Co_{0,54})$ $(Pr_{0,48}Dy_{0,52})_3(Fe_{0,79}Co_{0,21})$ $Pr_3(Fe_{0,29}Co_{0,71})$ $(Pr_{0,45}Dy_{0,55})(Fe_{0,78}Co_{0,22})_3B_2$
$(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,3}(Fe_{0,73}Co_{0,27})_{78,8}B_{7,9}$	A (ц) A (к) RF ₄ B RF ₂ B ₂ R ₅ F ₂ B ₆	$(Pr_{0,38}Dy_{0,62})_2(Fe_{0,77}Co_{0,23})_{14}B$ $(Pr_{0,40}Dy_{0,60})_2(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{14}B$ $(Pr_{0,37}Dy_{0,63})(Fe_{0,56}Co_{0,44})_4B$ $(Pr_{0,79}Dy_{0,21})(Fe_{0,45}Co_{0,55})_2B_2$ $(Pr_{0,99}Dy_{0,01})_5(Fe_{0,21}Co_{0,79})_2B_6$
$(Pr_{0,50}Dy_{0,50})_{16,8}(Fe_{0,71}Co_{0,29})_{78,2}B_{5,0}$	A RF ₃	$(Pr_{0,28}Dy_{0,72})_2(Fe_{0,73}Co_{0,27})_{14}B$ $(Pr_{0,35}Dy_{0,65})(Fe_{0,56}Co_{0,44})_3$
$(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,3}(Fe_{0,70}Co_{0,30})_{78,8}B_{7,9}$	A (ц) A (к) RF ₃ RF ₂ R ₅ F ₂ B ₆	$(Pr_{0,43}Dy_{0,57})_2(Fe_{0,72}Co_{0,28})_{14}B$ $(Pr_{0,48}Dy_{0,52})_2(Fe_{0,72}Co_{0,28})_{14}B$ $(Pr_{0,46}Dy_{0,54})(Fe_{0,53}Co_{0,47})_3$ $(Pr_{0,82}Dy_{0,18})(Fe_{0,41}Co_{0,59})_2$ $(Pr_{0,99}Dy_{0,01})_5(Fe_{0,19}Co_{0,81})_2B_6$

Окончание табл. 2

Состав материала, атомн. долей	Фаза	Состав фазы, атомн. долей
$(\text{Pr}_{0,53}\text{Dy}_{0,47})_{13,5}(\text{Fe}_{0,66}\text{Co}_{0,34})_{78,6}\text{Al}_{0,12}\text{B}_{7,9}$	A (ц) A (к) RF_3 RF_2 $\text{R}_5\text{F}_2\text{B}_6$	$(\text{Pr}_{0,43}\text{Dy}_{0,57})_2(\text{Fe}_{0,70}\text{Co}_{0,30})_{14}\text{B}$ $(\text{Pr}_{0,53}\text{Dy}_{0,47})_2(\text{Fe}_{0,70}\text{Co}_{0,30})_{14}\text{B}$ $(\text{Pr}_{0,39}\text{Dy}_{0,61})(\text{Fe}_{0,53}\text{Co}_{0,47})_3$ $(\text{Pr}_{0,85}\text{Dy}_{0,15})(\text{Fe}_{0,41}\text{Co}_{0,59})_2$ $\text{Pr}_5(\text{Fe}_{0,14}\text{Co}_{0,86})_2\text{B}_6$
$(\text{Pr}_{0,52}\text{Dy}_{0,48})_{14,1}(\text{Fe}_{0,62}\text{Co}_{0,38})_{79,1}\text{B}_{6,8}$	A (ц) A (к) RF_4B RF_3 (R,F)O	$(\text{Pr}_{0,44}\text{Dy}_{0,56})_2(\text{Fe}_{0,64}\text{Co}_{0,36})_{14}\text{B}$ $(\text{Pr}_{0,51}\text{Dy}_{0,49})_2(\text{Fe}_{0,64}\text{Co}_{0,36})_{14}\text{B}$ $(\text{Pr}_{0,42}\text{Dy}_{0,58})(\text{Fe}_{0,47}\text{Co}_{0,53})_4\text{B}$ $(\text{Pr}_{0,78}\text{Dy}_{0,22})(\text{Fe}_{0,40}\text{Co}_{0,48}\text{B}_{0,12})_3$ $(\text{Pr}_{0,60}\text{Dy}_{0,33}\text{Fe}_{0,05}\text{Co}_{0,02})_1\text{O}_1$
$(\text{Pr}_{0,52}\text{Dy}_{0,48})_{14,2}(\text{Fe}_{0,59}\text{Co}_{0,41})_{79,1}\text{B}_{6,7}$	A (ц) A (к) RF_4B RF_2B_2	$(\text{Pr}_{0,44}\text{Dy}_{0,56})_2(\text{Fe}_{0,62}\text{Co}_{0,38})_{14}\text{B}$ $(\text{Pr}_{0,50}\text{Dy}_{0,50})_2(\text{Fe}_{0,62}\text{Co}_{0,38})_{14}\text{B}$ $(\text{Pr}_{0,41}\text{Dy}_{0,59})(\text{Fe}_{0,44}\text{Co}_{0,56})_4\text{B}_1$ $(\text{Pr}_{0,82}\text{Dy}_{0,18})(\text{Fe}_{0,38}\text{Co}_{0,62})_2\text{B}_2$
$(\text{Pr}_{0,49}\text{Dy}_{0,51})_{14,4}(\text{Fe}_{0,56}\text{Co}_{0,44})_{79,1}\text{B}_{6,5}$	A (ц) A (к) RF_4B RF_3	$(\text{Pr}_{0,42}\text{Dy}_{0,58})_2(\text{Fe}_{0,59}\text{Co}_{0,41})_{14}\text{B}$ $(\text{Pr}_{0,43}\text{Dy}_{0,57})_2(\text{Fe}_{0,59}\text{Co}_{0,41})_{14}\text{B}$ $(\text{Pr}_{0,37}\text{Dy}_{0,63})(\text{Fe}_{0,41}\text{Co}_{0,59})_4\text{B}$ $(\text{Pr}_{0,65}\text{Dy}_{0,35})(\text{Fe}_{0,41}\text{Co}_{0,59})_3$
$(\text{Pr}_{0,56}\text{Dy}_{0,44})_{14,4}(\text{Fe}_{0,50}\text{Co}_{0,50})_{79,2}\text{B}_{6,4}$	A (ц) A (к) RF_3B_2 RF_2B_2	$(\text{Pr}_{0,60}\text{Dy}_{0,40})_2(\text{Fe}_{0,53}\text{Co}_{0,47})_{14}\text{B}$ $(\text{Pr}_{0,48}\text{Dy}_{0,52})_2(\text{Fe}_{0,54}\text{Co}_{0,46})_{14}\text{B}$ $(\text{Pr}_{0,45}\text{Dy}_{0,55})(\text{Fe}_{0,34}\text{Co}_{0,66})_3\text{B}_2$ $(\text{Pr}_{0,73}\text{Dy}_{0,27})(\text{Fe}_{0,37}\text{Co}_{0,63})_2\text{B}_2$

Обозначения: A (ц), A (к) – состав основной магнитной фазы $\text{R}_2\text{F}_{14}\text{B}$ в центре зерна и у границы соответственно; R: Pr + Dy; F: Fe + Co.

Как видно из данных табл. 2, состав основной тетрагональной магнитной фазы A достаточно сильно отличается в центре зерна и на его границе, особенно по содержанию диспрозия. В центре зерна его содержание значительно больше. Поскольку методом электронно-зондового микроанализа содержание бора в образцах определить невозможно, на образце состава $(\text{Pr}_{0,82}\text{Dy}_{0,18})_{12,14}(\text{Fe}_{0,85}\text{Co}_{0,15})_{79,72}\text{B}_{8,14}$ (после термообработки при 1000°C в течение 8 ч) проведен рентгеновский анализ с излучением Fe K_α (длина волны $\lambda = 0,19360$ нм) (рис. 1).

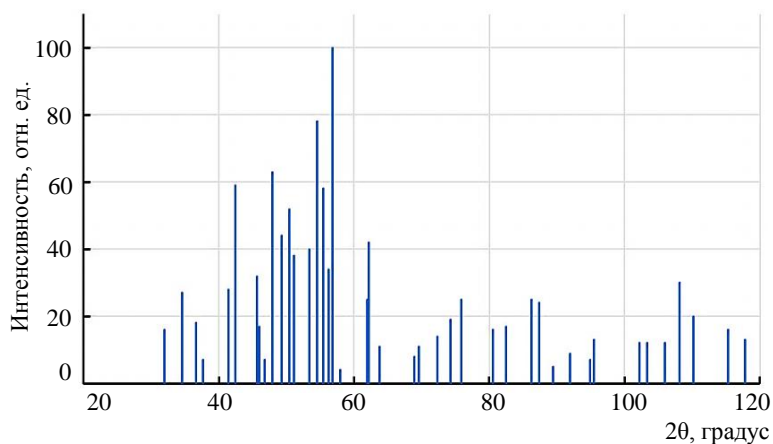


Рис. 1. Рентгеновский дифракционный спектр материала $(\text{Pr}_{0,82}\text{Dy}_{0,18})_{12,14}(\text{Fe}_{0,85}\text{Co}_{0,15})_{79,72}\text{B}_{8,14}$ после термообработки при 1000°C в течение 8 ч

Параметры ячейки основной магнитной фазы находили по обычной методике, изложенной в работах [15, 16]. Полученные параметры элементарной ячейки находятся в хорошем соответствии с научно-техническими литературными данными [17–22]. Кривые размагничивания представлены на рис. 2.

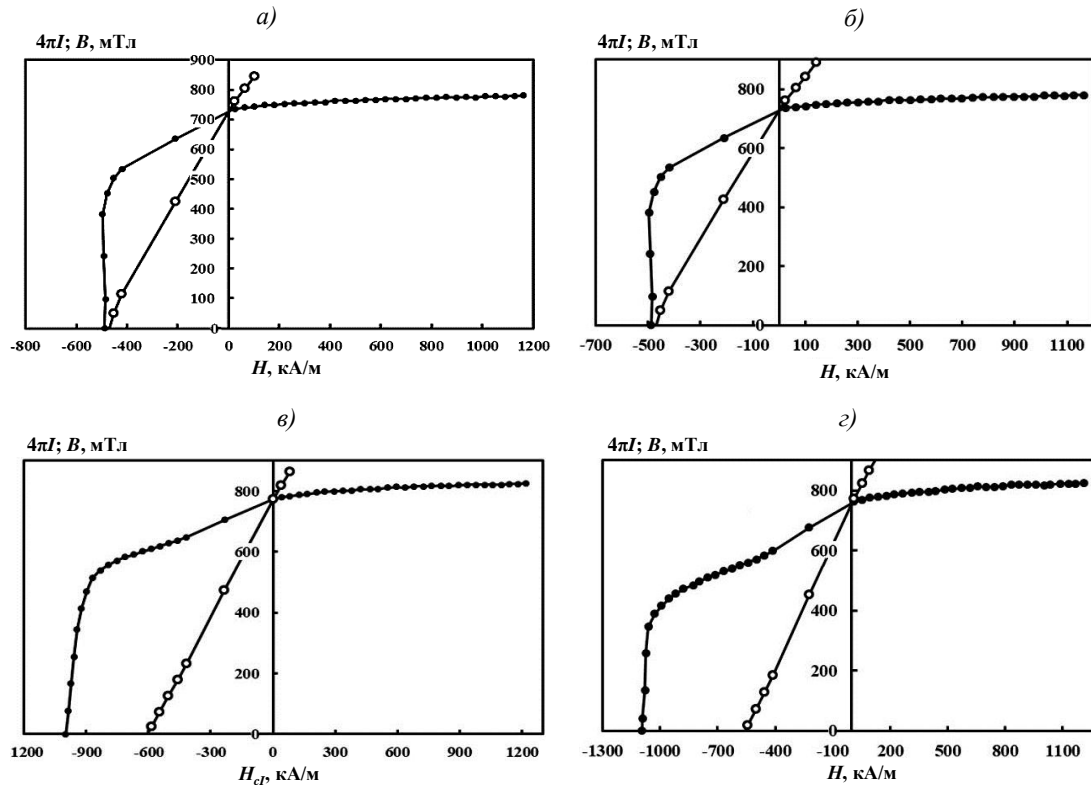


Рис. 2. Кривые размагничивания по намагниченности $4\pi I$ (○) и по индукции B (●) спеченных материалов составов: $(\text{Nd}_{0,38}\text{Dy}_{0,38}\text{Ce}_{0,23})_{14,5}(\text{Fe}_{0,72}\text{Co}_{0,28})_{78,96}\text{B}_{6,54}$ (а), $(\text{Nd}_{0,45}\text{Dy}_{0,39}\text{Ce}_{0,16})_{14,44}(\text{Fe}_{0,72}\text{Co}_{0,28})_{79,12}\text{B}_{6,44}$ (б), $(\text{Pr}_{0,52}\text{Dy}_{0,40}\text{Ce}_{0,08})_{14,37}(\text{Fe}_{0,72}\text{Co}_{0,28})_{79,30}\text{B}_{6,33}$ (в) и $(\text{Pr}_{0,57}\text{Dy}_{0,40}\text{Ce}_{0,03})_{14,33}(\text{Fe}_{0,72}\text{Co}_{0,28})_{79,40}\text{B}_{6,27}$ (з)

Магнитные характеристики этих материалов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Магнитные характеристики измеренных спеченных материалов

Состав материала, атомн. долей	B_r , мТл	H_{cl} , кА/м	H_{CB} , кА/м	$4\pi I_s$, мТл	SF
$(\text{Nd}_{0,38}\text{Dy}_{0,38}\text{Ce}_{0,23})_{14,5}(\text{Fe}_{0,72}\text{Co}_{0,28})_{78,96}\text{B}_{6,54}$	761	489	478	780	0,43
$(\text{Nd}_{0,45}\text{Dy}_{0,39}\text{Ce}_{0,16})_{14,44}(\text{Fe}_{0,72}\text{Co}_{0,28})_{79,12}\text{B}_{6,44}$	761	500	500	780	0,43
$(\text{Pr}_{0,52}\text{Dy}_{0,40}\text{Ce}_{0,08})_{14,37}(\text{Fe}_{0,72}\text{Co}_{0,28})_{79,30}\text{B}_{6,33}$	775	999	586	826	0,42
$(\text{Pr}_{0,57}\text{Dy}_{0,40}\text{Ce}_{0,03})_{14,33}(\text{Fe}_{0,72}\text{Co}_{0,28})_{79,40}\text{B}_{6,27}$	773	1095	542	825	0,20

Как видно из данных табл. 3, с уменьшением содержания церия величина H_{cl} материалов увеличивается, величина коэрцитивной силы по индукции (H_{CB}) практически не меняется, а величина намагниченности насыщения ($4\pi I_s$) монотонно возрастает. Уменьшается также величина индекса прямоугольности (SF) кривых размагничивания. Величина SF определяется отношением величины «поля колена», которое определяется как поле, при котором намагниченность составляет 90 % от остаточной намагниченности к величине H_{cl} [23, 24]. Величина SF характеризует соответствие качества материала для применения его в различных приборах. Чем больше значение SF, тем проще использовать

материал в различных устройствах для создания в них максимального магнитного поля. Если величина SF мала, то необходимо это компенсировать конструкцией магнитной системы, что приводит к увеличению ее габаритов. Как правило, магнит используется в приборах, имеющих магнитную систему из материалов с минимальной коэрцитивной силой и максимальной намагниченностью (например, железо), – это приборы инерциальной навигации [25, 26]. Поэтому магнитное поле, которое кольцевой магнит создает в требуемом участке этой системы, будет зависеть от ее конструкции и фактора прямоугольности магнита, поэтому такой фактор является важной характеристикой.

Заключения

Интерметаллиды на основе церия в настоящее время вызывают большой интерес как возможная альтернатива существующим высокоэффективным магнитам, содержащим дефицитные тяжелые редкоземельные элементы. Однако магнитные свойства ионов Се в этих системах трудно определяемы. Это происходит из-за сложности количественного описания эффекта Кондо, при котором электроны проводимости экранируют момент Се-4f [27]. Например, установлено, что оболочка Се-4f в интерметаллиде Се–Fe частично экранирована по Кондо. Масштаб эффекта Кондо резко усиливается за счет междоузлий, подавляющих вклад Се-4f в магнитную анизотропию [27]. Даже неэкранированные моменты Се-4f мало что добавляют в магнитную жесткость при комнатной температуре. Для того чтобы обладать значительной одноионной магнитной анизотропией, очевидным и неперемным условием является то, что 4f-электрон Се должен быть локализован и его Кондо-экранированный магнитный момент должен быть незначителен. Надежная количественная оценка локализованного момента по сравнению с поведением тяжелых фермионов Се-4f-электронов могла бы стать предпосылкой к успешному теоретическому поиску перспективных магнитотвердых интерметаллидов церия. Такая оценка представляет собой сложную и нерешаемую в настоящее время задачу. Некоторые качественные сведения могут быть получены из расчетов теории функционала плотности при рассмотрении Се-4f-электронов в рамках теории блуждающих электронов. Однако формирование тяжелых фермионов в соединениях на основе церия является настоящим непертурбативным явлением многих тел, количественное описание которого требует методов, выходящих за рамки известных методик расчета. Таким образом, легирование спеченных материалов церием имеет значительное преимущество, связанное с его низкой стоимостью. Основная характеристика магнитотвердого материала – его кривая размагничивания с увеличением содержания церия только теряет свою прямоугольную форму, которая характеризуется индексом прямоугольности. Методом электронно-зондового микроанализа определены фазовый состав спеченных магнитов и его изменение с увеличением содержания церия (без изменения концентрации диспрозия и кобальта), а также фазовый состав магнитов без церия, но с предельным содержанием кобальта. Показано, что с увеличением концентрации кобальта появляются слабо анизотропные (либо с анизотропией «легкая плоскость») фазы типа $(Pr, Dy)(Fe, Co)_4B$; $(Pr, Dy)(Fe, Co)_2B_2$; $(Pr, Dy)(Fe, Co)_3B_2$ и $(Pr, Dy)(Fe, Co)_3$, которые резко уменьшают коэрцитивную силу материала по намагниченности.

Список источников

1. 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: 15.07.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-108-117.

2. 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://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.07.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-59-66.
3. Королев Д.В., Столянков Ю.В., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Бахметьев М.В., Дворецкая Е.В., Коплак О.В., Моргунов Р.Б. Магнитные свойства и полосовые домены в микрополосках PrDyFeCoB // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). Ст. 08. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.07.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-86-93.
4. 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.
5. Мезенцев Г.М. Анализ двухмассовой модели линейного движения динамически настраиваемого гироскопа. Миасс: Юж.-Урал. гос. ун-т, 2019. 94 с.
6. Василевский Н.И. Разработка динамически настраиваемого гироскопа с учетом его вибрационных характеристик. Миасс: Юж.-Урал. гос. ун-т, 2018. 77 с.
7. 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. № 1. С. 1–14. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-01-1579.
8. 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.
9. Голованов В.А. Гироскопическое ориентирование. СПб., 2004. 92 с.
10. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Резчикова И.И., Бузенков А.В. Кольцевые магниты с радиальной текстурой для динамически настраиваемых гироскопов // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S5. С. 89–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-S5-89-94.
11. Fuerst C.D., Herbst J.F., Alson E.A. Magnetic properties of Nd₂(Co_xFe_{1-x})₁₄B // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1986. Vol. 54–56. P. 567–569.
12. Sinnema D.B., Radwanski R.J., Franse J.J.M. et al. Magnetic properties of ternary rare-earth compounds of the type R₂Fe₁₄B // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1984. Vol. 44. No. 3. P. 333–341.
13. Pedziwiatr A.T., Wallace W.E. Structure and magnetism of the R₂Fe_{14-x}Co_xB (R = Dy and Er) // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1987. Vol. 66. No. 3. P. 63–68.
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. Князев А.В., Сулейманов Е.В. Основы рентгенофазового анализа. Н. Новгород, 2005. 23 с.
16. Бояркина О.В., Зотов М.И., Кяшкин В.М. и др. Физические методы исследования твердых тел: электронная микроскопия и рентгеноструктурный анализ. Саранск: Морд. ун-т, 2012. 96 с.
17. Grossinger R., Krewenka R., Kirchmayr H.R. et al. Magnetic anisotropy in Pr₂(Fe_{1-x}Co_x)₁₄B compounds // Journal of the Less-Common Metals. 1987. Vol. 132. P. 265–272.
18. Abache C., Oesterreicher H. Magnetic properties of compounds R₂Fe₁₄B // Journal Applied Physics. 1985. Vol. 57. P. 4112–4114.
19. Pedziwiatr A.T., Wallace W.E. Structure and magnetism of the R₂Fe_{14-x}Co_xB ferromagnetic systems (R = Dy and Er) // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1987. Vol. 66. P. 63–68.
20. Pedziwiatr A.T., Chen H.Y., Wallace W.E. Magnetism of the Tb₂Fe_{14-x}Co_xB system // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1987. Vol. 67. P. 311–315.
21. Abache C., Oesterreicher H.J. Magnetic anisotropies and spin reorientations of R₂Fe₁₄B-type compounds // Journal Applied Physics. 1986. Vol. 60. P. 3671–3679.

22. Zhi-dong Z., Sun X.K., Zhen-Chen Z. et al. Effects of partial Co substitution on structural and magnetic properties of $(\text{Pr}, \text{Gd})_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ compounds // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1991. Vol. 96. P. 215–218.
23. Perigo E.A., Takiishi H., Motta C.C., Faria R.N. On the squareness factor behavior of RE–Fe–B (RE = Nd or Pr) // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2009. Vol. 45. No. 10. P. 4431–4434.
24. Faria R.N., Takiishi H., Lima L.F.C.P., Costa I. Praseodymium-based HD-sintered magnets produced using a mixture of cast alloys // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2001. Vol. 237. P. 261–266.
25. Мусалимов В.М., Ротц Ю.А., Астафьев С.А., Амвросьева А.В. Расчет надежности упругих элементов микромеханических гироскопов. СПб.: Санкт-Петербург. гос. ун-т информ. технологий, механики и оптики, 2009. 128 с.
26. Динамически настраиваемый гироскоп: пат. 2687169 Рос. Федерация; заявл. 17.04.18; опубл. 07.05.19.
27. Galler A., Ener S., Maccari F. et al. Intrinsically weak magnetic anisotropy of cerium in potential hard-magnetic intermetallics // *Quantum Materials*. 2021. Vol. 6. P. 2. DOI: 10.1038/s41535-020-00301-6.

References

1. 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: July 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-108-117.
2. Piskorsky V.P., Valeev R.A., Korolev D.V., Morgunov R.B., Rezchikova I.I. Terbium and gadolinium dopin 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: July 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-59-66.
3. Korolev D.V., Stolyankov Yu.V., Piskorsky V.P., Valeev R.A., Bahmetiev M.V., Dvoretzkaya E.V., Koplak O.V., Morgunov R.B. Magnetic properties and magnetic strip domains in micro stripes PrDyFeCoB. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 15, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-86-93.
4. 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.
5. Mezentsev G.M. *Analysis of a two-mass model of linear motion of a dynamically tuned gyroscope*. Miass: South Ural State Univ., 2019, 94 p.
6. Vasilevsky N.I. *Development of a dynamically tuned gyroscope taking into account its vibrational characteristics*. Miass: South Ural State Univ., 2018, 77 p.
7. Chirkin D.S., Roslovetz P.V., Tatarinov F.V., Novikov L.Z. Reducing the drift of a dynamically tuned gyroscope from run to run. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2017, no. 1, pp. 1–14. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-01-1579.
8. Topilskaya S.V., Borodulin D.S., Korniyukhin A.V. Experimental evaluation of allowable mechanical impacts on a dynamically adjustable gyroscope. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser.: Instrumentation*, 2018, no. 4, pp. 69–79.
9. Golovanov V.A. *Gyroscopic orientation*. St. Petersburg, 2004, 92 p.
10. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Piskorskiy V.P. et al. Ring magnets with radial texture for dynamically tuned gyroscopes. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S5, pp. 89–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-S5-89-94.
11. Fuerst C.D., Herbst J.F., Alson E.A. Magnetic properties of $\text{Nd}_2(\text{Co}_x\text{Fe}_{1-x})_{14}\text{B}$. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1986, vol. 54–56, pp. 567–569.
12. Sinnema D.B., Radwanski R.J., Franse J.J.M. et al. Magnetic properties of ternary rare-earth compounds of the type $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1984, vol. 44, no. 3. P. 333–341.

13. Pedziwiatr A.T., Wallace W.E. Structure and magnetism of the $R_2Fe_{14-x}Co_xB$ ($R = Dy$ and Er). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1987, vol. 66, no. 3, pp. 63–68.
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. Knyazev A.V., Suleimanov E.V. *Fundamentals of X-ray phase analysis*. N. Novgorod, 2005, 23 p.
16. Boyarkina O.V., Zotov M.I., Kyashkin V.M. et al. *Physical methods for studying solids: electron microscopy and X-ray diffraction analysis*. Saransk: Mordovia Univ., 2012, 96 p.
17. Grossinger R., Krewenka R., Kirchmayr H.R. et al. Magnetic anisotropy in $Pr_2(Fe_{1-x}Co_x)_{14}B$ compounds. *Journal of the Less-Common Metals*, 1987, vol. 132, pp. 265–272.
18. Abache C., Oesterreicher H. Magnetic properties of compounds $R_2Fe_{14}B$. *Journal Applied Physics*, 1985, vol. 57, pp. 4112–4114.
19. Pedziwiatr A.T., Wallace W.E. Structure and magnetism of the $R_2Fe_{14-x}Co_xB$ ferromagnetic systems ($R = Dy$ and Er). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1987, vol. 66, pp. 63–68.
20. Pedziwiatr A.T., Chen H.Y., Wallace W.E. Magnetism of the $Tb_2Fe_{14-x}Co_xB$ system. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1987, vol. 67, pp. 311–315.
21. Abache C., Oesterreicher H.J. Magnetic anisotropies and spin reorientations of $R_2Fe_{14}B$ -type compounds. *Journal Applied Physics*, 1986, vol. 60, pp. 3671–3679.
22. Zhi-dong Z., Sun X.K., Zhen-Chen Z. et al. Effects of partial Co substitution on structural and magnetic properties of $(Pr, Gd)_2Fe_{14}B$ compounds. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1991, vol. 96, pp. 215–218.
23. Perigo E.A., Takiishi H., Motta C.C., Faria R.N. On the squareness factor behavior of RE–Fe–B ($RE = Nd$ or Pr). *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, vol. 45, no. 10, pp. 4431–4434.
24. Faria R.N., Takiishi H., Lima L.F.C.P., Costa I. Praseodymium-based HD-sintered magnets produced using a mixture of cast alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2001, vol. 237, pp. 261–266.
25. Musalimov V.M., Rotts Yu.A., Astafiev S.A., Amvrosyeva A.V. *Calculation of reliability of elastic elements of micromechanical gyroscopes*. St. Petersburg: St. Petersburg State Univ. of information, technologies, mechanics and optics, 2009, 128 p.
26. *Dynamically adjustable gyroscope*: pat. 2687169 Rus. Federation; filed 17.04.18; publ. 07.05.19.
27. Galler A., Ener S., Maccari F. et al. Intrinsically weak magnetic anisotropy of cerium in potential hard-magnetic intermetallics. *Quantum Materials*, 2021, vol. 6, p. 2. DOI: 10.1038/s41535-020-00301-6.

Информация об авторах

Королев Дмитрий Викторович, старший научный сотрудник, д.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Валеев Руслан Анверович, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Моргунов Роман Борисович, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Пискорский Вадим Петрович, заместитель начальника лаборатории по науке, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Dmitry V. Korolev, Senior Researcher, Doctor of Sciences (Phys. & Math.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Ruslan A. Valeev, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Roman B. Morgunov, Leading Researcher, Doctor of Sciences (Phys. & Math.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Vadim P. Piskorsky, Deputy Head of Laboratory of Science, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 02.08.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 16.08.2022.
 The article was submitted 02.08.2022; approved and accepted for publication after reviewing 16.08.2022.