

Научная статья

УДК 621.318.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-65-74

**СВОЙСТВА СПЕЧЕННЫХ МАГНИТОВ (Pr, Nd, Ce, Dy)(Fe, Co)B,
ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ НЕОЧИЩЕННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ***М.В. Потапов¹, Р.А. Валеев¹, Р.Б. Моргунов^{1,2}, В.П. Пискорский¹*

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

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Московская обл., Россия; office@icp.ac.ru

Аннотация. *Исследованы спеченные материалы следующего состава $(Nd_wPr_pDy_zCe_x)-(Fe_{1-y}Co_y)-B$ ($w \leq 0,44$; $x \leq 0,13$; $p \leq 0,45$; $z \leq 0,41$; $y \leq 0,26$). Приведены гистерезисные кривые размагничивания по индукции и по намагниченности. Установлено, что примесь неодима и церия в исследованных количествах не оказывает отрицательного влияния на магнитные характеристики спеченных материалов. Таким образом, годные спеченные материалы из неочищенных редкоземельных металлов изготавливать можно, хотя величина температурного коэффициента индукции материалов такого состава недостаточна для применения в навигационных приборах.*

Ключевые слова: *постоянные магниты, редкоземельные магниты, намагниченность насыщения, остаточная индукция, коэрцитивная сила, температурный коэффициент индукции*

Для цитирования: Потапов М.В., Валеев Р.А., Моргунов Р.Б., Пискорский В.П. Свойства спеченных магнитов (Pr, Nd, Ce, Dy)(Fe, Co)B, полученных из неочищенных редкоземельных металлов // Труды ВИАМ. 2025. № 2 (144). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-65-74.

Scientific article

**PROPERTIES OF SINTERED MAGNETS (Pr, Nd, Ce, Dy)(Fe, Co)B
OBTAINED FROM UNREFINED RARE EARTH METALS***M.V. Potapov¹, R.A. Valeev¹, R.B. Morgunov^{1,2}, 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

²Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Chernogolovka, Moscow region, Russia; office@icp.ac.ru

Abstract. *Sintered materials of the following composition $(Nd_wPr_pDy_zCe_x)-(Fe_{1-y}Co_y)-B$ ($w \leq 0,44$; $p \leq 0,45$; $x \leq 0,13$; $z \leq 0,41$; $y \leq 0,26$) were studied. Hysteresis curves of demagnetization by induction and magnetization are given. It was found that the admixture of neodymium and cerium in the studied quantities does not adversely affect the magnetic characteristics of sintered materials. Thus, suitable sintered materials can be made from insufficiently purified rare earth metals, although the value of the temperature coefficient of induction of materials of such composition is insufficient for use in navigation devices.*

Keywords: *permanent magnets, rare-earth magnets, saturation magnetization, residual induction, coercive force, temperature coefficient of induction*

For citation: Potapov M.V., Valeev R.A., Morgunov R.B., Piskorsky V.P. Properties of sintered magnets (Pr, Nd, Ce, Dy)(Fe, Co)B obtained from unrefined rare earth metals. *Trudy VIAM*, 2025, no. 2 (144), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-65-74.

Введение

Из-за того, что свойства лантаноидов схожи, их разделение является довольно непростой задачей [1]. В настоящее время большинство актуальных схем разделения лантаноидов основано на использовании методов жидкостной экстракции, а также ионного обмена. Стоимость редкоземельных металлов (РЗМ) также существенно различается. В соответствии с этим возникает вопрос о возможности производства спеченных магнитов из неочищенных РЗМ. Приведем цены некоторых РЗМ за 1 кг: церий 25,5 \$, празеодим 120 \$, неодим 115 \$, диспрозий 1100 \$. Температура Кюри (T_C) соединений $R_2Fe_{14}B$ следующая: 422 К – для $R = Ce$, 569 К – для $R = Pr$, 586 К – для $R = Nd$, 598 К – для $R = Dy$ [2]. Таким образом, величина T_C соединения $Ce_2Fe_{14}B$ самая небольшая среди всех соединений $R_2Fe_{14}B$. Соединения $R_2Co_{14}B$ не существует, когда $R = Ce$, оно существует только для $R: Y, La, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb$ [3]. Параметры элементарной ячейки соединения $R_2Co_{14}B$ уменьшаются практически монотонно при переходе от $R = Y$ до $R = Tb$ [3]. Намагниченность соединения $R_2Fe_{14}B$ при $R = Ce$ составляет 24 μ_B на формульную единицу при температуре 300 К, что является самой маленькой величиной среди легких РЗМ [4]. В данном случае μ_B означает магнетон Бора. Поле анизотропии (H_A) соединения $Ce_2Fe_{14}B$ при температуре 300 К составляет 2968 кА/м и направлено по оси четвертого порядка, как и у соединений $Y_2Fe_{14}B$, $Pr_2Fe_{14}B$, $Nd_2Fe_{14}B$, $Dy_2Fe_{14}B$, причем эта ориентация параметра H_A сохраняется и при температуре 77 К [4]. В электротехническом оборудовании современного самолета применяется большое количество постоянных магнитов различных типов, параметры некоторых из них приведены в табл. 1 [5]. Достаточно широкое использование магнитов системы Fe–Ni–Al в различных областях промышленности обусловлено их высокой рабочей температурой, которая в условиях эксплуатации может достигать 600 °С [5]. В электродвигателях самолетов также применяются сплавы системы Fe–Cr–Co и магнитотвердые ферриты. Эти материалы имеют относительно низкую стоимость по сравнению с материалами, основу которых составляют РЗМ [5]. Применение высококоэрцитивных магнитов систем Sm–Co и Nd–Fe–B позволяет существенно снизить массогабаритные показатели вентиляционных электродвигателей. Для их широкого применения в авиационной технике необходимо повысить температурную стабильность и снизить стоимость этих материалов. Величина поля анизотропии $H_A = 29$ Тл – для $Pr_2Fe_{14}B$ и $H_A = 32$ Тл – для $Nd_2Fe_{14}B$, которое параллельно оси четвертого порядка (все измерения производили при температуре 4,2 К) [6]. Величина поля анизотропии $H_A = 75$ Тл – для $Pr_2Co_{14}B$ и $H_A = 30$ Тл – для $Nd_2Co_{14}B$, которое также параллельно оси четвертого порядка [6]. У соединения $Nd_2(Fe_{1-y}Co_y)_{14}B$ при температуре насыщения T_S происходит переориентация поля анизотропии от положения параллельно оси четвертого порядка к положению «конус».

Таблица 1

Параметры некоторых магнитотвердых материалов
(где $(B \cdot H)_{max}$ – максимальное энергетическое произведение;
 H_{CB} – коэрцитивная сила по индукции; B_r – остаточная индукция) [5]

Марка магнита	$(B \cdot H)_{max}$, кДж/м ³	H_{CB} , кА/м	B_r , Тл
Литые сплавы на основе системы Fe–Ni–Al			
ЮНДК35Т5БА	72	110	1,02
ЮНДК35Т5АА	80	115	1,05
ЮНДК40Т8АА	64	145	0,9

Окончание таблицы 1

Марка магнита	$(B \cdot H)_{\max}$, кДж/м ³	$H_{св}$, кА/м	B_r , Тл
Деформируемые материалы на основе системы Fe–Cr–Co			
25X15КА	32	40	1,2
23X15КФА	38	42	1,25
Магнитотвердые ферриты			
24БА210	24	205	0,37
24БА190	28	185	0,39
24БА220	22	215	0,36
Спеченные материалы системы Sm–Co			
КС25ДЦ-240	240	780	1,1
КС25ДЦ-225	225	760	1,06
КС37А	130	560	0,82
Сплавы на основе системы Nd–Fe–В			
NQ3G	245	855	1,14
NQ3F	280	915	1,23
НД35Р-1	215	820	1,1
НД35Р-5	318	892	1,3
МАЕР 30НLs	225	900	1,14
МАЕР 33НsLs	270	930	1,18

Следует отметить, что значение величины T_S и содержание кобальта в сплаве имеют обратно пропорциональную зависимость, как показано в табл. 2 [7].

Таблица 2

Зависимость величины T_S соединения $Nd_2(Fe_{1-y}Co_y)_{14}B$ от содержания кобальта [7]

Условный номер образца	y	T_S , К
1	0	150
2	0,07	142
3	0,29	132
4	0,50	120
5	1	37

Поскольку основная цель – это разработка магнитов для навигационных приборов, где требуется высокая температурная стабильность (независимость свойств магнита от температуры), приходится легировать материал большим количеством кобальта. В данном случае возможное появление при низких температурах переориентации T_S становится несущественным и не препятствует примеси неодима в магнитах. Исследование возможности дополнительного легирования магнитов смежных составов РЗМ с целью повышения вышеприведенной характеристики также проводилось в работах [8, 9]. Рассмотрим подробнее параметр коэффициента прямоугольности кривой размагничивания. Задача любого магнита состоит в том, чтобы создавать магнитное поле в заданном объеме пространства (или прибора). При этом всегда требуется, чтобы магнитное поле было максимальным при минимальной массе магнита. Разумеется, это поле будет определяться величиной остаточной индукции материала магнита: чем больше остаточная индукция, тем выше возможное создаваемое поле. Однако дело не только в этом. Например, материалы системы ЮНДК (сплав Al–Fe–Ni–Co) имеют самую высокую величину остаточной индукции среди всех магнитотвердых материалов [10]. Тем не менее использовать это их преимущество затруднительно, потому что величина коэрцитивной силы этих материалов одна из самых низких среди всех магнитов. В этой

ситуации конструкторы приборов вынуждены использовать материалы типа железа для создания такой магнитной системы, в которой величину B_r можно использовать для создания магнитного поля в системе прибора. Магнитную систему изготавливают из материалов, имеющих минимальную величину коэрцитивной силы, – обычно это железо либо его сплавы. Разумеется, при этом масса прибора значительно (в несколько раз) возрастает, что недопустимо для навигационных приборов самолетов и ракет, где учитываются граммы нагрузки. Поэтому для магнитов введен специальный параметр, который называется коэффициентом прямоугольности кривой размагничивания (SF) и определяется следующим образом: $SF = H_K/H_{cl}$, где H_K – это поле «колена», т. е. такое поле, при котором намагниченность составляет 90 % от остаточной намагниченности, а величина H_{cl} – коэрцитивная сила по намагниченности. Следует отметить, что если постоянный магнит в виде кольцевого сердечника, то он практически не отдает энергию во внешнее пространство, так как почти все магнитные силовые линии замыкаются внутри него, поэтому магнитное поле вне сердечника практически отсутствует. Для того чтобы использовать магнитную энергию постоянных магнитов, необходимо в замкнутом магнитном проводе из материала типа железа создать воздушный зазор определенного размера, тогда на образовавшихся концах этого зазора возникнут магнитные полюсы, создающие размагничивающее поле с заданной напряженностью. Именно такая ситуация реализована в динамически настраиваемых гироскопах, где постоянный магнит является важнейшей составляющей конструкции прибора.

Данная работа выполнена в рамках реализации комплексной научной программы 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») [11].

Материалы и методы

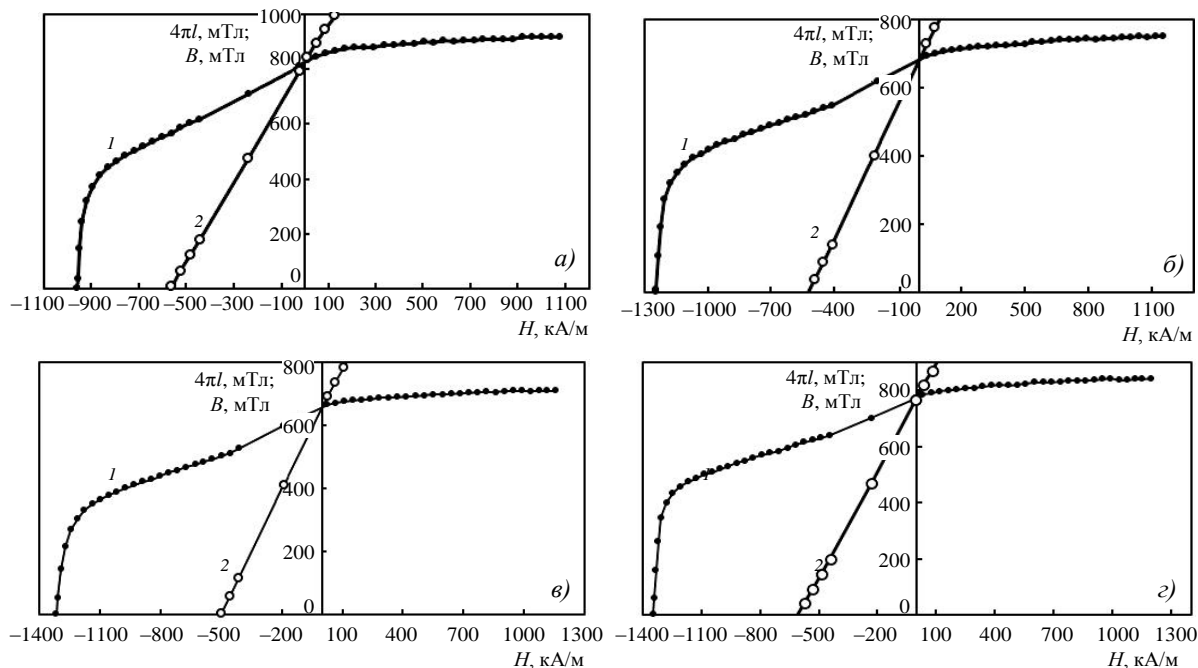
Плавление слитков проведено в вакуумной индукционной печи ВИАМ-2002 с использованием следующих шихтовых материалов: неодим НМ-1 (ТУ 48-4-205-72), празеодим ПрМ-1 (ТУ 48-4-215-72), диспрозий металлический ДиМ-1 (ГОСТ 23862.13-79), церий ЦеМ-1 (ТУ 48-4-216-72), кобальт К0 (ГОСТ 123-2008), железо АРМКО тип 1 (ТС008789-176-2009). Подготовлен также набивной тигель с рабочим слоем из инертной керамики, в основе которой находился оксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия, емкостью 10 кг (по железу). Бор вводили в плавку в виде лигатуры системы Fe–В. Дробление полученного слитка произведено в атмосфере аргона (аргон газообразный или жидкий по ГОСТ 10157-2016) до фракции с размером частиц не более 315 мкм. Помол до монокристаллического размера частиц порошка проведен в центробежно-планетарной мельнице в среде хладона. Преимуществом данной жидкости является то, что она не смешивается с водой, что предохраняет порошок от окисления, и быстро испаряется при помещении образцов в вакуумную печь для спекания. Величина магнитного поля, в котором произведено прессование магнита призматической формы, составляла 800 кА/м. Спекание магнитов произведено в вакуумной печи при температурах 1080 и 1140 °С в течение 1 ч в вакууме 10^{-5} мм рт. ст. На некоторых образцах проведена термическая обработка после спекания при температуре 530 °С в течение 6 ч. Их плотность измерена методом гидростатического взвешивания, где в качестве жидкости использована дистиллированная вода, атмосферы – воздух в соответствии с ГОСТ 25281-82. Измерение свойств образцов проведено на вибрационном магнитометре типа «Меридиан» в полях до 1600 кА/м при температуре 20 ± 5 °С. При измерении образец ориентирован текстурой параллельно магнитному полю

электромагнита вибрационного магнитометра. Размагничивающий фактор для сферического образца и других форм находили по формулам, приведенным в работах [12–15].

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Кривые размагничивания по намагниченности и по индукции некоторых образцов представлены на рисунке.



Кривые размагничивания по намагниченности (1) и по индукции (2) спеченных образцов составов $(\text{Nd}_{0,44}\text{Pr}_{0,24}\text{Dy}_{0,27}\text{Ce}_{0,05})_{17,08}(\text{Fe}_{0,82}\text{Co}_{0,18})_{76,80}\text{B}_{6,12}$ (а), $(\text{Nd}_{0,36}\text{Pr}_{0,26}\text{Dy}_{0,32}\text{Ce}_{0,06})_{15,4}(\text{Fe}_{0,79}\text{Co}_{0,21})_{76,72}\text{B}_{7,88}$ (б), $(\text{Nd}_{0,35}\text{Pr}_{0,27}\text{Dy}_{0,32}\text{Ce}_{0,06})_{15,36}(\text{Fe}_{0,79}\text{Co}_{0,21})_{77,78}\text{B}_{6,86}$ (в) и $(\text{Nd}_{0,34}\text{Pr}_{0,27}\text{Dy}_{0,32}\text{Ce}_{0,06})_{15,28}(\text{Fe}_{0,80}\text{Co}_{0,20})_{79,92}\text{B}_{4,8}$ (з), построенные при температуре 20 ± 5 °С

Для удобства все данные измерений представлены в табл. 3. Видно, что с уменьшением содержания неодима коэрцитивная сила по намагниченности H_{cl} возрастает (строки 1–5 в табл. 3), что коррелирует с данными, полученными на магнитах со схожими составами, приведенными в работах [16, 17]. При этом содержание диспрозия и кобальта практически не меняется. Величины намагниченности насыщения ($4\pi I_s$) и остаточной индукции (B_r), наоборот, уменьшаются.

Величина поля «колена» (H_k), как и прямоугольность кривой размагничивания (SF), остались приблизительно на одном уровне, уменьшаясь незначительно. Поле «колена» – это магнитное поле, при возникновении которого величина намагниченности составляет ~ 90 % от величины остаточной индукции [18]. Температура спекания 1080 °С, по-видимому, имела небольшие значения, что видно по величине плотности (ρ) материалов (табл. 3). Температура термообработки 530 °С не оказывает заметного влияния на магнитные характеристики. Повышение температуры спекания до 1140 °С приводит к увеличению плотности материала (ρ), не оказывая существенного влияния на магнитные свойства. По-видимому, температура спекания 1140 °С является оптимальной для исследованных материалов. Влияния церия на свойства материалов установить не удалось, гораздо существеннее влияние различных концентраций неодима.

Свойства исследованных материалов

Состав материала в атомных долях	Температура спекания и термообработки, °С	ρ , кг/м ³	H_{cl} , кА/м	H_{cb} , кА/м	$4\pi I_s$, мТл	B_r , мТл	H_k , кА/м	SF
(Nd _{0,44} Pr _{0,24} Dy _{0,27} Ce _{0,05}) _{17,08} (Fe _{0,82} Co _{0,18}) _{76,80} B _{6,12}	1080	6860	960	560	917	810	235	0,24
(Nd _{0,44} Pr _{0,24} Dy _{0,27} Ce _{0,05}) _{17,08} (Fe _{0,82} Co _{0,18}) _{76,80} B _{6,12}		6860	960	560	917	810	100	0,10
(Nd _{0,36} Pr _{0,26} Dy _{0,32} Ce _{0,06}) _{15,4} (Fe _{0,79} Co _{0,21}) _{76,72} B _{7,88}		7380	1246	500	752	670	100	0,08
(Nd _{0,35} Pr _{0,27} Dy _{0,32} Ce _{0,06}) _{15,36} (Fe _{0,79} Co _{0,21}) _{77,78} B _{6,86}		7310	1317	500	710	650	200	0,15
(Nd _{0,34} Pr _{0,27} Dy _{0,32} Ce _{0,06}) _{15,28} (Fe _{0,80} Co _{0,20}) _{79,92} B _{4,8}		7380	1344	600	843	770	200	0,15
(Nd _{0,08} Pr _{0,45} Dy _{0,41} Ce _{0,06}) _{13,66} (Fe _{0,75} Co _{0,25}) _{79,07} B _{7,27}	1140 + 530	7590	1020	575	832	750	200	0,20
(Nd _{0,15} Pr _{0,34} Dy _{0,38} Ce _{0,13}) _{13,89} (Fe _{0,74} Co _{0,26}) _{78,81} B _{7,3}		7640	1200	500	720	660	100	0,08
Примечание. Спекание проведено в течение 1 ч, последующая термическая обработка – при 530 °С в течение 6 ч.								

Заключения

Установлено, что примесь неодима и церия в исследованных количествах не оказывает отрицательного влияния на магнитные характеристики спеченных материалов. Таким образом, годные спеченные материалы из недостаточно очищенных РЗМ изготавливать можно, в частности, на составах (Nd_wPr_zDy_zCe_x)–(Fe_{1-y}Co_y)–В ($w \leq 0,44$; $x \leq 0,13$; $z \leq 0,41$; $y \leq 0,26$). Оптимальная температура спекания этих материалов 1140 °С. Величина температурного коэффициента индукции находится в диапазоне значений от –0,02 до –0,03 %/°С, что недостаточно для применения в навигационных приборах, однако это значение можно уменьшить до 0,008 %/°С в области положительных температур при использовании составов, приведенных в работе [19]. Эту величину можно уменьшить по абсолютной величине до нуля, выбрав состав материала (Pr_{1-x}Dy_x)–(Fe_{1-y}Co_y)–В ($x = 0,48$; $y = 0,35$) [20]. В дальнейшем следует экспериментально проверить влияние температур спекания выше, чем температура 1140 °С, а также подробно исследовать влияние термических обработок при температурах как вблизи температуры 530 °С, так и в диапазоне повышенных температур ~1000 °С. В работе [21] такой эксперимент проведен. Спеченные материалы Nd₁₆Fe₇₆B₈ и Pr₁₆Fe₇₆B₈ отжидали при температуре 1000 °С в течение 24 ч в вакууме 0,05 мм рт. ст. Материал Nd₁₆Fe₇₆B₈ после спекания имел величину $B_r = 1201$ мТл, а после отжига – только 1012 мТл. При этом величина коэрцитивной силы уменьшилась с 791 до 760 кА/м. У спеченного материала Pr₁₆Fe₇₆B₈ величина B_r незначительно выросла – с 1167 до 1195 мТл, как и величина H_{cl} – с 981 до 1044 кА/м [21]. Следует отметить, что величина прямоугольности кривой размагничивания у материала Pr₁₆Fe₇₆B₈ не изменилась и осталась равной 0,73, а у материала Nd₁₆Fe₇₆B₈ резко снизилась после отжига – с 0,93 до 0,40 [21]. Авторы работы [21] объясняют эти результаты значительным ростом размера частиц фазы Nd₂Fe₁₄B в материалах Nd₁₆Fe₇₆B₈ после отжига и неизменностью размера частиц фазы Pr₂Fe₁₄B в материалах Pr₁₆Fe₇₆B₈. По-видимому, такое резкое отличие магнитных характеристик материалов Pr₁₆Fe₇₆B₈ и Nd₁₆Fe₇₆B₈ можно объяснить тем, что

скорость протекания диффузии в сплавах на основе празеодима имеет более низкие значения, чем аналогичная характеристика в сплавах, основным элементом которых является неодим [22]. Возможно, это связано с различием радиусов ионов Nd^{3+} (9,8 нм) и Pr^{3+} (9,9 нм) [23]. Это подтверждается данными работы, в которой коэффициент диффузии (D) неодима составил $D_{\text{Nd}} = 2,3 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \cdot \text{с}$, а у диспрозия $D_{\text{Dy}} = 2,9 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \cdot \text{с}$ при температуре 1050 °С [24]. Диспрозий имеет меньший размер иона, поэтому коэффициент диффузии у него больше [24]. Это подтверждается и данными работы [25], в которой коэффициент диффузии выражен формулой $D \approx T/6\pi r$ (где r – радиус диффундирующей частицы, а величина T – температура в градусах Кельвина).

Таким образом, изготавливать спеченные магниты для систем навигации из очищенных РЗМ вполне возможно. Разумеется, степень чистоты этих металлов должна подбираться с учетом требований, предъявляемых к приборам и агрегатам, в которых они будут находиться. Следует подчеркнуть, что стоимость навигационных приборов достаточно высока (как и время, затраченное на их изготовление), поэтому, несмотря на сложность и дороговизну получения максимально чистых РЗМ, их стоимость не будет существенно влиять на стоимость навигационного прибора – в этом случае экономить на материалах не следует (за исключением гипотетического случая, когда РЗМ в стране отсутствуют). Однако к России это не относится, поскольку ее разведанные запасы РЗМ находятся на втором месте в мире (больше – только в Китае) [26]. Кроме того, существуют предприятия, где возможно получение РЗМ любой степени чистоты – это предприятия оборонно-промышленного комплекса в области ядерной энергетики и промышленности. Дело в том, что разделение и очистка радиоактивных элементов (уран, плутоний) и редкоземельных элементов осуществляются по одной и той же схеме и на аналогичном промышленном оборудовании с применением одинаковых вторичных продуктов (например, газы и другие составляющие технологического процесса, такие как кислоты и щелочные металлы).

Список источников

1. Производство редких и редкоземельных металлов. М.: Бюро НТД, 2014. С. 84–116.
2. Hiroswawa S., Matsuura Yu., Yamamoto H. et al. Magnetization and magnetic anisotropy of $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ measured on single crystals // *Journal of Applied Physics*. 1986. Vol. 59. P. 873–879.
3. Buschow K.H.J., de Mooij D.B., Sinnema S. et al. Magnetic and crystallographic properties of ternary rare earth compounds of the type $\text{R}_2\text{Co}_{14}\text{B}$ // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1985. Vol. 51. P. 211–217.
4. Boltich E.B., Oswald E., Huang M.Q. et al. Magnetic characteristics of $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ systems prepared with high purity rare earths (R = Ce, Pr, Dy and Er) // *Journal of Applied Physics*. 1985. Vol. 57. P. 4106–4108.
5. Матусевич В.А., Гетя А.Н., Шарабан Ю.В. Применение высококоэрцитивных постоянных магнитов в самолетных агрегатах // *Электротехника и Электромеханика*. 2006. № 1. С. 33–35.
6. Sinnema S., Franse J.J.M., Radwanski R.J. et al. Magnetic measurements on $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ and $\text{R}_2\text{Co}_{14}\text{B}$ compounds in high field // *Journal de Physique*. 1985. Т. 46. P. C6-301–C6-304.
7. Abache C., Oesterreicher H. Magnetic properties of compounds $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ // *Journal of Applied Physics*. 1985. Vol. 57. P. 4112–4114.
8. 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: journal.viam.ru (дата обращения: 29.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-44-60.
9. Faria R.N., Davies B.E., Brown D.N. et al. Microstructural and magnetic studies of cast and annealed Nd and PrFeCoBZr alloys and HDDR materials // *Journal of Alloys and Compounds*. 2000. Vol. 296. P. 223–228.

10. Чередниченко И.В., Бавина М.А., Бондаренко Ю.А., Шурыгин В.Д., Овчинников А.Д., Галимуллин С.А. Влияние параметров направленной кристаллизации на структуру и свойства постоянных магнитов из сплава ЮНДКБА // Труды ВИАМ. 2023. № 11 (129). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.06.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-77-89.
11. 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.
12. 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. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.06.2024).
13. Лаптева К.А., Толмачев И.И. Расчет размагничивающего фактора при продольном намагничивании в магнитопорошковой дефектоскопии // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. № 2. С. 140–144.
14. Sato M., Ishii Y. Simple and approximate expressions of demagnetizing factors of uniformly magnetized rectangular rod and cylinder // Journal of Applied Physics. 1989. Vol. 66. No. 2. P. 983–985.
15. Chen D., Brug J.A., Goldfarb R.B. Demagnetizing factor for cylinder // IEEE Transactions on Magnetics. 1991. Vol. 27. No. 4. P. 3601–3619.
16. Валеев Р.А., Королев Д.В., Моргунов Р.Б., Пискорский В.П. Влияние высоких концентраций кобальта на свойства магнитов Pr–Dy–Fe–Co–B и Nd–Dy–Fe–Co–B // Труды ВИАМ. 2022. № 10 (116). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.06.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-66-75.
17. Perigo E.A., Takiishi H., Motta C.C. et al. On the squareness factors behavior of RE–FeB (RE=Nd or Pr) magnets above room temperature // IEEE Transactions on Magnetics. 2000. Vol. 45. No. 10. P. 4431–4434.
18. Yujing Z., Tranyu M., Mi Y. et al. Squareness factors of demagnetization curves for multi-main-phase Nd–Ce–Fe–B magnets with different Ce contents // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2019. Vol. 487. DOI: 10/1016/j.jmmm.2019.165355.
19. Валеев Р.А., Королев Д.В., Моргунов Р.Б., Пискорский В.П. Вклад фаз в намагниченность спеченных материалов Nd–Dy–Fe–Co–B // Труды ВИАМ. 2022. № 11 (117). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.06.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-60-68.
20. 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 материалов системы Nd–Dy–Fe–Co–B // Металловедение и термическая обработка металлов. 2007. № 4. С. 3–10.
21. Corfield M.R., Williams A.J., Harris I.R. The effect on long annealing at 1000°C for 24 h on the microstructure and magnetic properties of Pr–Fe–B/Nd–Fe–B magnets based on Nd₁₆Fe₇₆B₈ and Pr₁₆Fe₇₆B₈ // Journal of Alloys and Compounds. 2000. Vol. 296. P. 138–147.
22. Faria R.N., Davies B.E., Brown D.N. et al. Microstructural and magnetic studies of cast and annealed Nd and Pr–Fe–Co–B–Zr alloys and HDDR materials // Journal Alloys and Compounds. 2000. Vol. 296. P. 223–228.
23. Урусов В.С. Теоретическая кристаллохимия. М., Изд-во МГУ, 1987. 275 с.
24. Cook B.A., Haringa J.L., Laabs F.C. et al. Diffusion of Fe, Co, Nd and Dy in R₂(Fe_{1-x}Co_x)₁₄B where R=Nd or Dy // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2001. Vol. 233. P. L136–L141.
25. Смирнов Б.М., Сон Э.Е., Терешонок Д.В. Диффузия и подвижность атомных частиц в жидкости // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2017. Т. 152. Вып. 5. С. 1065–1072.
26. Крюков Я.В., Самсонов Н.Ю., Яценко В.А. Российская редкоземельная промышленность: следует ли перенять опыт Китая? // ЭКО. 2018. № 10 (532). С. 138–152. DOI: 10.30680/ЭСО0131-7652-2018-10-138-152.

References

1. *Production of rare and rare earth metals*. Moscow: NTD Bureau, 2014, pp. 84–116
2. Hirosawa S., Matsuura Yu., Yamamoto H. et al. Magnetization and magnetic anisotropy of $R_2Fe_{14}B$ measured on single crystals. *Journal of Applied Physics*, 1986, vol. 59, pp. 873–879.
3. Buschow K.H.J., de Mooij D.B., Sinnema S. et al. Magnetic and crystallographic properties of ternary rare earth compounds of the type $R_2Co_{14}B$. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1985, vol. 51, pp. 211–217.
4. Boltich E.B., Oswald E., Huang M.Q. et al. Magnetic characteristics of $R_2Fe_{14}B$ systems prepared with high purity rare earths ($R = Ce, Pr, Dy$ and Er). *Journal of Applied Physics*, 1985, vol. 57, pp. 4106–4108.
5. Matusevich V.A., Getya A.N., Sharaban Yu.V. Application of high-coercivity permanent magnets in aircraft units. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, 2006, no. 1, pp. 33–35.
6. Sinnema S., Franse J.J.M., Radwanski R.J. et al. Magnetic measurements on $R_2Fe_{14}B$ and $R_2Co_{14}B$ compounds in high field. *Journal de Physique*, 1985, vol. 46, pp. C6-301–C6-304.
7. Abache C., Oesterreicher H. Magnetic properties of compounds $R_2Fe_{14}B$. *Journal of Applied Physics*, 1985, vol. 57, pp. 4112–4114.
8. 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 micromagnets engineering (review). *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 29, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-44-60.
9. Faria R.N., Davies B.E., Brown D.N. et al. Microstructural and magnetic studies of cast and annealed Nd and PrFeCoBZr alloys and HDDR materials. *Journal of Alloys and Compounds*, 2000, vol. 296, pp. 223–228.
10. Cherednichenko I.V., Bavina M.A., Bondarenko Yu.A., Shurygin V.D., Ovchinnikov A.D., Galimullin S.A. Influence of directed crystallization parameters on structure and properties of Alnico 5-7 alloy permanent magnets. *Trudy VIAM*, 2023, no. 11 (129), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 27, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-77-89.
11. 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.
12. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Rare metals and rare earth elements – materials of modern and future high technologies. *Trudy VIAM*, 2013, no. 2, paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 27, 2024).
13. Lapteva K.A., Tolmachev I.I. Calculation of the demagnetizing factor during longitudinal magnetization in magnetic particle testing. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 321, no. 2, pp. 140–144.
14. Sato M., Ishii Y. Simple and approximate expressions of demagnetizing factors of uniformly magnetized rectangular rod and cylinder. *Journal of Applied Physics*, 1989, vol. 66, no. 2, pp. 983–985.
15. Chen D., Brug J.A., Goldfarb R.B. Demagnetizing factor for cylinder. *IEEE Transactions on Magnetism*, 1991, vol. 27, no. 4, pp. 3601–3619.
16. Valeev R.A., Korolev D.V., Morgunov R.B., Piskorsky V.P. The effect of high concentrations of cobalt on the properties of magnets Pr–Dy–Fe–Co–B and Nd–Dy–Fe–Co–B. *Trudy VIAM*, 2022, no. 10 (116), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 27, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-66-75.
17. Perigo E.A., Takiishi H., Motta C.C. et al. On the squareness factors behavior of RE–FeB ($RE = Nd$ or Pr) magnets above room temperature. *IEEE Transactions on Magnetism*, 2000, vol. 45, no. 10, pp. 4431–4434.
18. Yujing Z., Tranyu M., Mi Y. et al. Squareness factors of demagnetization curves for multi-main-phase Nd–Ce–Fe–B magnets with different Ce contents. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 487. DOI: 10/1016/j.jmmm.2019.165355.

19. Valeev R.A., Korolev D.V., Morgunov R.B., Piskorsky V.P. The contribution of phases to the magnetization of sintered materials Nd–Dy–Fe–Co–B. *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 27, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-60-68.
20. Kablov E.N., Petrakov A.F., Piskorsky V.P., Valeev R.A., Nazarova N.V. Influence of dysprosium and cobalt on the temperature dependence of magnetization and phase composition of materials of the Nd–Dy–Fe–Co–B system. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2007, no. 4, pp. 3–10.
21. Corfield M.R., Williams A.J., Harris I.R. The effect on long annealing at 1000°C for 24 h on the microstructure and magnetic properties of Pr–Fe–B/Nd–Fe–B magnets based on Nd₁₆Fe₇₆B₈ and Pr₁₆Fe₇₆B₈. *Journal of Alloys and Compounds*, 2000, vol. 296, pp. 138–147.
22. Faria R.N., Davies B.E., Brown D.N. et al. Microstructural and magnetic studies of cast and annealed Nd and Pr–Fe–Co–B–Zr alloys and HDDR materials. *Journal Alloys and Compounds*, 2000, vol. 296, pp. 223–228.
23. Urusov V.S. *Theoretical crystal chemistry*. Moscow: Moscow State Univ. Press, 1987, 275 p.
24. Cook B.A., Harringa J.L., Laabs F.C. et al. Diffusion of Fe, Co, Nd and Dy in R₂(Fe_{1-x}Co_x)₁₄B where R=Nd or Dy. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2001, vol. 233, pp. L136–L141.
25. Smirnov B.M., Son E.E., Tereshonok D.V. Diffusion and mobility of atomic particles in liquid. *Zhurnal eksperimentalnoy i teoreticheskoy fiziki*, 2017, vol. 152, is. 5, pp. 1065–1072.
26. Kryukov Ya.V., Samsonov N.Yu., Yatsenko V.A. Russian rare earth industry: should we adopt China's experience? *EKO*, 2018, no. 10 (532), pp. 138–152. DOI: 10.30680/ЭКО0131-7652-2018-10-138-152.

Информация об авторах

Потапов Максим Викторович, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Валеев Руслан Анверович, начальника лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Моргунов Роман Борисович, главный научный сотрудник, профессор, д.ф.-м.н., ФИЦ ПХФ и МХ РАН, office@icp.ac.ru; ведущий научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Пискорский Вадим Петрович, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Maxim V. Potapov, First Category Technician, 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, Chief Researcher, Professor, Doctor of Sciences (Phys. & Math.), FRC PCP MC RAS, office@icp.ac.ru; Leading Researcher, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vadim P. Piskorskiy, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 11.09.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 16.09.2024.
The article was submitted 11.09.2024; approved and accepted for publication after reviewing 16.09.2024.