

Научная статья

УДК 669.046.516.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-108-117

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ИТТРИЯ НА СВОЙСТВА СПЕЧЕННЫХ МАГНИТОВ Nd–Dy–Y–Fe–Co–B

А.В. Бузенков¹, Р.А. Валеев¹, В.П. Пискорский¹, Р.Б. Моргунов¹

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

Аннотация. Исследовано влияние легирования иттрием на свойства спеченных магнитов Nd–Dy–Y–Fe–Co–B. Показано, что с увеличением содержания иттрия уменьшается коэрцитивная сила по намагниченности и по индукции. Величина прямоугольности кривой размагничивания несколько увеличивается. Величины остаточной индукции и намагниченности насыщения меняются незначительно, но имеют тенденцию к возрастанию с увеличением содержания иттрия. Таким образом, иттрий является нежелательной примесью в термостабильных магнитах для навигационных приборов.

Ключевые слова: постоянные магниты, редкоземельные магниты, кривая размагничивания по намагниченности, кривая размагничивания по индукции, прямоугольность кривой размагничивания, иттрий

Для цитирования: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-108-117.

Scientific article

THE EFFECT OF THE CONTENT OF YTTRIUM ON THE PROPERTIES OF THE SINTERED MAGNETS Nd–Dy–Y–Fe–Co–B

A.V. Buzenkov¹, R.A. Valeev¹, V.P. Piskorsky¹, R.B. Morgunov¹

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

Abstract. Was investigated by the effect of using yttrium on the properties of the sintered Magnets Nd–Dy–Y–Fe–Co–B. It is shown that the coercive force on the magnetization and induction is decreased with an increase in the content of yttrium. The magnitude of the rectangulation of the clarification curve slightly increases. The value of residual induction and the magnetization of saturation changes not significantly, but tend to increase with the content of yttria. Thus yttrium is not desirable impurity in thermostable magnets for navigation instruments.

Keywords: permanent magnets, rare earth magnets, magnetization migration curve, induction curve by induction, rectangle of demagnetization curve, yttrium

For citation: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-108-117.

Введение

С расширением спектра задач для искусственных спутников Земли изменяются также требования к точности их положения, а следовательно, и к их навигационным системам. Например, высокие требования предъявляются к точности позиционирования космических аппаратов, на борту которых установлены оптические приборы (такие

как телескопы и камеры высокого разрешения), а также спутниковые системы навигации. Решающее значение для точности навигационных приборов спутников имеет точность их чувствительных элементов – гироскопов [1]. Несмотря на активное развитие в современной навигационной технике таких направлений, как оптоволоконные, лазерные и микромеханические гироскопы, до сих пор в преобладающей части систем навигации летательных и космических аппаратов в качестве чувствительных элементов используются классические механические гироскопы. Среди них одними из самых эффективных (как по соотношению стоимость/точность, так и по массогабаритным характеристикам) являются динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ) [1], среди которых есть трехстепенные гироскопы с внутренним упругим кардановым подвесом. Специфическая особенность ДНГ – возможность точной и стабильной компенсации угловой жесткости упругих элементов подвеса с помощью инерционного момента кольца при отклонении ротора относительно оси приводного вала. Точная компенсация обеспечивается при выполнении так называемого условия динамической настройки. По сравнению с поплавковыми гироскопами ДНГ имеют преимущества по массогабаритным характеристикам и стоимости, поэтому в настоящее время ДНГ широко применяются в качестве чувствительных элементов гиросtabilизированных платформ, бесплатформенных инерциальных систем и блоков, гиротакметров, а также систем бортовых курсовых вертикалей и гироинклинометров [1]. Как правило, изготовление и настройку гироскопических приборов выполняют на современных прецизионных испытательных стендах, измерительные системы которых включают прецизионные оптические устройства и цифровые системы обработки информации в реальном времени, а также точные приводные системы, обеспечивающие высокую точность калибровки. Поэтому они являются достаточно сложными и дорогими устройствами, цена которых составляет более 100000 долл., что приводит к увеличению себестоимости изготовления и испытаний гироскопов [2]. Известны ДНГ, применяемые в измерителях абсолютной угловой скорости. Недостаток данного устройства – наличие погрешности масштабного коэффициента, вызванной изменением коэффициента передачи датчика момента при изменении температуры окружающей среды. Основная доля этой погрешности обусловлена изменением характеристик постоянных магнитов, входящих в конструкцию датчика момента, при изменении температуры [3]. Таким образом, необходимы магниты, свойства которых минимально меняются с изменением температуры [3]. Другое требование – увеличение магнитной индукции в зоне расположения катушек датчика момента ДНГ, т. е. создание генератора сигнала, амплитуда которого прямо пропорциональна магнитной индукции в рабочем зазоре датчика момента в данный момент времени и не зависит от взаимного положения ротора и статора. Таким образом, можно сформулировать три основных требования к материалам магнитов: минимальная зависимость их свойств от температуры, максимально возможная величина намагниченности и равномерная величина намагниченности по внешнему диаметру кольцевого магнита. Равномерную величину намагниченности по внешнему диаметру может обеспечить только кольцевой магнит с радиальной текстурой (КМРТ), но не кольцо, собранное из отдельных сегментов, диаметрально намагниченных. Максимальную величину поля в зазоре ДНГ может обеспечить магнит с максимальной величиной намагниченности насыщения ($4\pi I_s$). Цельные КМРТ любого диаметра могут быть изготовлены только из спеченных материалов систем Nd–Dy–Fe–Co–B и Pr–Dy–Fe–Co–B [4–8]. Однако вместо диспрозия, неодима и празеодима можно использовать другие редкоземельные металлы (РЗМ) – главное, чтобы существовало соединение $R_2Co_{14}B$. Данное соединение существует только для R: La, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Y [9].

Согласно законам механики, скорость поворота оси ДНГ обратно пропорциональна его собственной угловой скорости [10]. Погрешность гироскопа измеряется скоростью ухода его оси от первоначального положения, которая обычно измеряется в

угловых градусах за единицу времени, например за час. Лучшие современные ДНГ имеют уход 10^{-4} – 10^{-5} градусов в час [10]. В ДНГ за счет подбора моментов инерции рамок подвеса и угловой скорости вращения ротора осуществляется компенсация упругих моментов подвеса, приложенных к ротору. К достоинствам ДНГ следует отнести их миниатюрность, высокую стабильность показаний и относительно невысокую среднюю стоимость [10], которая в России составляет ~2000 долл. [11]. К достоинствам ДНГ также относятся: технологичность конструкции, повышенная надежность, возможность функционирования в широком диапазоне температур (от -55 до $+120$ °С), высокие характеристики точности ($\sim(0,01-0,1)$ градусов в час), большой ресурс работы (от 10000 ч) и малая потребляемая мощность [12]. Недостатками ДНГ являются меньшая ударостойкость и вибрационная прочность, вариативность вида передаточной функции ДНГ на низких частотах при изменении условий, низкая помехозащищенность [12]. Кратко остановимся на тенденциях развития современной гироскопии. В настоящее время созданы настолько точные гироскопические системы, что дальнейшего повышения точности многим потребителям уже не требуется, а сокращение средств, выделяемых для военно-промышленного комплекса в бюджетах ведущих мировых стран, резко повысило интерес к массовым гражданским применениям гироскопической техники. Наконец, выдающийся прогресс в области высокоточной спутниковой навигации сделал ненужными автономные средства навигации в тех случаях, когда сигнал со спутника может приниматься непрерывно. В настоящее время большинство навигационных задач с очень высокой точностью (доли метра) решаются с помощью GPS (Global Position System) и ГЛОНАСС. При этом исчезает необходимость в использовании даже курсовых гироскопов, так как сравнение показаний двух приемников спутниковых сигналов, установленных на расстоянии в несколько метров (например, на крыльях самолета) позволяет получить информацию о повороте самолета вокруг вертикальной оси. Следует констатировать, что эволюционное развитие классической навигации завершено, при этом главным образом обеспечены узкоспециальные потребности военно-промышленного комплекса и вынужденно сменяются приоритеты развития – в виде конкуренции спутниковых навигационных систем. Именно поэтому внимание специалистов в области гироскопии сосредоточено на поиске нетрадиционных областей применения этих приборов. Эксплуатационные характеристики ДНГ в значительной степени определяются точностью оценивания параметров гироскопа в процессе калибровки. Для аттестации гироскопа используются различные испытательные стенды, обеспечивающие калиброванные воздействия путем вращения корпуса гироскопа с большими угловыми скоростями и заданием линейных постоянных или вибрационных ускорений. Последние частично имитируют установкой гироскопа в различные фиксированные положения относительно географической системы координат. Статический многопозиционный метод калибровки является одним из широко применяемых методов оценки параметров ДНГ. Как правило, изготовление и настройку гироскопических приборов выполняют на современных прецизионных испытательных стендах [2], измерительные системы которых включают прецизионные оптические устройства и цифровые системы обработки информации, а также точные приводные системы, обеспечивающие высокую точность калибровки. Поэтому они являются достаточно сложными и дорогими устройствами, цена которых составляет >100000 долл., что приводит к повышению себестоимости изготовления и испытаний гироскопа. С момента создания ДНГ их конструкция претерпела множество изменений, благодаря которым достигнута предельно эффективная работа гироскопов. Поэтому актуальным становится вопрос минимизации погрешностей, не связанных с конструкцией, уже существующих ДНГ. Систематические составляющие дрейфа ДНГ определяются различными факторами. Одним из наиболее прогнозируемых факторов с точки зрения их возможного влияния на нестабильность дрейфа гироскопа от запуска к запуску является ориентация на магнитно-

гистерезисном роторе привода вектора его намагниченности. В работе [1] поставлена задача уменьшения дрейфа ДНГ от запуска к запуску путем уменьшения составляющей, связанной с положением вектора намагниченности ротора двигателя. Для этих целей проведены экспериментальные исследования, подтверждающие наличие и повторяемость описанного явления и позволяющие провести количественную оценку его влияния на дрейф ДНГ, а также испытана методика минимизации данной погрешности на отдельно взятых ДНГ [1]. Следует отметить, что частота вращения ротора ДНГ варьируется в широких пределах и меняется от 7000 до 30000 об/мин [13]. Важным моментом является то, что в ДНГ применяются термостабильные КМРТ. Ранее такие магниты делали из термостабильного материала Sm-Co марки КС-26, однако из этого материала невозможно изготовить цельные КМРТ, поэтому делали из призм сектора и собирали из них КМРТ (обычно из 8 секторов). Но такое кольцо неоднородно по текстуре, поэтому оно неоднородно по значению магнитного поля на поверхности кольца и в приборе [4]. Помимо стабильности характеристик немаловажными также являются такие характеристики, как диапазон измерения угловых скоростей (>2000 градусов в секунду) и частотный диапазон (>100 Гц). Гироскопы, обладающие такими характеристиками, применяются на высокодинамичных объектах. Традиционные гироскопы относятся к высокоточным дорогим приборам с большой массой и карданным подвесом. Начиная с 1980-х гг. выявлена возможность создания этих приборов на основе нероторных гироскопов (лазерных или волоконно-оптических) как технических средств, позволяющих существенно снизить производственные и эксплуатационные расходы. Тем не менее к достоинствам ДНГ следует отнести их миниатюрность, высокую стабильность показаний, относительно невысокую стоимость.

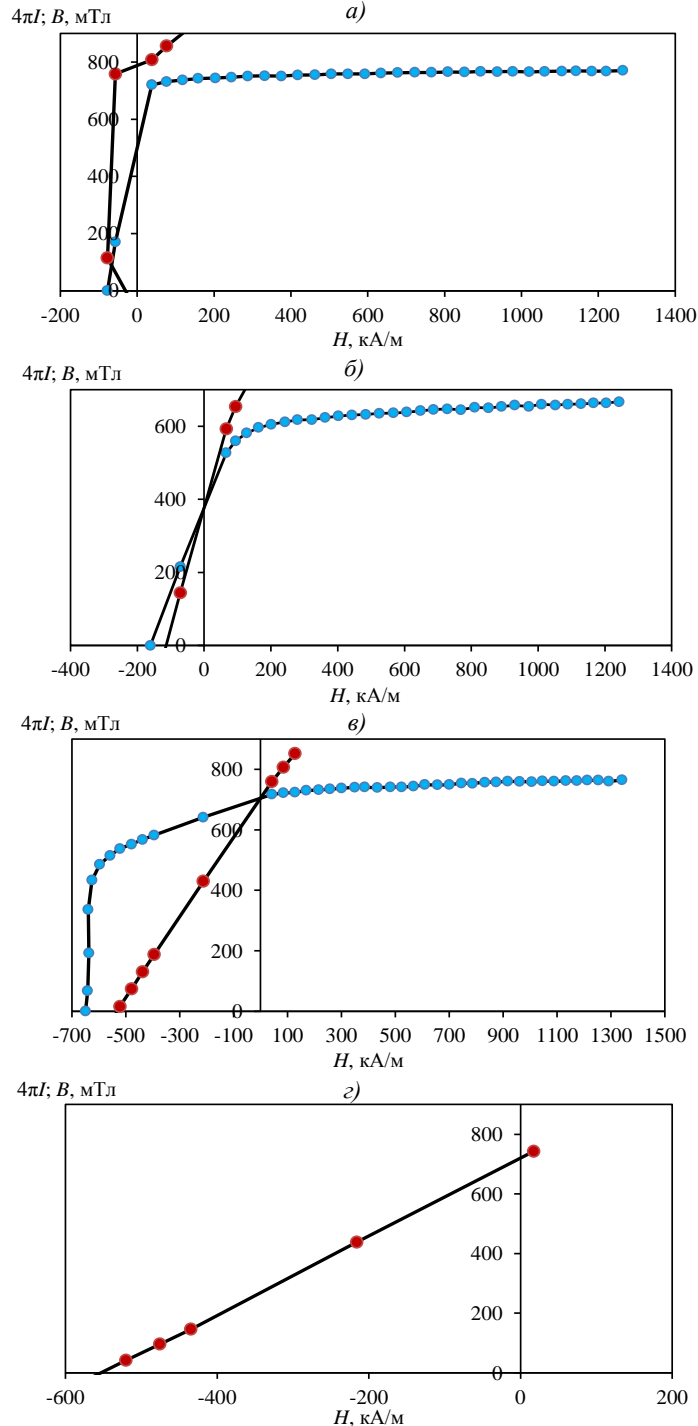
Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 11.1. «Термостабильные магнитотвердые материалы и математические модели расчета их температурных характеристик для навигационных приборов нового поколения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [14].

Материалы и методы

В вакуумной индукционной печи ВИАМ-2002 с применением шихтовых материалов выплавляли слитки на основе неодима НМ-1 (ТУ 48-4-205-72), диспрозия металлического ДиМ-1 (ГОСТ 23862,13-79), иттрия металлического (ТУ 48-4-208-72), кобальта К0 (ГОСТ 123-2008), железа АРМКО типа 1 (ТС008789-176-2009). Для плавки готовили набивной тигель с рабочим слоем из инертной керамики на основе оксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, емкостью 10 кг (по железу). Бор вводили в плавку в виде лигатуры ферробора состава $Fe_{88,7}B_{11,3}$ (здесь и далее – % (по массе)). Сплавы выплавляли в вакуумной индукционной печи в атмосфере аргона. Слитки дробили до размера 630 мкм в атмосфере аргона. Тонкий помол проводили в центробежно-планетарной мельнице САНД-1 в течение 25 мин в среде помольной жидкости – трифтортрихлорэтана ($C_2F_3Cl_3$) с температурой кипения 47,5 °С. Заготовки магнитов в виде призм получали прессованием с приложением магнитного поля 800 кА/м перпендикулярно усилию прессования. Спекание заготовок проводили в вакуумной печи СНВЭ 1.3.1/16 ИЗ при температуре 1130 °С в течение 1 ч в вакууме (10^{-5} мм рт. ст.). Из спеченных магнитов изготавливали образцы сферической формы размером 2–3 мм. Плотность определяли взвешиванием в дистиллированной воде и на воздухе [15]. Измерения свойств образцов проводили на вибрационном магнитометре типа «Меридиан» в полях до 1600 кА/м при температуре 20 °С. Образец ориентировали текстурой параллельно магнитному полю электромагнита. Размагничивающий фактор для сферического образца и других форм находили по формулам, приведенным в работах [16–18].

Результаты и обсуждение

На рисунке представлены кривые намагничивания по намагнитченности и по индукции, измеренные при комнатной температуре для образцов с различным содержанием иттрия. Содержание остальных элементов не изменялось. Видно, что с увеличением содержания иттрия достаточно резко уменьшается коэрцитивная сила по намагнитченности и по индукции.



Кривые намагничивания по намагнитченности $4\pi I$ (●) и по индукции B (●) спеченных материалов составов: $(Nd_{0,16}Dy_{0,38}Y_{0,47})_{14,65}(Fe_{0,74}Co_{0,26})_{78,58}B_{6,77}$ (а), $(Nd_{0,31}Dy_{0,37}Y_{0,32})_{14,74}(Fe_{0,74}Co_{0,26})_{78,42}B_{6,84}$ (б), $(Nd_{0,47}Dy_{0,37}Y_{0,16})_{15,01}(Fe_{0,74}Co_{0,26})_{78,43}B_{6,56}$ (в) и $(Nd_{0,64}Dy_{0,36})_{15,06}(Fe_{0,74}Co_{0,26})_{78,18}B_{6,76}$ (г)

Основные результаты (включая фактор прямоугольности кривой размагничивания) представлены в табл. 1. Фактор прямоугольности кривой размагничивания (SF) определяли по формуле

$$SF = \frac{H_k}{H_{ci}},$$

где H_k – магнитное поле, при котором намагниченность составляет 90 % от величины остаточной намагниченности; H_{ci} – коэрцитивная сила по намагниченности [19].

Поле H_k также называют «полем колена». Как видно из данных табл. 1, фактор прямоугольности растет с увеличением содержания иттрия; величина плотности спеченного материала (ρ), наоборот, уменьшается с увеличением содержания иттрия.

Для материала $\text{Pr}_{16}\text{Fe}_{76}\text{B}_8$ при температуре 298 К параметр $SF = 0,93$, а при температуре 373 К – $SF = 0,90$ [19]. Для материала $\text{Pr}_{15,30}\text{Fe}_{75,22}\text{Co}_{3,20}\text{Cu}_{0,40}\text{Nb}_{0,08}\text{B}_{5,80}$ при температуре 298 К параметр $SF = 0,78$, а при температуре 373 К – $SF = 0,73$ [20]. Отсюда можно сделать вывод, что легирование кобальтом уменьшает величину параметра SF.

Таблица 1

Свойства спеченных материалов системы Nd–Dy–Y–Fe–Co–B в зависимости от состава при температуре 20 °С

Условный номер состава	Состав материала, % (атомн.)	SF	ρ , кг/м ³	H_{ci} , кА/м	H_{cb} , кА/м	B_r , мТл	$4\pi I_s$, мТл
1	(Nd _{0,16} Dy _{0,38} Y _{0,47}) _{14,65} (Fe _{0,74} Co _{0,26}) _{78,58} B _{6,7}	0,73	7380	77	77	758	771
2	(Nd _{0,31} Dy _{0,37} Y _{0,32}) _{14,74} (Fe _{0,74} Co _{0,26}) _{78,42} B _{6,84}	0,44	7460	161	71	593	666
3	(Nd _{0,47} Dy _{0,37} Y _{0,16}) _{15,01} (Fe _{0,74} Co _{0,26}) _{78,43} B _{6,6}	0,33	7580	649	521	760	765
4	(Nd _{0,64} Dy _{0,36}) _{15,06} (Fe _{0,74} Co _{0,26}) _{78,18} B _{6,76}	0,47	7820	921	560	743	783

В работе [21] исследованы материалы, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Свойства магнитов системы Pr–Fe–Co–B в зависимости от содержания кобальта и бора по данным работы [23]

Условный номер состава	Состав материала, % (атомн.)	SF	H_{ci} , кА/м	H_{cb} , кА/м	B_r , мТл
1	Pr ₁₄ Fe _{79,9} Nb _{0,1} B ₆	0,68	1249	836	1170
2	Pr ₁₄ (Fe _{0,80} Co _{0,20}) _{81,9} Nb _{0,1} B ₄	0,24	676	501	1000
3	Pr ₁₄ (Fe _{0,80} Co _{0,20}) _{80,9} Nb _{0,1} B ₅	0,70	684	589	1200
4	Pr ₁₄ (Fe _{0,80} Co _{0,20}) _{79,9} Nb _{0,1} B ₆	0,75	637	549	1250
5	Pr ₁₄ (Fe _{0,80} Co _{0,20}) _{78,9} Nb _{0,1} B ₇	0,73	700	637	1240
6	Pr ₁₄ (Fe _{0,79} Co _{0,21}) _{77,9} Nb _{0,1} B ₈	0,61	987	700	1090

Как видно из данных табл. 2, с увеличением содержания кобальта в составе 2 величина параметра SF уменьшается в 2,8 раза, но следует учесть содержание бора. Когда содержание бора становится таким, как в составе 1, величина параметра SF = 0,75 (состав 4) даже больше, чем в составе 1. При этом становится максимальным и значение B_r . Таким образом, в исследованных в работе [21] пределах изменения кобальта его содержание не влияет на величину параметра SF. Однако дальнейшее увеличение содержания бора опять снижает величину параметра SF (составы 5 и 6). В работе

[19] показано, что в пределах содержания кислорода от 0,15 до 0,195 % (по массе) в магнитах состава $\text{Pr}_{15,78}\text{Fe}_{75,67}\text{Al}_{0,5}\text{B}_{8,05}$, величина параметра SF увеличивается с 0,57 до 0,66. При этом значения H_{ci} и коэрцитивной силы по индукции (H_{cB}) несколько возрастают. В работе [22] исследовано влияние содержания празеодима на величину параметра SF. Материал состава $\text{Pr}_{14,5}\text{Fe}_{78}\text{Zr}_{0,5}\text{B}_7$ имеет величину SF = 0,90, а материал состава $\text{Pr}_{16}\text{Fe}_{75,5}\text{Zr}_{0,5}\text{B}_8$ – величину SF = 0,96 [22]. Однако с увеличением содержания празеодима уменьшается величина B_r с 1,23 до 1,19 Тл, а величина H_{ci} – с 0,72 до 0,67 Тл. Легирование церием ухудшает величину параметра SF [23]. Так, материал состава $(\text{Pr}, \text{Nd})_{30,5}\text{Fe}_{67,5}\text{M}_1\text{B}_{1,0}$ имеет величину параметра SF = 97,4, а материал состава $[(\text{Pr}, \text{Nd})_{0,73}\text{Ce}_{0,27}]_{30,5}\text{Fe}_{67,5}\text{M}_1\text{B}_{1,0}$ – меньшую величину параметра SF = 94,3 (в данном случае составы даны в % (по массе), а М обозначает примесь алюминия, меди, галлия, циркония) [23]. Кроме того, показано, что легирование церием значительно снижает значения величин B_r и H_{ci} [23].

Заключения

Уменьшение плотности материала с увеличением содержания иттрия, по-видимому, связано с тем, что атомная масса составляет, а. е. м.: 88,9 – для иттрия, 144,2 – для неодима, 162,5 – для диспрозия, т. е. итрий в ~2 раза легче, чем неодим и диспрозий. Кроме того, магнитный момент иона Y^{3+} как в соединении $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, так и в соединении $\text{R}_2\text{Co}_{14}\text{B}$, равен нулю [24]. В работе [25] показано, что в соединении $(\text{Y}_{1-x}\text{Nd}_x)_2\text{Co}_{14}\text{B}$ величина энергии анизотропии резко уменьшается с уменьшением содержания неодима и при $x = 0,4$ она становится равной нулю. В исследованных материалах (табл. 1) содержание кобальта достаточно высокое, что может служить объяснением значительного уменьшения коэрцитивной силы с увеличением содержания иттрия аналогично результатам работы [25]. По-видимому, из-за достаточно высокого содержания кобальта в исследованных материалах реализуется не анизотропия «легкая ось» или «легкая плоскость», а что-то среднее, что приводит к неколлинеарному распределению намагниченности в материале. Этим можно объяснить и немонокотное изменение намагниченности насыщения и остаточной индукции с увеличением содержанием иттрия, показанное в табл. 1. В заключение следует констатировать, что легирование иттрием (или его примесь в материале) является нежелательным, поскольку приводит к уменьшению величины коэрцитивной силы как по намагниченности, так и по индукции. При этом величина остаточной индукции практически не зависит от его содержания.

Список источников

1. Чиркин Д.С., Рословец П.В., Татаринов Ф.В., Новиков Л.З. Уменьшение дрейфа динамически настраиваемого гироскопа от запуска к запуску // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 1 (61). Ст. 08. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-01-1579.
2. Синюань Т., Подчезерцев В.П. Алгоритмы аттестации динамически настраиваемого гироскопа в условиях реальной ориентации относительно географической системы координат // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 10 (70). Ст. 14. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-10-1691.
3. Динамически настраиваемый гироскоп: пат. RU 2687169 С1; заявл. 17.04.18; опубл. 07.05.19.
4. 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. 2012. № 3. С. 43–47.

5. Пискорский В.П., Валеев Р.А., Королев Д.В., Моргунов Р.Б., Резчикова И.И. Влияние легирования тербием и гадолинием на термостабильность и магнитные свойства спеченных материалов Pr–Tb–Gd–Fe–Co–B // Труды ВИАМ. 2019. № 7 (79). Ст. 07. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 15.10.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-59-66.
6. Моргунов Р.Б., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Королев Д.В. Температурная стабильность редкоземельных магнитов, поддерживаемая с помощью магнитокалорического эффекта // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 1 (54). С. 88–94. DOI: 10.18577/2071-91-40-2019-0-1-88-94.
7. Мин П.Г., Вадеев В.Е., Пискорский В.П., Крамер В.В. Разработка технологии выплавки сплавов системы R3M–Fe–Co–B с высокой чистотой по примесям для термостабильных магнитов // Труды ВИАМ. 2016. № 1 (37). Ст. 01. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 15.10.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-3-9.
8. 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://journal.viam.ru> (дата обращения: 15.10.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-86-93.
9. Herbst J.F. R₂Fe₁₄B materials: intrinsic properties and technological properties and technological aspects // Reviews of Modern Physics. 1991. Vol. 63. No. 4. P. 819–898.
10. Мартыненко Ю.Г. Тенденции развития современной гироскопии // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 11. С. 120–127.
11. Блажнов Б., Несенюк Л., Пешехонов В., Старосельцев Л. Миниатюрные интегрированные системы // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2001. № 5. С. 56–59.
12. Королев М.Н. Исследование технических характеристик современных типов датчиков угловой скорости // Тезисы 12-й Междунар. науч.-техн. конф. «Приборостроение-2019». М., 2019. С. 21–23.
13. Голованов В.А. Гироскопическое ориентирование. СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт, 2004. 92 с.
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. Определение плотности тел гидростатическим взвешиванием: метод. рекомендации. Иркутск: Иркутск. гос. ун-т, 2003. С. 1–9.
16. 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.
17. 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.
18. Chen Du-Xing, Brug J.A., Goldfarb R.B. Demagnetizing factor for cylinder // IEEE Transactions on Magnetism. 1991. Vol. 27. No. 4. P. 3601–3619.
19. 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.
20. Périgo E.A., Takiishi H., Motta C.C., Faria R.N. On the squareness factor behavior of RE–FeB (RE = Nd or Pr) magnets above room temperature // IEEE Transactions on Magnetism. 2009. Vol. 45. No. 10. P. 4431–4434.
21. Angelo J.D., Motta C.C., Barbosa L.P. et al. The effect of niobium and boron content on magnetic properties and corrosion resistance of Pr–Fe–Co–B–Nb HD magnets // Material Science Forum. 2008. Vol. 591–593. P. 96–101.
22. Corfield M.R., Williams A.J., Harris I.R. The effects of long term 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.

23. Zhang Y., Ma T., Jin J. et al. Effect of REFe_2 on microstructure and magnetic properties of Nd–Ce–Fe–B sintered magnets // *Acta Materialia*. 2017. Vol. 128. P. 22–30.
24. 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 fields // *Journal de Physique*. 1985. Vol. 46. P. C6-301–C6-304.
25. Kakol Z., Kapusta C., Figiel H. The Nd contribution to the magnetocrystalline anisotropy of $(\text{Y}_{1-x}\text{Nd}_x)_2\text{Co}_{14}\text{B}$ compounds // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1988. Vol. 75. P. 141–148.

References

1. Chirkin D.S., Roslovets P.V., Tatarinov F.V., Novikov L.Z. Reducing the drift of a dynamically tuned gyroscope from run to run. *Engineering Journal: Science and Innovations*, 2017, no. 1 (61), art. 08. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-01-1579.
2. Xinyuan T., Podchezertsev V.P. Algorithms for certification of a dynamically tuned gyroscope in conditions of real orientation relative to the geographic coordinate system. *Engineering Journal: Science and Innovations*, 2017, no. 10 (70), art. 14. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-10-1691.
3. *Dynamically adjustable gyroscope*: pat. RU 2687169 C1; filed 17.04.18; publ. 07.05.19.
4. Kablov E.N., Piskorskiy V.P., Burkhanov G.S., Valeev R.A., Moiseyeva N.S., Stepanova S.V., Petrakov A.F., Tereshina I.S., Repina M.V. Thermostable ring magnets with radial texture based on Nd(Pr)–Dy–Fe–Co–B. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2012, no. 3, pp. 43–47
5. Piskorskiy V.P., Valeev R.A., Korolev D.V., Morgunov R.B., Rezhikova I.I. Terbium and gadolinium dopin g influence on thermal stability and magnetic properties of sintered magnets Pr–Tb–Gd–Fe–Co–B. *Trudy VIAM*, 2019, no. 7 (79), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 15, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-59-66.
6. Morgunov R.B., Piskorskiy V.P., Valeev R.A., Korolev D.V. The thermal stability of rare-earth magnets supported by means of the magnetocaloric effect. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 88–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-88-94.
7. Min P.G., Vadeev V.E., Piskorskiy V.P., Kramer V.V. Development of melting technology of high pure REM–Fe–Co–B alloys for temperature-stable magnets. *Trudy VIAM*, 2016, no. 1 (37), paper no. 1 Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 15, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-1-1.
8. Korolev D.V., Stolyankov Yu.V., Piskorskiy 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: October 15, 2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-86-93.
9. Herbst J.F. $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ materials: intrinsic properties and technological properties and technological aspects. *Reviews of Modern Physics*, 1991, vol. 63, no. 4, pp. 819–898.
10. Martynenko Yu.G. Trends in the development of modern gyroscopy. *Soros Educational Journal*, 1997, no. 11, pp. 120–127.
11. Blazhnov B., Nesenyuk L., Peshekhonov V., Staroseltsev L. Miniature integrated systems. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2001, no. 5, pp. 56–59.
12. Korolev M.N. Study of the technical characteristics of modern types of angular velocity sensors. *Abstracts of the 12th Intern. sci.-tech. conf. "Instrument making-2019"*. Moscow, 2019, pp. 21–23.
13. Golovanov V.A. *Gyroscopic orientation*. St. Petersburg: St. Petersburg State Mining Institute, 2004. 92 p.
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. *Determination of the density of bodies by hydrostatic weighing: recommendations*. Irkutsk: Irkutsk. state un-t, 2003, pp. 1–9.

16. Lapteva K.A., Tolmachev I.I. Calculation of the demagnetizing factor during longitudinal magnetization in magnetic particle flaw detection. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 321, no. 2, pp. 140–144.
17. 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.
18. Chen Du-Xing, Brug J.A., Goldfarb R.B. Demagnetizing factor for cylinder. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1991, vol. 27, no. 4, pp. 3601–3619.
19. 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.
20. Périgo E.A., Takiishi H., Motta C.C., Faria R.N. On the squareness factor behavior of RE–FeB (RE = Nd or Pr) magnets above room temperature. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, vol. 45, no. 10, pp. 4431–4434.
21. Angelo J.D., Motta C.C., Barbosa L.P. et al. The effect of niobium and boron content on magnetic properties and corrosion resistance of Pr–Fe–Co–B–Nb HD magnets. *Material Science Forum*, 2008, vol. 591–593, pp. 96–101.
22. Corfield M.R., Williams A.J., Harris I.R. The effects of long term 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.
23. Zhang Y., Ma T., Jin J. et al. Effect of REFe₂ on microstructure and magnetic properties of Nd–Ce–Fe–B sintered magnets. *Acta Materialia*, 2017, vol. 128, pp. 22–30.
24. Sinnema S., Franse J.J.M., Radwanski R.J. et al. Magnetic measurements on R₂Fe₁₄B and R₂Co₁₄B compounds in high fields. *Journal de Physique*, 1985, vol. 46, pp. C6-301–C6-304.
25. Kakol Z., Kapusta C., Figiel H. The Nd contribution to the magnetocrystalline anisotropy of (Y_{1-x}Nd_x)₂Co₁₄B compounds. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1988, vol. 75, pp. 141–148.

Информация об авторах

Бузенков Александр Владимирович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Пискорский Вадим Петрович, заместитель начальника лаборатории, д.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

Information about the authors

Alexander V. Buzenkov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Vadim P. Piskorsky, Deputy Head of Laboratory, Doctor 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

Статья поступила в редакцию 08.12.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 17.12.2021.

The article was submitted 08.12.2021; approved and accepted for publication after reviewing 17.12.2021.