

Научная статья

УДК 539.231:669.859:537.622

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-91-100

**СВОЙСТВА СПЕЧЕННЫХ МАГНИТОВ Pr–Dy–Fe–Co–B
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ***А.В. Бузенков¹, М.В. Бурканов¹, Р.А. Валеев¹, В.П. Пискорский¹*

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

Аннотация. Исследованы магнитотвердые материалы $(Pr_{1-x}Dy_x)_{13,12-13,3}(Fe_{1-y}Co_y)_{76,29-78,98}B_{7,86-10,5}$ ($x=0,40-0,58$, $y=0,20-0,24$) для навигационных приборов в зависимости от состава и температуры спекания. Измерения проводили на вибрационном магнитометре на образцах в форме сферы при температуре 20 ± 5 °С в магнитных полях до 1800 кА/м. Измерены кривые размагничивания спеченных материалов по намагниченности и индукции с различным содержанием кобальта и диспрозия. Особое внимание обращается на величину прямоугольности кривой размагничивания в зависимости от состава и температуры спекания.

Ключевые слова: магнитотвердые материалы, навигационные приборы, температура спекания, прямоугольность кривой размагничивания, коэрцитивная сила, остаточная индукция, химический состав

Для цитирования: Бузенков А.В., Бурканов М.В., Валеев Р.А., Пискорский В.П. Свойства спеченных магнитов Pr–Dy–Fe–Co–B в зависимости от состава и технологических параметров изготовления // Труды ВИАМ. 2024. № 5 (135). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-91-100.

Scientific article

**PROPERTIES OF SINTERED MAGNETS Pr–Dy–Fe–Co–B
DEPENDING ON THE COMPOSITION AND TECHNOLOGICAL
PARAMETERS OF MANUFACTURE***A.V. Buzenkov¹, M.V. Burkanov¹, R.A. Valeev¹, 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. Magnetic hard materials $(Pr_{1-x}Dy_x)_{13,12-13,3}(Fe_{1-y}Co_y)_{76,29-78,98}B_{7,86-10,5}$ ($x=0,40-0,58$, $y=0,20-0,24$) for navigation devices are investigated depending on the composition and temperature of sintering. Measurements were carried out on a vibrating magnetometer on spherical samples at a temperature of 20 ± 5 °С in magnetic fields up to 1800 kA/m. The demagnetization curves of sintered materials were measured by magnetization and induction with different cobalt and dysprosium contents. Special attention is paid to the rectangularity of the demagnetization curve depending on the composition and temperature of sintering.

Keywords: magnetic hard materials, navigation devices, sintering temperature, rectangularity of demagnetization curve, coercive force, residual induction, chemical composition

For citation: Buzenkov A.V., Burkanov M.V., Valeev R.A., Piskorsky V.P. Properties of sintered magnets Pr–Dy–Fe–Co–B depending on the composition and technological parameters of manufacture. *Trudy VIAM*, 2024, no. 5 (135), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-91-100.

Введение

Роторный вибрационный динамически настраиваемый гироскоп – наиболее перспективный тип гироскопов, применяемый в современных инерциальных навигационных системах. Скорость вращения его ротора может достигать 60 тыс. об/мин, а точность находится в пределах 10^{-2} – 10 градусов/ч [1]. При изменении конструкции гироскопов путем замены шариковых подшипников на воздушную «подушку» для уменьшения трения при вращении ротора гироскопа удалось уменьшить значение износа конструкции опор, а также позволило на порядок продлить ресурс прибора и увеличить его точность до 10^{-4} – 10^{-2} градусов/ч [1]. Одной из разновидностей роторных гироскопов является поплавковый гироскоп, отличительной особенностью которого является подвешивание всех подвижных элементов в жидкости, благодаря чему удается уравновесить ротор с кожухом гидростатическими силами и тем самым разгрузить подшипники. Данная модификация дает возможность значительно снизить сухое трение в осях подвеса и увеличить как ударную, так и вибрационную стойкость изделия. Скорость вращения ротора на воздушной «подушке» в аэродинамических подшипниках внутри поплавка составляет 30–60 тыс. об/мин [1]. Обладая этим преимуществом, данный тип гироскопов позволил достичь сверхвысокой точности $\sim(10^{-6}$ – $5 \cdot 10^{-4})$ градусов/ч [1]. Частота вращения ротора двигателя гироскопа при этом составила 500 Гц, т. е. 500 об/с или 30 тыс. об/мин [2]. По данным работы [3], ротор гироскопа марки ДНГ-091 имеет аналогичную скорость вращения: 30 тыс. об/мин, а его масса составляет 125 г. Габариты этого гироскопа 32×37 мм и измерение угловых скоростей в диапазоне 10 градусов/ч, ресурс 140 тыс. ч при времени готовности 8 с. В настоящее время по совокупности факторов доминирующим типом являются волновые оптические гироскопы, на которых построены навигационные приборы для использования в авиационной, морской, космической и наземных отраслях промышленности. В этом классе гироскопов освоен диапазон точности 10^{-1} – 10^{-3} градусов/ч и завершаются работы по созданию класса точности 10^{-4} градусов/ч [4]. В диапазоне средней и высокой точности активно ведутся разработки по созданию гироскопа, основанного на ядерном магнитном резонансе, безусловным преимуществом которого является устойчивость к механическим воздействиям. Работы по его созданию начались еще в 60–70-х гг. прошлого века, когда в разных странах параллельно велись активные исследования по созданию альтернативы механическим гироскопам с классом точности, необходимым для навигации. В конце 1970-х гг. основное внимание уделялось разработке оптических гироскопов, таких как кольцевой лазерный гироскоп, а впоследствии и его усовершенствованной модели – волоконно-оптическому гироскопу, которые представляли собой базис для навигационных систем инерциального типа разнообразных динамически активных объектов. В 2000-х гг. стремительно возрос интерес к ядерным магнитным гироскопам (ЯМГ), что было связано с острой необходимостью создания миниатюрных гироскопов навигационного класса точности и разработкой новых технологий, обеспечивающих возможность их миниатюризации. Преимущество для их внедрения на подвижные платформы – потенциальная стойкость к ускорениям и вибрациям. Объяснить это можно тем, что частота прецессии спина ядра не зависит от движения тела, где этот спин находится, а вращение ячейки, содержащей атомы, не приводит к изменению скорости их прецессии в инерциальной системе координат [5]. Чувствительности с величиной 10^{-19} Тл невозможно достичь, используя наиболее популярные в настоящее время типы магнитометров, а следовательно, в качестве рабочего вещества в гироскопе с эффектом магнитного резонанса допускается применение только ядерных парамагнетиков, характеризующихся продолжительным временем релаксации из-за более слабого взаимодействия ядерных моментов с кристаллической решеткой тела, где эти моменты расположены [6]. Принцип работы ЯМР-гироскопа состоит в следующем: в постоянном магнитном поле происходит прецессия вектора намагниченности рабочего вещества

(аналогично вектору суммарного механического момента) с частотой Лармора, которая находится при известном гиромагнитном отношении ядер атомов вещества. Частота прецессии будет смещаться вследствие вращения данной системы вокруг направления магнитного поля, причем изменение по модулю будет равно величине угловой скорости вращения. Соответственно, измеряя фазочастотные характеристики прецессии, можно определить угловую скорость и далее угол поворота всей системы. В 1971–1979 гг. в МЭНИИ были спроектированы действующие макеты ЯМГ с отклонением нуля от 1 до 0,1 градусов/ч при исследовании в интервале времени не более 24 ч. В качестве рабочего вещества использовали изотопы ртути Hg^{199} и Hg^{201} . Существуют две основные схемы конструирования датчиков угловой скорости вращения и угла поворота: одно- и двухлучевая, точность в обоих случаях составляет $\sim 0,001$ градуса/ч [7]. Более подробно принцип действия гироскопов данного типа изложен в обзоре [8]. Следует упомянуть и о совершенно новом, интенсивно развивающемся виде, а именно квантовой гироскопии. Данный термин наиболее часто употребляется при описании исследований в области квантовой электроники, основная задача которой состоит в конструировании прибора, действие которого будет основано на гироскопических свойствах частиц, являющихся базисом для проектирования рабочих тел его датчика. В данном случае спиновые и орбитальные моменты ядер атомов или других фундаментальных частиц будут обуславливать итоговые параметры изделия. Работоспособность гироскопа обеспечивается только в том случае, когда механические моменты частиц равно ориентированы в определенном направлении. Отличительной особенностью конструкции квантовых гироскопов относительно традиционных механических является необходимость присутствия вращающегося или периодическидвигающегося вблизи точки равновесия тела [8]. Поскольку измерение требуемой величины производится косвенно, фиксируемыми величинами в данном случае будут являться, например, параметры характеристического излучения, возникающего из-за переходов электронов между энергетическими подуровнями. Соответственно, движение приборов по окружности будет вызывать смещение или в некоторых случаях расщепление энергетических подуровней системы, исходя из чего можно сделать выводы об изменении величины вращения и ее динамических параметров [8]. Существующие приборы квантовой гироскопии можно разделить на две группы: ориентирующиеся по силовым линиям геомагнитного или межпланетного магнитного поля и ориентирующиеся относительно инерциальной системы координат [8]. Наиболее перспективными для навигации являются приборы второго типа, которые получили название квантовых инерциальных гироскопов. Приборы второго типа разрабатывались активнее и вызвали наибольший интерес ввиду того, что применение, например, кольцевых квантовых генераторов в оптическом диапазоне должно открыть перспективные возможности создания чувствительных к вращению устройств. Их преимущество заключается в том, что течение времени по релятивистским законам в поле инерциальных ускорений выявляется намного проще, нежели в классических приборах. В сверхпроводящих интерферометрах, основная функция которых заключается в тончайшей регистрации малейших вращений, неизменно будут присутствовать интерференционные биения волновых функций электронов [8]. Следует отметить, что, несмотря на все вышеперечисленные преимущества, квантовые гироскопы известных в настоящее время типов в действительности не превосходят по чувствительности самые передовые модели механических гироскопов. При попытке вывести их чувствительность на новый уровень встретились непреодолимые для текущего уровня прогресса преграды. Позднее, после проведения более детальных исследований возникновения ядерного магнитного резонанса, был сделан вывод о том, что уравнения движения результирующего вектора однородной ядерной намагниченности M в магнитном поле H аналогичны уравнениям движения симметричного волчка. Было рассмотрено также движение механического гироскопа под действием зависящего от

времени вращающего момента и показана аналогия с движением ядерного магнитного момента. Это послужило основанием для того, чтобы появилась вероятность использования ядерных магнитных моментов для создания гироскопов нового типа. Наряду с динамическими гироскопами, в которых используется ядерная прецессия, предложен гироскоп, работающий по методу ядерной индукции. В работе [8] предлагается помещать образец в постоянное магнитное поле H_0 и параллельное ему переменное магнитное поле с амплитудой $H_1 > H_0$, частота которого близка к частоте прецессии γH_0 , где γ – гиромагнитное отношение. Такое поле в отсутствие вращения не вызывает прецессии ядерных моментов. Вращение устройства вокруг оси, перпендикулярной магнитному полю, эквивалентно действию слабого поперечного магнитного поля, в результате чего суммарное постоянное поле оказывается отклоненным от направления переменного поля, поперечная составляющая которого вызывает прецессию. Вращение устройства вокруг оси, перпендикулярной магнитному полю, вызывает в приемной катушке, расположенной вдоль этого поля, электродвижущую силу ядерной индукции. По данным работы [8], изменение поля на 10^{-7} Э эквивалентно вращению прибора с угловой скоростью 1 Гц, из чего следует необходимость высокой магнитной экранировки или полного магнитного вакуума. Таким образом, использование кольцевого сверхпроводящего интерферометра-резонатора позволит повысить чувствительность прибора в 10^3 раз относительно чувствительности оптического гироскопа [8]. Важнейшим элементом конструкции динамически настраиваемого гироскопа является кольцевой магнит с радиальной текстурой [9]. Итоговая характеристика спеченного магнита в большей степени зависит от технологических параметров, сопутствующих его изготовлению (температура спекания, режим термической обработки и др.) [10, 11]. Формирование опережающего научно-технического задела и реализация итоговой технической системы, основным функциональным элементом которой в данном случае является спеченный магнит, допустимы не в последнюю очередь благодаря неразрывно связанным между собой фундаментальным и поисковым исследованиям [12]. Именно поэтому возникла необходимость в проведении исследования зависимости свойств магнитов от температуры спекания, результаты которого изложены в данной работе.

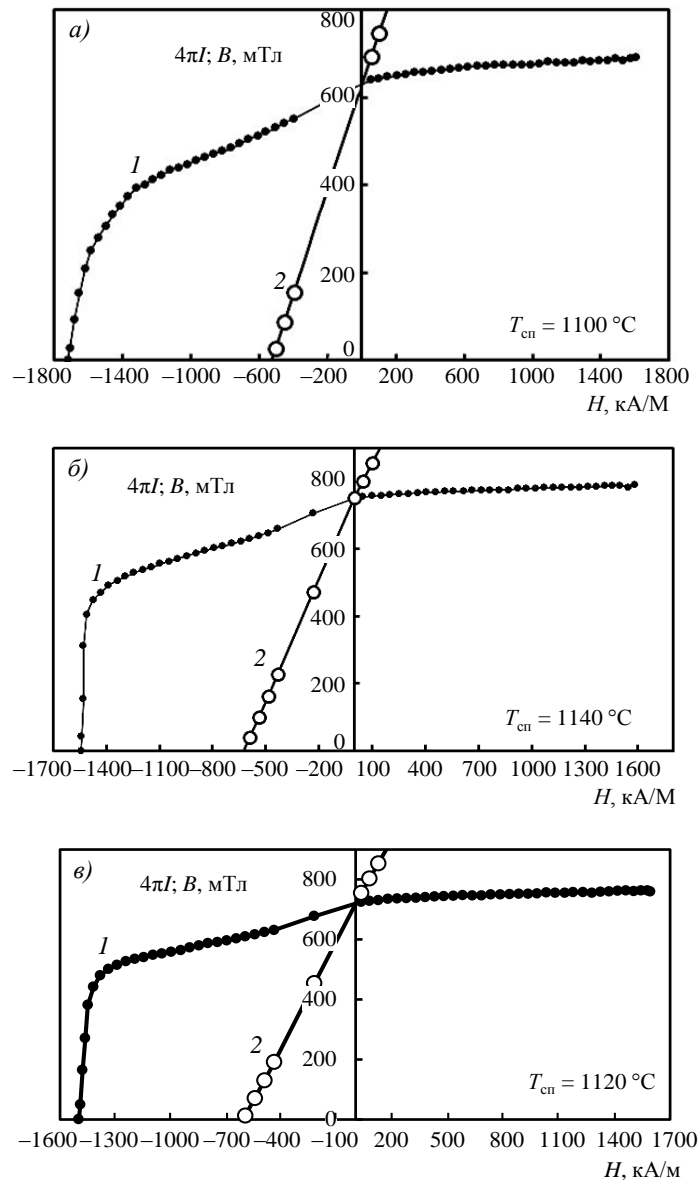
Материалы и методы

Выплавку слитков производили в вакуумной индукционной печи ВИАМ-2002 с использованием шихтовых материалов на основе празеодима ПрМ-1 (ТУ 48-4-215–72), металлического диспрозия марки ДиМ-1 (ТУ 48-4-214–72), кобальта К0 (ГОСТ 123–2008) и железа АРМКО типа 1 (ТС008789-176–2009). На набивной тигель для плавки наносили жаростойкое покрытие из инертной керамики на основе оксида циркония, предварительно стабилизированного оксидом иттрия. Бор вводится в плавку в виде лигатуры ферробора состава $Fe_{88,7}B_{11,3}$ (состав – в % (по массе)). При выплавке сплавов в вакуумной индукционной печи в качестве защитной атмосферы использовали инертный газ аргон. Дробление слитка до порошка фракцией не более 630 мкм в атмосфере аргона (ГОСТ 10157–79) проводили в конусной инерционной дробилке КИД-100. Для тонкого помола длительностью 25 мин применяли мельницу центробежно-планетарного типа модели САНД-1. Для предотвращения окисления использовали жидкость для помола с формулой $C_2F_3Cl_3$ и температурой кипения 47,5 °С. Призматические заготовки магнитов получали прессованием на гидравлическом прессе в магнитном поле напряженностью 800 кА/м, ориентированном перпендикулярно вектору приложения нагрузки. Спекание заготовок проводили в вакуумной печи СНВЭ 1.3.1/16 ИЗ при температурах 1100–1140 °С в течение 1 ч в вакууме (10^{-5} мм рт. ст.). Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания»

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Далее спеченные магниты использовали для изготовления образцов сферической формы с диаметром 2–3 мм. Плотность определяли методом гидростатического взвешивания в дистиллированной воде и на воздухе по ГОСТ 25281–82. Измерения проводили на вибрационном магнитометре типа «Меридиан» по методике, предложенной и впервые описанной в работе [13]. Шарообразная форма образцов обусловлена равномерным распределением размагничивающего поля по объему и изотропией во всех точках шара [14]. Кроме того, размагничивающий фактор шара известен точно и равняется $1/3$ в системе СИ [14].

Результаты и обсуждение

Типичные кривые размагничивания по намагниченности и индукции, исследованные при температуре 20 ± 5 °С, представлены на рисунке.



Кривые размагничивания по намагниченности $4\pi I$ (1) и по индукции B (2) спеченных при различных температурах ($T_{\text{сп}}$) магнитотвердых материалов: $(\text{Pr}_{0,53}\text{Dy}_{0,47})_{13,2}(\text{Fe}_{0,76}\text{Co}_{0,24})_{76,29}\text{B}_{10,5}$ (a), $(\text{Pr}_{0,53}\text{Dy}_{0,47})_{13,37}(\text{Fe}_{0,80}\text{Co}_{0,20})_{78,64}\text{B}_{7,99}$ (б) и $(\text{Pr}_{0,53}\text{Dy}_{0,47})_{13,28}(\text{Fe}_{0,77}\text{Co}_{0,23})_{78,86}\text{B}_{7,86}$ (в)

Результаты измерений представлены в таблице. Коэффициент прямоугольности определяли в соответствии с формулой

$$SF = H_k/H_{ci},$$

где H_k – поле «колена» (поле, при котором величина намагниченности составляет 90 % от остаточной индукции B_R); H_{ci} – коэрцитивная сила по намагниченности.

Свойства исследованных материалов при температуре 20±5 °С

Состав материала в атомных долях	Температура спекания, °С	ρ , кг/м ³	H_{ci}	H_{cb}	H_k	$4\pi I_s$	B_R	SF
			кА/м			мТл		
(Pr _{0,53} Dy _{0,47}) _{13,2} (Fe _{0,76} Co _{0,24}) _{76,29} B _{10,5}	1100	7680	1717	502	395	700	620	0,23
(Pr _{0,53} Dy _{0,47}) _{13,37} (Fe _{0,80} Co _{0,20}) _{78,64} B _{7,99}	1140	7680	1543	640	433	800	760	0,28
(Pr _{0,53} Dy _{0,47}) _{13,28} (Fe _{0,77} Co _{0,23}) _{78,86} B _{7,86}	1120	7720	1497	597	440	763	720	0,29
(Pr _{0,55} Dy _{0,45}) _{13,12} (Fe _{0,76} Co _{0,24}) _{78,98} B _{7,9}	1130	7790	1115	606	456	800	760	0,41
(Pr _{0,60} Dy _{0,40}) _{13,17} (Fe _{0,76} Co _{0,24}) _{78,93} B _{7,9}	1130	7760	1319	615	468	761	720	0,35
(Pr _{0,55} Dy _{0,45}) _{13,12} (Fe _{0,76} Co _{0,24}) _{78,98} B _{7,9}	1130	7790	1561	642	436	715	680	0,28
(Pr _{0,42} Dy _{0,58}) _{13,17} (Fe _{0,76} Co _{0,24}) _{78,90} B _{7,93}	1130	7790	1681	593	500	720	680	0,30

Примечание. ρ – плотность; H_{ci} – коэрцитивная сила по намагниченности; H_{cb} – коэрцитивная сила по индукции; H_k – поле «колена»; $4\pi I_s$ – намагниченность насыщения; B_R – остаточная индукция; SF – коэффициент прямоугольности кривой размагничивания.

Из данных таблицы видно, что оптимальной температурой спекания является температура 1130 °С. Потому что при этой температуре получены максимальная величина остаточной индукции (B_R) и коэффициента прямоугольности (SF) материалов. При снижении температуры спекания возрастает величина коэрцитивной силы по намагниченности (H_{ci}), но снижается величина SF. При повышении температуры спекания до 1140 °С возрастают величины H_{ci} и коэрцитивной силы по индукции (H_{cb}), но уменьшается величина прямоугольности кривой размагничивания. Следует отметить, что в этом случае измерения сделаны на материалах с повышенным содержанием диспрозия и пониженным содержанием кобальта (см. таблицу).

В работах [15, 16] приведены значения величин температурного коэффициента индукции (ТКИ) для спеченных материалов системы (Pr_{1-x}Dy_x)-(Fe_{1-y}Co_y)-В. Когда величина $x = 0,45$, а $y = 0,24$, значение ТКИ = -0,02÷-0,03 %/°С в диапазоне температур 20–100 °С. Для снижения этой величины (по абсолютному значению) необходимо повышать содержание диспрозия и кобальта [17]. При этом немаловажным фактом является то, что величина температурного коэффициента индукции далеко не всегда удовлетворительно описывает температурные свойства магнитов. Объяснение этому факту заключается в форме температурной зависимости намагниченности, на кривой которой присутствует точка экстремума [18–23]. В этом случае необходимо использовать характеристики, учитывающие форму температурной зависимости кривой намагниченности, а не простейшее описание с помощью величины ТКИ, которая подходит для оценки материала, имеющего высокую температуру Кюри, а в интервале температур от -50 до +100 °С его намагниченность изменяется достаточно близко к линейному закону. Это материалы типа Fe-Cr-Co либо марки ЮНДК [24, 25]. Максимальное значение величины коэрцитивной силы, полученной на монокристаллах магнитов марки ЮНДК, составляет 145–160 кА/м, а на монокристаллах магнитов из материала Fe-Cr-Co составляет 65–70 кА/м. Это слишком низкая величина, поэтому данные материалы не подходят для изготовления кольцевых магнитов с радиальной текстурой, поскольку в магнитах для гироскопов (а это кольцевые магниты с радиальной текстурой) высокое значение величины размагничивающего поля магнита больше, чем величина коэрцитивной силы этих материалов [26–31].

Заключения

Исследованы спеченные магнитотвердые материалы системы Pr–Dy–Fe–Co–B. Найдена оптимальная температура спекания заготовок магнитов, равная 1130 °С. Выявлена корреляция между увеличением или уменьшением этой температуры и ухудшением магнитных характеристик материала.

Для использования этих материалов в динамически настраиваемых гироскопах следует увеличить содержание кобальта, поскольку в этом случае повысится их температурная стабильность.

Список источников

1. Мартыненко Ю.Г. Тенденции развития современной гироскопии // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 11. С. 120–127.
2. Чиркин Д.С., Рословец П.В., Татарин Ф.В., Новиков Л.З. Уменьшение дрейфа динамически настраиваемого гироскопа от запуска к запуску // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 1. С. 1–12. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-01-1579.
3. Топильская С.В., Бородулин Д.С., Корнюхин А.В. Экспериментальная оценка допустимых механических воздействий на динамически настраиваемый гироскоп // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. 2018. № 4. С. 69–79. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-4-69-79.
4. Пешехонов В.Г. Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. № 2. С. 3–10. DOI: 10.1785/0869-7035-0028.
5. Вершовский А.К., Литманович Ю.А., Пазгалев А.С., Пешехонов В.Г. Гироскоп на ядерном магнитном резонансе // Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26. № 1. С. 55–80. DOI: 10.17285/0869-7035.2018.26.1.055-080.
6. Умарходжаев Р.М., Павлов Ю.В., Васильева А.Н. История разработки гироскопа на основе ядерного магнитного резонанса в России в 1960–2000 годы // Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26. № 1. С. 3–27. DOI: 10.17285/0869-7035.2018.26.1.003-027.
7. Королев М.Н. Исследование технических характеристик современных типов датчиков угловой скорости // Тез. 12-й Междунар. науч.-техн. конф. «Приборостроение-2019». М., 2019. С. 21–23.
8. Померанцев Н.М., Скродцкий Г.В. Физические основы квантовой гироскопии // Успехи физических наук. 1970. Т. 100. Вып. 3. С. 361–394.
9. Попов А.Г., Майков В.Г. Постоянные магниты с радиальной текстурой из сплавов на основе редкоземельных металлов // Сб. тр. симпозиума «Исследование проблем создания магнитных систем новых электрических машин и применения в них высокоэнергетических магнитотвердых материалов с целью совершенствования параметров и конструкций». М., 1991. С. 147–157.
10. Пискорский В.П., Валеев Р.Б., Королев Д.В., Столянков Ю.В., Моргунов Р.Б. Технологии магнитооптической записи информации на тонких пленках редкоземельных магнитомягких сплавов. Часть II. Сверхбыстрое полностью оптическое переключение намагниченности // Труды ВИАМ. 2020. № 2 (86). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.01.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-10-21.
11. Wang Y., Yu B., Feng M. et al. Magnetic properties of Nd–Fe–Co–B permanent magnetic alloys // Journal of Applied Physics. 1987. Vol. 61. P. 3448–3450.
12. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
13. Foner S. Versatile and sensitive vibrating-sample magnetometer // The review of scientific instruments. 1959. Vol. 30. No. 7. P. 548–557.
14. 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.

15. 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: 26.01.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-66-75.
16. 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.
17. 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.
18. Morgunov R., Lu Y., Lavanant M. et al. Magnetic aftereffects in CoFeB/Ta/CoFeB spin valves of large area // Physical Review B. 2017. Vol. 96. P. 054421. DOI: 10.1103/PhysRevB.96.054421.
19. 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: 26.01.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-108-117.
20. Pedziwiatr A.T., Chen H.Y., Wallace W.E. Magnetism of the Tb_zFe_{14-x}Co_xB system // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1987. Vol. 67. P. 311–315.
21. Fujii H., Wallace W.E., Boltich E.B. Concerning magnetic characteristics of (R_{2-x}R^{*}_x)Fe₁₂Co₂B (R=Pr and Nd, R^{*}=Tb and Dy) // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1986. Vol. 61. P. 251–256.
22. Givord D., Li H.S., Cadogan J.M. et al. Analysis of high-field magnetization measurements on R₂Fe₁₄B single crystals (R=Tb, Dy, Ho, Er and Tm) // Journal of Applied Physics. 1988. Vol. 63. P. 3713–3715.
23. Pedziwiatr A.T., Wallace W.E. Spin reorientations in R₂Fe_{14-x}Co_xB systems (R=Pr, Nd and Er) // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1987. Vol. 65. P. 139–144.
24. Akbar S., Ahmad Z., Awan M.S. et al. Development of Fe–Cr–Co permanent magnets by single step thermomagnetic treatment // Key Engineering Materials. 2012. Vol. 510–511. P. 507–512.
25. Сергеев В.В., Булыгина Т.И. Магнитотвердые материалы. М.: Энергия, 1980. 224 с.
26. Haavisto M., Tuominen S., Santa-Nokki T. et al. Magnetic behavior of sintered NdFeB magnets on a long-term timescale // Advances in Materials Science and Engineering. 2014. Vol. 2024. Art. ID 760584. DOI: 10.1155/2014/760584.
27. Rakotoarison H.R., Yonnet J.P., Delinchant B. Using coulombian approach for modeling scalar potential and magnetic field of a permanent magnet with radial polarization // IEEE Transactions on Magnetics. 2007. Vol. 43. No. 4. P. 1261–1264.
28. Tian J., Pan D., Zhou H. et al. Radial cracks and fracture mechanism of radially oriented ring 2:17 type SmCo magnets // Journal of Alloys and Compounds. 2009. Vol. 476. P. 98–101.
29. Ido H., Wallace W.E., Suzuki T. et al. Magnetic and crystallographic properties of NdCo₄M (M=B, Al, and Ga) // Journal of Applied Physics. 1990. Vol. 67. P. 4635–4637.
30. Hasaka M., Nakashima H., Oki K. Crystal structures of the RCo₅ and R₂Co₁₇ types observed in polystyrene latexes // Transactions of the Japan Institute of Metals. 1984. Vol. 25. No. 2. P. 73–79.
31. Liu J., Corte-Real M., George C. et al. Magnetic hardening studies in sintered Sm(Co, Cu, Fe, Zr)_z 2:17 high temperature magnets // Journal of Applied Physics. 2000. Vol. 87. No. 9. P. 6722–6724.

References

1. Martynenko Yu.G. Trends in the development of modern gyroscopy. *Sorosovskiy obrazovatelny zhurnal*, 1997, no. 11, pp. 120–127.
2. Chirkin D.S., Roslovets P.V., Tatarinov F.V., Novikov L.Z. Reducing the drift of a dynamically tuned gyroscope from launch to launch. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii*, 2017, no. 1, pp. 1–12. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-01-1579.
3. Topilskaya S.V., Borodulin D.S., Korniyukhin A.V. Experimental assessment of permissible mechanical influences on a dynamically adjustable gyroscope. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser.: Priborostroenie*, 2018, no. 4, pp. 69–79. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-4-69-79.
4. Peshekhonov V.G. Prospects for the development of gyroscopy. *Giroskopiya i navigatsiya*, 2020, vol. 28, no. 2, pp. 3–10. DOI: 10.1785/0869-7035-0028.

5. Vershovskiy A.K., Litmanovich Yu.A., Pazgalev A.S., Peshekhonov V.G. Nuclear magnetic resonance gyroscope. *Giroskopiya i navigatsiya*, 2018, vol. 26, no. 1, pp. 55–80. DOI: 10.17285/0869-7035.2018.26.1.055-080.
6. Umarkhodzhaev R.M., Pavlov Yu.V., Vasilyeva A.N. History of the development of a gyroscope based on nuclear magnetic resonance in Russia in 1960–2000. *Giroskopiya i navigatsiya*, 2018, vol. 26, no. 1, pp. 3–27. DOI: 10.17285/0869-7035.2018.26.1.003-027.
7. Korolev M.N. Research of technical characteristics of modern types of angular velocity sensors. *Proc. 12th Int. scientific-technical conf. «Instrument Engineering-2019»*. Moscow, 2019, pp. 21–23.
8. Pomerantsev N.M., Skrotsky G.V. Physical foundations of quantum gyroscopy. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1970, vol. 100, is. 3, pp. 361–394.
9. Popov A.G., Maikov V.G. Permanent magnets with radial texture from alloys based on rare earth metals. *Symposium «Study of the problems of creating magnetic systems of new electric machines and the use of high-energy hard magnetic materials in them in order to improve parameters and designs»*. Moscow, 1991, pp. 147–157.
10. Piskorskiy V.P., Valeev R.A., Korolev D.V., Stolyankov Yu.V., Morgunov R.B. Technologies of magneto-optical information recording in thin films of rare-earth magnetically soft alloys. Part II. Ultrafast all optical switching of magnetization. *Trudy VIAM*, 2020, no. 2 (86), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 26, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-10-21.
11. Wang Y., Yu B., Feng M. et al. Magnetic properties of Nd–Fe–Co–B permanent magnetic alloys. *Journal of Applied Physics*, 1987, vol. 61, pp. 3448–3450.
12. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
13. Foner S. Versatile and sensitive vibrating-sample magnetometer. *The review of scientific instruments*, 1959, vol. 30, no. 7, pp. 548–557.
14. 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.
15. Valeev R.A., Korolev D.V., Morgunov R.B., Piskorskiy 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: January 26, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-66-75.
16. 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.
17. Herbst J.F. R₂Fe₁₄B materials: intrinsic properties and technological properties and technological aspects. *Reviews of Modern Physics*, 1991, vol. 63 no. 4, pp. 819–898.
18. Morgunov R., Lu Y., Lavanant M. et al. Magnetic aftereffects in CoFeB/Ta/CoFeB spin valves of large area. *Physical review B*, 2017, vol. 96, p. 054421. DOI: 10.1103/PhysRevB.96.054421.
19. Buzenkov A.V., Valeev R.A., Piskorskiy 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: January 26, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-108-117.
20. Pedziwiatr A.T., Chen H.Y., Wallace W.E. Magnetism of the Tb_zFe_{14-x}Co_xB system. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1987, vol. 67, pp. 311–315.
21. Fujii H., Wallace W.E., Boltich E.B. Concerning magnetic characteristics of (R_{2-x}R^{*})Fe₁₂Co₂B (R=Pr and Nd, R^{*}=Tb and Dy). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1986, vol. 61, pp. 251–256.
22. Givord D., Li H.S., Cadogan J.M. et al. Analysis of high-field magnetization measurements on R₂Fe₁₄B single crystals (R=Tb, Dy, Ho, Er and Tm). *Journal of Applied Physics*, 1988, vol. 63, pp. 3713–3715.

23. Pedziviatri A.T., Wallace W.E. Spin reorientations in $R_2Fe_{14-x}Co_xB$ systems (R=Pr, Nd and Er). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1987, vol. 65, pp. 139–144.
24. Akbar S., Ahmad Z., Awan M.S. et al. Development of Fe–Cr–Co permanent magnets by single step thermomagnetic treatment. *Key Engineering Materials*, 2012, vol. 510–511, pp. 507–512.
25. Sergeev V.V., Bulygina T.I. *Hard magnetic materials*. Moscow: Energiya, 1980, 224 p.
26. Haavisto M., Tuominen S., Santa-Nokki T. et al. Magnetic behavior of sintered NdFeB magnets on a long-term timescale. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 2024, art. ID 760584. DOI: 10.1155/2014/760584.
27. Rakotoarison H.R., Yonnet J.P., Delinchant B. Using coulombian approach for modeling scalar potential and magnetic field of a permanent magnet with radial polarization. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, vol. 43, no. 4, pp. 1261–1264.
28. Tian J., Pan D., Zhou H. et al. Radial cracks and fracture mechanism of radially oriented ring 2:17 type SmCo magnets. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, vol. 476, pp. 98–101.
29. Ido H., Wallace W.E., Suzuki T. et al. Magnetic and crystallographic properties of $NdCo_4M$ (M=B, Al, and Ga). *Journal of Applied Physics*, 1990, vol. 67, pp. 4635–4637.
30. Hasaka M., Nakashima H., Oki K. Crystal structures of the RCO_5 and R_2Co_{17} types observed in polystyrene latexes. *Transactions of the Japan Institute of Metals*, 1984, vol. 25, no. 2, pp. 73–79.
31. Liu J., Corte-Real M., George C. et al. Magnetic hardening studies in sintered $Sm(Co, Cu, Fe, Zr)_z$ 2:17 high temperature magnets. *Journal of Applied Physics*, 2000, vol. 87, no. 9, pp. 6722–6724.

Информация об авторах

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

Бурканов Максим Владимирович, инженер 2 категории, 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, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Alexander V. Buzenkov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maxim V. Burkanov, Second Category 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, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 22.02.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 20.03.2024.

The article was submitted 22.02.2024; approved and accepted for publication after reviewing 20.03.2024.