

Научная статья

УДК 669.859:537.622

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-63-73

МАГНИТЫ С ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТЬЮ ДЛЯ НАВИГАЦИИ

М.В. Потапов¹, А.В. Бузенков¹, 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 материалы систем Fe–Ni–Al–Co и Pr–Nd–Dy–Fe–Co–B. Проведены спекание и последующая термическая обработка в виде высокотемпературного отжига, охлаждения в магнитном поле и ступенчатого отжига. Исследовано влияние термической обработки на магнитные свойства образцов. Определена величина температурного коэффициента индукции. Показано, что данные спеченные материалы по этой величине аналогичны магнитам ЮНДК. Выявлено отрицательное влияние примеси неодима на термостабильность материала. Для повышения температурной стабильности необходимо повысить содержание кобальта.

Ключевые слова: постоянные магниты, редкоземельные магниты, намагниченность насыщения, остаточная индукция, коэрцитивная сила, коэффициент прямоугольности кривой размагничивания, температурный коэффициент индукции, температурный коэффициент коэрцитивной силы

Для цитирования: Потапов М.В., Бузенков А.В., Моргунов Р.Б., Пискорский В.П. Магниты с высокой температурной стабильностью для навигации // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-63-73.

Scientific article

MAGNETS WITH HIGH TEMPERATURE STABILITY FOR NAVIGATION

M.V. Potapov¹, A.V. Buzenkov¹, 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. Materials of Fe–Ni–Al–Co and Pr–Nd–Dy–Fe–Co–B systems were studied in the article. Sintering and further heat treatment in the form of high temperature annealing, cooling in a magnetic field, and a stepwise annealing were performed. The effect of heat treatment on the magnetic properties of the samples, as well as the temperature coefficient of induction were investigated. It is shown that these sintered materials are similar in magnitude to AlNiCo magnets. The negative effect of neodymium impurity on the thermal stability of the material has been revealed. In order to improve temperature stability, it is necessary to increase the cobalt content.

Keywords: permanent magnets, rare-earth magnets, saturation magnetization, residual induction, coercive force, squareness factor of demagnetization curves, temperature induction coefficient, temperature coefficient coercive force

For citation: Potapov M.V., Buzenkov A.V., Morgunov R.B., Piskorsky V.P. Magnets with high temperature stability for navigation. *Trudy VIAM*, 2025, no. 12 (154), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-63-73.

Введение

Магниты из сплавов системы ЮНДК заслуживают внимания ввиду их обширного использования в самых различных областях промышленности, например в авиационном двигателестроении. Это обусловлено высокой рабочей температурой, которая в условиях эксплуатации может достигать ~600 °С [1]. В общем случае монокристаллические магниты марки ЮНДК25БА обладают следующими характеристиками: остаточная индукция (B_r) 1,2–1,3 Тл, коэрцитивная сила по индукции (H_{CB}) 56–68 кА/м, максимальная рабочая температура ~550 °С [2].

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ получен магнит состава (% (по массе)) $Al_{7,76}Ni_{13,35}Co_{24,30}Cu_{3,12}Nb_{0,52}S_{0,30}Fe_{ост}$ со следующими свойствами: $B_r = 1,36$ Тл, коэрцитивная сила по намагниченности (H_{cl}) 57,1 кА/м [1]. В работе [3] описано применение аддитивных технологий для получения магнита состава (% (по массе)) $Al_{7,6}Ni_{12,7}Co_{22,8}Cu_{2,7}Nb_{0,52}S_{0,30}Fe_{53,1}$ со следующими свойствами: $B_r = 1,54$ Тл, $H_{cl} = 17,6$ кА/м, $H_{CB} = 17,5$ кА/м. В работе [4] изучены свойства магнита состава (% (по массе)) $Al_{8,2}Ni_{14,0}Co_{24,3}Cu_{2,3}Nb_{1,0}Fe_{49,9}$ и получены следующие значения: $B_r = 1,35$ Тл, $H_{cl} = 59,2$ кА/м. В этой работе также приведен состав основной (α_1) и изолирующей (α_2) магнитных фаз в % (атомн.). Фаза α_1 имеет состав $Fe_{66,76}Co_{24,62}Ni_{3,1}Al_{4,87}Cu_{0,3}$, фаза α_2 – $Fe_{13,9}Co_{16,42}Ni_{30,47}Al_{34,5}Cu_{4,34}$.

В работе [5] приведены данные по величине температурного коэффициента индукции (ТКИ) материала состава $Fe_{32,2}Co_{36}Ni_{13,5}Al_{7,6}Ti_{6,2}Cu_{3,8}Zr_{0,5}B_{0,2}$. Получены значения ТКИ, %/К: –0,0386 – в диапазоне 300–400 К, –0,0348 – в диапазоне 300–600 К, –0,0331 – в диапазоне 300–800 К. В статье [6] использовали материал состава (% (по массе)) $Al_{6,8}Ni_{13,9}Co_{34,9}Cu_{3,3}Nb_{0,7}S_{0,4}Si_{0,2}Fe_{34,1}$, имеющий следующие свойства: $B_r = 1,08$ Тл, $H_{cl} = 126$ кА/м. В работе [7] исследовали материал состава $Al_{6,76}Ni_{12,12}Co_{35,35}Cu_{3,03}Nb_{0,90}Fe_{33,28}Ti_{6,56}Nd_{2,0}$, определены ТКИ и температурный коэффициент коэрцитивной силы (β) в различных температурных диапазонах (табл. 1).

Таблица 1

Температурный коэффициент индукции (ТКИ) и температурный коэффициент коэрцитивной силы (β) материала состава $Al_{6,76}Ni_{12,12}Co_{35,35}Cu_{3,03}Nb_{0,90}Fe_{33,28}Ti_{6,56}Nd_{2,0}$ в различных диапазонах температур [7]

Показатель	Значение показателя, %/К, в диапазоне температур, К						
	10–300	100–300	200–300	300–400	300–500	300–700	300–800
ТКИ	0,0437	0,0350	0,0686	–0,0238	–0,0373	–0,0298	–0,0355
β	0,0160	0,0006	0,0110	–0,0004	–0,0631	0,0392	–0,0495

Величины ТКИ и β вычисляли по формулам

$$ТКИ = \frac{B_r(T_1) - B_r(T_0)}{B_r(T_0)(T_1 - T_0)} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

$$\beta = \frac{H_{cl}(T_1) - H_{cl}(T_0)}{H_{cl}(T_0)(T_1 - T_0)} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где T_0 и T_1 – начальная и конечная температуры измерения.

Однако, несмотря на хорошую температурную стабильность, сплавы ЮНДК уступают материалам системы РЗМ–Fe–Co–В по значениям коэрцитивной силы и максимального энергетического произведения, поэтому их использование в ряде устройств, таких как динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ), ограничено.

В индикаторных гиросtabilизаторах и бесплатформенных инерциальных навигационных системах (БИНС) преимущественно применяют ДНГ [8]. Это один из наиболее энергетически эффективных чувствительных элементов, имеющий оптимальное соотношение критериев стоимости и точности, а также приемлемую массогабаритную характеристику. В последнее время для создания малогабаритных БИНС используют ДНГ массой до 0,1 кг. В соответствии с требованиями БИНС, эти приборы должны иметь измерительный диапазон до 200 градусов/с и случайный уход оси $\sim(0,01-0,1)$ угловых градусов/ч.

В процессе эксплуатации искусственных спутников Земли постоянно возникает потребность в изменении и расширении круга задач и требований к применяемым в них узлам, агрегатам и их техническим характеристикам, в частности к точности положения, за которую отвечает система навигации. В качестве примера можно привести летательные аппараты, преимущественно базирующиеся на космической орбите, которые оборудованы оптическими приборами (например, камеры высокого разрешения и телескопы), а также аппараты, отвечающие за создание и поддержание систем навигации спутников. К точности позиционирования аппаратов этого класса предъявляют особые требования, которые выполняются при использовании ДНГ [9]. Конструкцию ДНГ постоянно модернизировали и улучшали, на данный момент можно утверждать, что достигнута предельная эффективность их работы.

Для ДНГ требуются кольцевые магниты с радиальной текстурой [10], производство которых является нетривиальной и наукоемкой задачей. Возникает необходимость поиска материалов с максимально высокой коэрцитивной силой. Высококоэрцитивные материалы системы Sm–Co для этих целей не подходят, так как разрушаются при изготовлении от внутренних растягивающих напряжений, превышающих предел прочности при растяжении [11, 12].

Такие магниты можно изготовить только из редкоземельных материалов на основе неодима или празеодима, поскольку в этом случае возникают сжимающие напряжения, не превышающие прочность материала при сжатии [10]. Для защиты от коррозионного поражения в условиях эксплуатации на магниты этой системы наносят покрытия типа Ni–Ni или Ni–Cu–Ni, в ряде случаев с дополнительным внешним слоем эпоксидной смолы или других полимерных материалов [13, 14]. Для повышения температурной стабильности эти материалы также легируют диспрозием и кобальтом [15, 16]. Экспериментальным путем выявлено, что в этом случае абсолютная величина ТКИ уменьшается [16]. Следует отметить, что при исследовании величины ТКИ возможно проводить не только статические магнитные измерения, но и применять эффект Мессбауэра (ядерный гамма-резонанс). Причем величины ТКИ, полученные с использованием этих подходов, совпадают. В работе [17] показано, что для материала состава $Nd_2(Fe_{1-y}Co_y)_{14}B$ величина ТКИ в диапазоне температур 250–350 К составила $-0,05$ %/К при измерении обоими способами. Более того, из данных эффекта Мессбауэра можно найти величину ТКИ на шести кристаллографически неэквивалентных узлах, т. е. измерить не совокупный ТКИ образца, а температурный коэффициент намагниченности на отдельных атомах в зависимости от их положения в кристаллической решетке основной магнитной фазы, что невозможно получить методом статических магнитных измерений.

В работе [18] исследованы материалы состава $Fe_{60}Cr_{27}Co_{10}Mo_2Ti_1$ (% (по массе)). По формулам (1) и (2) получены значения ТКИ ($-0,0128$ %/К) и β ($-0,0104$ %/К) в области температур от 23 до 500 °С при величине $B_r = 1,0-1,18$ Тл и $H_{cl} = 36-48$ кА/м.

В работе [19] методом селективного лазерного спекания получены образцы из сплава 25X15КА, которые обладали следующими свойствами: $H_{CB} = 44,8-46,1$ кА/м, $B_r = 0,94-1,02$ Тл, $\rho = 7,55-7,59$ г/см³. Данные по величине ТКИ в этой работе не приведены. В работе [20] для сплава 22X15K4MC в диапазоне температур от 20 до 150 °С получены значения ТКИ = -0,147 %/К и $\beta = 0,169$ %/К. Наиболее высокие характеристики получены для монокристаллических материалов типа ЮНДК. Монокристаллические магниты систем Alnico и Fe-Co-Cr-Mo, которые изготавливают на одном из предприятий в США, обладают характеристиками, представленными в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики монокристаллических магнитов систем Alnico и Fe-Co-Cr-Mo

Показатель	Значение показателя для магнита системы	
	Alnico-8AA	Fe-Co-Cr-Mo
Остаточная индукция, Тл	1,15	1,4-1,5
Коэрцитивная сила по индукции, кА/м	115-120	65-70
Максимальное энергетическое произведение, кДж/м ³	80-90	72-80
Температурный коэффициент индукции в диапазоне от -60 до +250 °С, %/К	0,0005	0,0005

В работе [21] описаны материалы системы R(Co, Fe, Cu, Zr)_{6,09}, где R – редкоземельные металлы (РЗМ). В диапазоне температур от 22 до 150 °С получен диапазон величин ТКИ от -0,0063 до -0,0019 %/К при $B_r = 0,907$ Тл и поле «колена» $H_k = 1712$ кА/м (наблюдается заметное увеличение коэрцитивной силы). Более подробно изготовление магнита аналогичного состава рассмотрено в источнике [22]. В работах [23-25] показано, что увеличение содержания кобальта в магнитах системы Nd-(Pr)-Dy-Fe-Co-B, аналогично влиянию диспрозия, вызывает уменьшение абсолютной величины ТКИ.

Важность исследования материалов данного класса обусловлена необходимостью как создания конкуренции на мировом рынке магнитотвердых материалов и замещения импорта зарубежных аналогов, так и обеспечения технологического суверенитета Российской Федерации [26].

Материалы и методы

Выплавку РЗМ осуществляли методом индукционного плавления в набивном керамическом тигле с использованием следующих шихтовых материалов: празеодим ПрМ-1, диспрозий ДиМ-1, кобальт К0, железо АРМКО. Бор вводили в плавку в виде лигатуры марки ФБ-20 состава Fe_{88,7}B_{11,3} (% (по массе)). Процесс изготовления магнитов состоял из следующих операций: дробление слитка выбранного состава для получения фракции частиц размером менее 630 мкм в защитной среде азота (ГОСТ 9293-74); дополнительное измельчение с использованием планетарно-центробежной мельницы в среде хладона 113; прессование в магнитном поле напряженностью ~800 кА/м для формирования текстуры, ориентированной вдоль магнитного поля; спекание в печи типа СНВЭ в вакууме (10⁻⁵ мм рт. ст.) при температурах 1100-1130 °С.

Методом атомно-эмиссионного анализа с использованием спектрометра определен химический состав сплава. Для измерения содержания таких элементов, как азот, кислород и углерод, применяли газоанализатор, примесей – масс-спектрометр. Особенности микроструктуры регистрировали с помощью традиционных методов оптической микроскопии, фазовый состав – методом рентгеновского фазового анализа и микро-рентгеноспектрального анализа на сканирующем электронном микроскопе. Температурный интервал кристаллизации исследовали с использованием дифференциального сканирующего калориметра. Измерение магнитных свойств проводили прямым

методом определения гистерезиса намагниченности. Наличие микроструктуры, вызывающей высококоэрцитивное состояние, исследовали с помощью просвечивающей электронной микроскопии.

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 рис. 1.

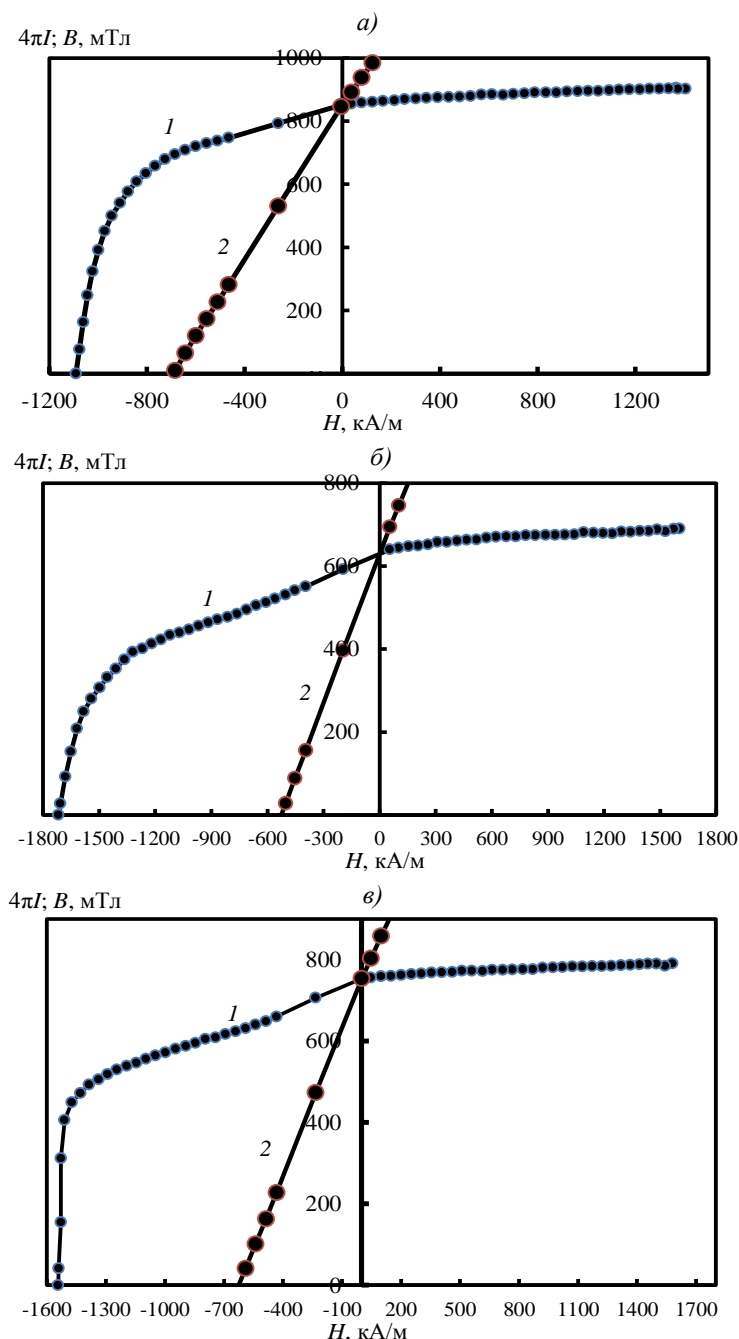


Рис. 1. Кривые размагничивания по намагниченности $4\pi I$ (1) и по индукции B (2) спеченных материалов составов $(\text{Nd}_{0.20}\text{Pr}_{0.30}\text{Dy}_{0.50})(\text{Fe}_{0.70}\text{Co}_{0.30})_{76.91}\text{B}_{5.31}$ (а), $(\text{Pr}_{0.53}\text{Dy}_{0.47})_{13.2}(\text{Fe}_{0.76}\text{Co}_{0.24})_{76.30}\text{B}_{10.5}$ (б) и $(\text{Pr}_{0.53}\text{Dy}_{0.47})_{13.37}(\text{Fe}_{0.80}\text{Co}_{0.20})_{78.64}\text{B}_{7.99}$ (в), измеренные при температуре 24 ± 5 °C

Свойства образцов системы РЗМ–Fe–Co–В представлены в табл. 3.

Таблица 3

Свойства спеченных материалов при температуре 24±5 °С

Состав материала в атомных долях	$T_{\text{сп}}$, °С	ρ , кг/м ³	$H_{\text{сн}}$, кА/м	$H_{\text{св}}$, кА/м	$4\pi I_{\text{с}}$, мТл	B_r , мТл	H_k , кА/м	SF
(Nd _{0,20} Pr _{0,30} Dy _{0,50}) _{17,78} (Fe _{0,70} Co _{0,30}) _{76,91} B _{5,31}	1130	7980	1090	700	905	850	300	0,28
(Nd _{0,11} Pr _{0,39} Dy _{0,50}) _{17,27} (Fe _{0,71} Co _{0,29}) _{77,57} B _{5,16}	1130	7940	1550	640	800	750	400	0,26
(Nd _{0,59} Dy _{0,41}) _{16,48} (Fe _{0,79} Co _{0,21}) _{75,95} B _{6,57}	1130	7760	1700	470	625	570	300	0,18
(Pr _{0,53} Dy _{0,47}) _{13,26} (Fe _{0,76} Co _{0,24}) _{77,0} B _{9,74}	1100	7670	1680	580	720	670	400	0,24
(Pr _{0,53} Dy _{0,47}) _{13,2} (Fe _{0,76} Co _{0,24}) _{76,30} B _{10,5}	1100	7680	1720	510	690	625	200	0,12
(Pr _{0,53} Dy _{0,47}) _{13,37} (Fe _{0,80} Co _{0,20}) _{78,64} B _{7,99}	1140	7680	1540	640	790	750	390	0,25
(Pr _{0,65} Dy _{0,35}) _{13,08} (Fe _{0,76} Co _{0,24}) _{78,95} B _{7,97}	1130	7680	1114	606	820	770	390	0,35
(Pr _{0,55} Dy _{0,45}) _{13,12} (Fe _{0,76} Co _{0,24}) _{78,98} B _{7,9}	1130	7790	1560	640	760	725	300	0,19

Примечание. $T_{\text{сп}}$ – температура спекания; ρ – плотность материала; $H_{\text{сн}}$, $H_{\text{св}}$ – коэрцитивная сила по намагниченности и по индукции; $4\pi I_{\text{с}}$ – намагниченность насыщения; B_r – остаточная индукция; H_k – поле «колена»; SF – коэффициент прямоугольности кривой размагничивания.

На рис. 2 представлена зависимость намагниченности насыщения ($4\pi I_{\text{с}}$) сплава X30K15M2T, имеющего состав (% (по массе)) Cr₃₀Co₁₅Mo₂Ti₁, от температуры отжига.

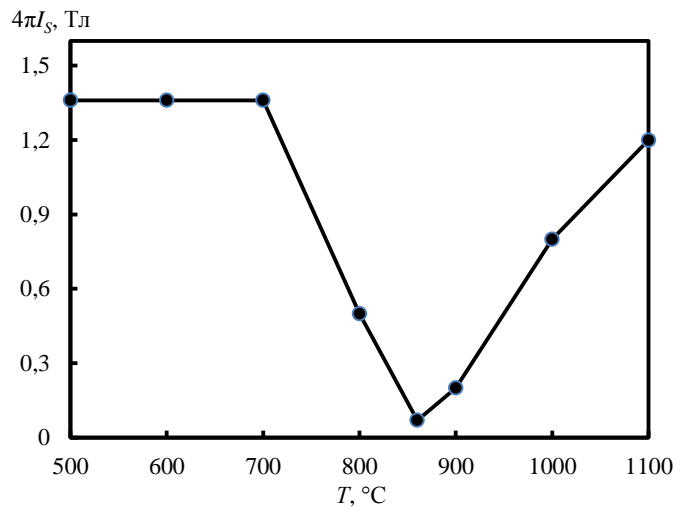


Рис. 2. Зависимость величины намагниченности насыщения $4\pi I_{\text{с}}$ магнитотвердого материала марки X30K15M2T, имеющего состав Cr₃₀Co₁₅Mo₂Ti₁, от температуры отжига T

Максимум экзотермического процесса проявляется при температуре 795 °С. Используя полученные ранее данные температурных зависимостей намагниченности насыщения, можно сделать предположение о протекании фазовых превращений в температурном интервале 500–1100 °С: при 595 °С происходит распад α -твердого раствора на α_1 - и α_2 -фазы; при 795 °С выделяется наибольшее количество σ -фазы; при 970 °С наблюдается выделение γ -фазы из α -твердого раствора. В диапазоне температур от 20 до 130 °С величина ТКИ материала марки X30K15M2T равна –0,021 %/К.

В зависимости от состава и технологии изготовления величина ТКИ таких материалов в области температур от 20 до 130 °С находится в указанных ранее пределах.

Однако это не относится к монокристаллическим магнитам из этого материала, для которых абсолютная величина ТКИ уменьшается по крайней мере на два порядка.

В табл. 4 приведены значения ТКИ в различных температурных диапазонах для спеченных материалов системы Nd–(Pr)–Dy–Fe–Co–B.

Таблица 4

Температурный коэффициент индукции некоторых спеченных материалов

Состав материала в атомных долях	Температурный коэффициент индукции, %/К, в диапазоне температур, К		
	300–400	300–500	300–550
(Nd _{0,59} Dy _{0,41}) _{16,48} (Fe _{0,79} Co _{0,21}) _{75,95} B _{6,57}	–0,0380	–0,0576	–0,0692
(Pr _{0,53} Dy _{0,47}) _{13,26} (Fe _{0,76} Co _{0,24}) _{77,0} B _{9,74}	–0,0300	–0,0505	–0,06266
(Pr _{0,53} Dy _{0,47}) _{13,37} (Fe _{0,80} Co _{0,20}) _{78,64} B _{7,99}	–0,0366	–0,0594	–0,0730
(Pr _{0,55} Dy _{0,45}) _{13,12} (Fe _{0,76} Co _{0,24}) _{78,98} B _{7,9}	–0,0316	–0,0522	–0,0641

В соответствии с данными, представленными в табл. 3 (строки 1 и 2), можно сделать вывод, что с уменьшением содержания неодима коэрцитивная сила по намагниченности значительно возрастает, а величина остаточной индукции уменьшается. При этом содержание диспрозия и кобальта остается неизменным при одинаковой температуре спекания. По данным работы [27], неодим и празеодим в данном случае имеют практически одинаковый магнитный момент. Однако диффузионные процессы в материалах на основе неодима протекают быстрее, чем в сплавах на основе празеодима [28], что, по-видимому, связано со скоростью диффузии этих ионов. Данный эффект, влияющий на магнитные свойства, требует дальнейших исследований. В материале без празеодима (строка 3 в табл. 3) величина H_{cI} возросла, а величины H_{cB} , $4\pi I_S$ и H_K , наоборот, уменьшились. Таким образом, можно сделать вывод, что неодим является вредной примесью для термически стабильных магнитов.

Аналогичное заключение можно сделать также исходя из данных, приведенных в табл. 4 (строка 1). По крайней мере в диапазоне температур 300–400 К абсолютная величина ТКИ материалов, не содержащих неодим, меньше, несмотря на большее содержание кобальта. При других температурах наблюдается схожая закономерность.

Анализ данных табл. 1 и 4 позволяет сделать вывод, что термостабильный материал на основе празеодима превосходит по магнитным характеристикам классический материал ЮНДК. Если повысить содержание кобальта, то по величине ТКИ этот материал превзойдет поликристаллический материал ЮНДК [29].

В настоящее время полагают, что величина ТКИ материала неинформативна. Величиной ТКИ можно характеризовать только материалы с максимально высокой температурой Кюри, такие как системы ЮНДК и Fe–Cr–Co. В этом случае рабочий диапазон температур находится в области линейного изменения намагниченности.

Таким образом, магнитный материал для навигационных приборов, имеющий большую величину коэрцитивной силы, необходимо характеризовать формой температурной зависимости намагниченности. В идеале эта зависимость должна быть параллельна оси температур [30]. Требуется проведение дальнейших исследований магнитных характеристик, таких как ТКИ и коэрцитивная сила, для различных составов с варьируемой термической обработкой для наиболее полного понимания влияния различных РЗМ на термостабильность магнитов для навигации.

Заключения

Разработаны магнитотвердые материалы, превосходящие по коэрцитивной силе по намагниченности (и по индукции) классические термостабильные магниты марки ЮНДК более чем на порядок: значения H_{cl} для составов $(\text{Pr}_{0,53}\text{Dy}_{0,47})_{13,2}(\text{Fe}_{0,76}\text{Co}_{0,24})_{76,30}\text{B}_{10,5}$ и $\text{Al}_{6,8}\text{Ni}_{13,9}\text{Co}_{34,9}\text{Cu}_{3,3}\text{Nb}_{0,7}\text{S}_{0,4}\text{Si}_{0,2}\text{Fe}_{34,1}$ составили 1720 и 126 кА/м соответственно. Исследованные материалы уступают магнитам марки ЮНДК по величине ТКИ ($-0,03$ %/К против $-0,024$ %/К в диапазоне температур 300–400 К). Если увеличить содержание кобальта до 0,30–0,35 атомных долей (вместо 0,24 атомных долей в исследованных материалах), то по величине ТКИ эти материалы превзойдут магниты ЮНДК, уступая только их монокристаллической модификации. Однако следует учитывать сложность изготовления монокристаллических магнитов. При этом даже монокристаллические магниты ЮНДК будут значительно уступать материалам, исследованным в данной работе, по величине коэрцитивной силы. В магнитах ЮНДК этот показатель не может быть увеличен принципиально, поскольку определяется только анизотропией формы зерен (такова характеристика формирования этой величины в магнитах марки ЮНДК).

Список источников

1. Матусевич В.А., Гетья А.Н., Шарабан Ю.В. Применение высококоэрцитивных постоянных магнитов в самолетных агрегатах // Электротехника и электромеханика. 2006. № 1. С. 33–35.
2. 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: 29.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-77-89.
3. Жуков А.С., Жумагалиева А.А., Хроменков М.В. и др. Структура и свойства магнитных материалов, изготовленных методом селективного лазерного сплавления // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2020. Т. 17. № 2. С. 251–256. DOI: 10.25712/ASTU.111-1416.2020.02.0116.
4. Liu Z., Miller M.K., Ping L. et al. Architecture and magnetism of alnico // Acta Materialia. 2014. Vol. 74. P. 224–233.
5. Rehman S.U., Jiang Q., He L. et al. Synthesis, microstructures, magnetic properties and thermal stabilities of isotropic alnico ribbons // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2018. Vol. 466. P. 2777–2782. DOI: 010.1016/j.jmmm.2018.07.020.
6. Bin S., Bingbing L., Chunhong L. et al. Microstructure and distribution of low content elements in AlNiCo 9 // Materials Science Forum. 2017. Vol. 898. P. 1669–1674.
7. Sajjad U.R., Qingzheng J., Qiulan T. et al. Evolution of microstructure, magnetic properties and thermal stabilities of isotropic alnico ribbons // IEEE Transactions on Magnetics. 2020. Vol. 56. No. 2. P. 127–132.
8. Василевский Н.И. Разработка динамически настраиваемого гироскопа с учетом его вибрационных характеристик. Миасс: Южно-Уральский государственный университет, 2018. 77 с.
9. Чиркин Д.С., Рословец П.В., Татарин Ф.В. и др. Уменьшение дрейфа динамически настраиваемого гироскопа от запуска к запуску // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 1. С. 1–14. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-01-1579.
10. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Резчикова И.И., Бузенков А.В. Кольцевые магниты с радиальной текстурой для динамически настраиваемых гироскопов // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S5. С. 89–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-89-94.
11. Jianjun T., Huanhui Q., Shengen Z. et al. Magnetic properties and microstructure of radially oriented Sm(Co, Fe, Cu, Zr)_z ring magnets // Materials Letters. 2007. Vol. 61. P. 5271–5274.

12. Anhua L., Wei L., Huijie W. et al. The study on thermal expansion of sintered $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ magnets // IEEE Transaction on Magnetics. 2009. Vol. 45. No. 10. P. 4402–4404.
13. Горлов Д.С., Чередниченко И.В., Валеев Р.А., Чесноков Д.В. Повышение коррозионной стойкости магнитов системы РЗМ–Fe–B // Труды ВИАМ. 2021. № 10 (104). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-97-107.
14. Демин С.А., Заварзин С.В., Чередниченко И.В., Козлов И.А. Защитное противокоррозионное покрытие магнитов системы РЗМ–Fe–B // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-96-107.
15. Pedziwiatr A.T., Wallace W.E. Structure and magnetism of the $\text{R}_2\text{Fe}_{14-x}\text{Co}_x\text{B}$ ferromagnetic Systems (R=Dy and Er) // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1986. Vol. 66. P. 63–68.
16. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Резчикова И.И., Валеев Р.А., Чередниченко И.В., Моргунов Р.Б. Сравнение температурной стабильности магнитов на основе SmCo и PrDy–FeCo–B // Авиационные материалы и технологии. 2015. № S2. С. 42–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S2-42-46.
17. Meeran R., Kamal R. A Mossbauer spectroscopic study of $\text{Nd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)\text{B}$ at $x = 0,13$ between 100 K and 700 K // Journal of the Less-Common Metals. 1987. Vol. 128. P. 343–350.
18. Zubair A., Shan T., Mozaffar H. Tailoring magnetic properties in 60Fe–27Co–2Mo–1Ti magnetic alloy by Ni and Hf additive // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2021. Vol. 538. P. 169257. DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.168266.
19. Ефремов Д.Б., Герасимова А.А. Получение магнитов из материала системы Fe–Cr–Co методом селективного лазерного спекания // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 10. С. 721–727. DOI: m10.17073/0368-0797-2021-10-721-727.
20. Генералова К.Н. Закономерности фазовых превращений и свойства порошковых магнитных материалов на основе системы Fe–Cr–Co–Si и нестехиометрического сплава Cu–Au: дис. ... канд. техн. наук. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2019. 138 с.
21. Marinescu M., McGinnis K., Liu J.F. et al. High $(\text{BH})_{\text{max}}$ permanent magnets with near-zero reversible temperature coefficient of B_R // Proceedings of 20th International Workshop on rare earth permanent magnets and their applications. Grete, 2008. P. 1–6.
22. Ray A.E. Metallurgical behavior of $\text{Sm}(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Cu}, \text{Zr})_z$ alloys // Journal of Applied Physics. 1984. Vol. 55. P. 2094–2096.
23. Masato S., Setsuo F., Hitoshi Y. et al. Permanent magnet materials based on the rare earth-iron-boron tetragonal compounds // IEEE Transactions on Magnetics. 1984. Vol. 20. P. 1584–1589.
24. Jiang S.Y., Chen H.Y., Cheng S.F. et al. Magnetic properties of R–Fe–B and R–Fe–Co–Al–B magnets (R=Pr and Nd) // Journal of Applied Physics. 1988. Vol. 64. P. 5510–5512.
25. Пискорский В.П., Бурханов Г.С., Оспенникова О.Г. и др. Расчет температурного коэффициента индукции наноструктурированных магнитотвердых материалов Pr–Dy–Fe–Co–B методом молекулярного поля // Металлы. 2010. № 1. С. 64–67.
26. 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.
27. Herbst J.F. $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ materials: intrinsic properties and technological aspects // Reviews of Modern Physics. 1991. Vol. 63. No. 4. P. 819–898.
28. 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.
29. 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: 29.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-66-75.
30. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. информ. материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.

References

1. 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.
2. 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: October 29, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-77-89.
3. Zhukov A.S., Zhumagalieva A.A., Khromenkov M.V. et al. Structure and properties of magnetic materials manufactured by selective laser melting. *Fundamentalnye problemy sovremennogo materialovedeniya*, 2020, vol. 17, no. 2, pp. 251–256. DOI: 10.25712/ASTU.111-1416.2020.02.0116.
4. Liu Z., Miller M.K., Ping L. et al. Architecture and magnetism of alnico. *Acta Materialia*, 2014, vol. 74, pp. 224–233.
5. Rehman S.U., Jiang Q., He L. et al. Synthesis, microstructures, magnetic properties and thermal stabilities of isotropic alnico ribbons. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, vol. 466, p. 2777–2782. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.07.020.
6. Bin S., Bingbing L., Chunhong L. et al. Microstructure and distribution of low content elements in AlNiCo 9. *Materials Science Forum*, 2017, vol. 898, pp. 1669–1674.
7. Sajjad U.R., Qingzheng J., Qiulan T. et al. Evolution of microstructure, magnetic properties and thermal stabilities of isotropic alnico ribbons. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 127–132.
8. Vasilevsky N.I. *Development of a dynamically adjustable gyroscope taking into account its vibration characteristics*. Miass: South Ural State Univ., 2018, 77 p.
9. Chirkin D.S., Roslovets P.V., Tatarinov F.V. et al. Reducing the drift of a dynamically tuned gyroscope from launch to launch. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2017, no. 1, pp. 1–14. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-01-1579.
10. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Piskorskij V.P. et al. Ring magnets with radial texture for dynamically tuned gyroscopes. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S5, pp. 89–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-89-94.
11. Jianjun T., Huanhui Q., Shengen Z. et al. Magnetic properties and microstructure of radially oriented Sm(Co, Fe, Cu, Zr)_z ring magnets. *Materials Letters*, 2007, vol. 61, pp. 5271–5274.
12. Anhua L., Wei L., Huijie W. et al. The study on thermal expansion of sintered Sm₂Co₁₇ magnets. *IEEE Transaction on Magnetics*, 2009, vol. 45, no. 10, pp. 4402–4404.
13. Gorlov D.S., Cherednichenko I.V., Valeev R.A., Chesnokov D.V. Improving the corrosion resistance of REM–Fe–B magnets. *Trudy VIAM*, 2021, no. 10 (104), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 29, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-97-107.
14. Demin S.A., Zavarzin S.V., Cherednichenko I.V., Kozlov I.A. Protective anticorrosive coating of magnets of the REM–Fe–B system. *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 29, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-96-107.
15. Pedziwiatr A.T., Wallace W.E. Structure and magnetism of the R₂Fe_{14-x}Co_xB ferromagnetic Systems (R=Dy and Er). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1986, vol. 66, pp. 63–68.
16. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Rezhikova I.I., Valeev R.A. et al. Comparison of the temperature stability of SmCo and PrDy–FeCo–B magnets. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. S2 (39), pp. 42–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S2-42-46.
17. Meeran R., Kamal R. A Mossbauer spectroscopic study of Nd₂(Fe_{1-x}Co_x)B at x = 0,13 between 100 K and 700 K. *Journal of the Less-Common Metals*, 1987, vol. 128, pp. 343–350.
18. Zubair A., Shan T., Mozaffar H. Tailoring magnetic properties in 60Fe–27Co–2Mo–1Ti magnetic alloy by Ni and Hf additive. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2021, vol. 538, p. 169257. DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.168266.
19. Efremov D.B., Gerasimova A.A. Production of magnets from the material of the Fe–Cr–Co system by selective laser sintering. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*, 2021, vol. 64, no. 10, pp. 721–727. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-10-721-727.

20. Generalova K.N. *Regularities of phase transformations and properties of powder magnetic materials based on the Fe–Cr–Co–Si system and non-stoichiometric Cu–Au alloy*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Perm: Publ. House of PNIPU, 2019, 138 p.
21. Marinescu M., McGinnis K., Liu J.F. et al. High $(BH)_{\max}$ permanent magnets with near-zero reversible temperature coefficient of B_R . *Proceedings of 20th International Workshop on rare earth permanent magnets and their applications*. Grete, 2008, pp. 1–6.
22. Ray A.E. Metallurgical behavior of $\text{Sm}(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Cu}, \text{Zr})_z$ alloys. *Journal of Applied Physics*, 1984, vol. 55, pp. 2094–2096.
23. Masato S., Setsuo F., Hitoshi Y. et al. Permanent magnet materials based on the rare earth-iron-boron tetragonal compounds. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1984, vol. 20, pp. 1584–1589.
24. Jiang S.Y., Chen H.Y., Cheng S.F. et al. Magnetic properties of R–Fe–B and R–Fe–Co–Al–B magnets (R=Pr and Nd). *Journal of Applied Physics*, 1988, vol. 64, pp. 5510–5512.
25. Piskorsky V.P., Burkhanov G.S., Ospennikova O.G. et al. Calculation of the temperature coefficient of induction of nanostructured magnetic hard materials Pr–Dy–Fe–Co–B by the molecular field method. *Metally*, 2010, no. 1, pp. 64–67.
26. 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.
27. Herbst J.F. $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ materials: intrinsic properties and technological aspects. *Reviews of Modern Physics*, 1991, vol. 63, no. 4, pp. 819–898.
28. 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.
29. 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: October 29, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-66-75.
30. Kablov E.N. *Trends and guidelines for innovative development of Russia*: collection of information materials. 3rd ed., rev. and add. Moscow: VIAM, 2015, 720 p.

Информация об авторах

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

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

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

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

Information about the authors

Maksim V. Potapov, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Roman B. Morgunov, Leading Researcher, Doctor of Sciences (Phys. & Math.), Professor, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru; Chief Researcher, FRC PCP MC RAS, office@icp.ac.ru

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

Статья поступила в редакцию 24.04.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.05.2025.
The article was submitted 24.04.2025; approved and accepted for publication after reviewing 13.05.2025.