

Научная статья

УДК 539.231:669.859:537.622

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-42-52

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ НАМАГНИЧЕННОСТИ СПЕЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ Pr–Dy–Fe–Co–B В ПРИБЛИЖЕНИИ МОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛЯ

Д.В. Королев¹, Р.А. Валеев¹, Р.Б. Моргунов¹, В.П. Пискорский¹

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

Аннотация. Получен теоретический расчет намагниченности спеченных материалов Pr–Dy–Fe–Co–B и приведены количественные оценки зависимости намагниченности от концентрации диспрозия и кобальта. Установлены оптимальные концентрации этих элементов, приводящие к минимизации температурного коэффициента индукции. Получены экспериментальные данные о зависимости намагниченности от температуры. Экспериментальные и теоретические зависимости хорошо согласуются между собой. Это свидетельствует о наличии предсказательных возможностей развитой модели расчета и позволяет надеяться на такой подбор концентраций химических элементов, который позволил бы сделать магнитные свойства кольцевых магнитов в гироскопах малочувствительными к температуре в требуемом эксплуатационном диапазоне.

Ключевые слова: поле анизотропии, намагниченность, гироскоп, основная тетрагональная фаза, приближение молекулярного поля, функция Бриллюэна, редкоземельный ион, температура Кюри, коэффициент прямоугольности

Для цитирования: Королев Д.В., Валеев Р.А., Моргунов Р.Б., Пискорский В.П. Расчет температурной зависимости намагниченности спеченных материалов Pr–Dy–Fe–Co–B в приближении молекулярного поля // Труды ВИАМ. 2023. № 2 (120). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-42-52.

Scientific article

CALCULATION OF THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE MAGNETIZATION OF SINTERED MATERIALS Pr–Dy–Fe–Co–B USING MOLECULAR FIELD APPROXIMATION THEORY

D.V. Korolev¹, R.A. Valeev¹, R.B. Morgunov¹, V.P. Piskorsky¹

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

Abstract. Provides a theoretical calculation of the magnetization of sintered materials Pr–Dy–Fe–Co–B and provides quantitative estimates of the dependence of magnetization on the concentration of dysprosium and cobalt. The optimal concentrations of these elements have been established, leading to the minimization of the temperature coefficient of induction. Experimental data on the dependence of magnetization on temperature are obtained. Experimental and theoretical dependences agree well with each other. This indicates the presence of predictive capabilities of the developed calculation model and allows us to hope for such a selection of concentrations of chemical elements that would make the magnetic properties of ring magnets in gyroscopes insensitive to temperature in the required operating range.

Keywords: anisotropy field, magnetization, gyroscope, basic tetragonal phase, molecular field approximation, Brillouin function, rare earth ion, Curie temperature, squareness coefficient

For citation: Korolev D.V., Valeev R.A., Morgunov R.B., Piskorsky V.P. Calculation of the temperature dependence of the magnetization of sintered materials Pr–Dy–Fe–Co–B using molecular field approximation theory. *Trudy VIAM*, 2023, no. 2 (120), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-42-52.

Введение

Первые публикации о гироскопах, в конструкции которых использована упругая связь между валом приводного двигателя и гироскопическим маховиком, появились в начале шестидесятых годов XX века. Рассматривались схемы гироскопов с внутренним упругим подвесом маховика на валу приводного двигателя, обеспечивающим возможность наклона маховика относительно вала. Такое устройство полностью соответствует классическому определению гироскопа как быстро вращающегося твердого тела, ось собственного вращения которого может изменять свою ориентацию в инерциальном пространстве. Этот прибор, имея необходимую для инерциальных систем точность, оказался в несколько раз дешевле и надежнее поплавковых гироскопов того же класса. Быстро найдя применение в авиации и космической отрасли, а затем и в морских навигационных приборах, «гирофлекс» открыл новое направление в технике гироскопических чувствительных элементов [1]. Одно из преимуществ гироскопа с упругим вращающимся подвесом – это рациональное использование внутреннего объема гироскопа, что позволяет уменьшить его размеры до значений, незначительно превышающих диаметр гироскопического маховика. Компактность динамически настраиваемого гироскопа позволяет на его основе создавать малогабаритные гироскопические измерители вектора угловой скорости [2].

Одной из существенных проблем гироскопов является точное определение скорости (или частоты) вращения маховика [3–10]. При этом необходимо измерять все три компоненты вектора угловой скорости для определения положения оси гироскопа в пространстве. Для этого в гироскопах используется классическая схема вращения магнита в катушке индуктивности, в которой возникает электродвижущая сила индукции, прямо пропорциональная измеряемой проекции вектора угловой частоты. Этот элемент гироскопа при плохой настройке или нестабильности магнита может свести на нет вышеупомянутые достижения в подвеске маховика, потому что вариации намагниченности с температурой способны вызвать значительные изменения соответствующей ЭДС индукции. Для предотвращения этих нежелательных нарушений в работе гироскопа магнит, используемый в системе, должен обладать как можно менее зависимой от температуры намагниченностью. Намагниченность определяется следующими основными факторами:

- полем размагничивания, которое зависит от формы магнита;
- обменным взаимодействием, которое имеет определяющее значение в величинах температуры Кюри (T_C) и температурной зависимости намагниченности;
- магнитной анизотропией, которая зависит от фундаментальных свойств сплава и химической природы ионов, из которых он состоит.

Первый из этих факторов, который также можно назвать фактором анизотропии формы, зависит от температуры лишь в той мере, в которой от температуры зависит остаточная намагниченность M_r . Это позволяет считать его вторичным и не рассматривать в первом приближении. Таким образом, в качестве управляющих температурно-зависимых факторов остаются обменное взаимодействие и кристаллическая анизотропия. Изменение намагниченности с температурой описывается законом Блоха по уравнению $M = M_0(1 - T/T_C)^{3/2}$ (по крайней мере, до температуры, равной одной трети от температуры Кюри). Это создает значительные вариации намагниченности лишь вблизи температуры Кюри. Поскольку обычно температура используемых в гироскопах

сплавов значительно ниже их температуры Кюри (600–1000 К), закон Блоха дает небольшой вклад в температурную нестабильность магнитов. Таким образом, из трех факторов, учитываемых при расчете намагниченности, лишь один (магнитная анизотропия) влияет на температурную стабильность. В системе из четырех магнитных ионов, которые имеются в составе сплавов системы (PrDy)–(FeCo)–B, вопрос о кристаллической анизотропии достаточно сложен. Если еще учесть, что используются спеченные магниты с текстурой, то расчет результирующих магнитных свойств осложняется дополнительно.

В конструкции навигационных приборов одним из основных элементов является кольцевой магнит с радиальной текстурой [11]. Однако данный магнит должен быть термически стабильным, т. е. его свойства должны минимально меняться с температурой. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ созданы составы и серийно изготавливают температурно-стабильные кольцевые магниты с радиальной текстурой для навигационных приборов из материала системы Pr–Dy–Fe–Co–B [12–15].

Цель данной работы заключается в расчете температурной зависимости намагниченности спеченных материалов системы Pr–Dy–Fe–Co–B в приближении молекулярного поля.

Материалы и методы

Фазовый анализ и определение зависимости содержания элементов в основной тетрагональной магнитной фазе (фаза А) от содержания их в спеченном материале проводили методом электронно-зондового микроанализа. Если состав спеченного материала в атомных долях $(Pr_{1-x-w}Dy_xGd_w)–(Fe_{1-y}Co_y)–B$, а состав фазы А: $(Pr_{1-p-h}Dy_pGd_h)_2(Fe_{1-q}Co_q)_{14}B$, тогда содержание элементов фазы А определяется выражениями (1)–(3). Материал, представленный в данной статье, основан на математическом моделировании в приближении молекулярного поля для состава сплава $(Pr_{1-x-w}Dy_xGd_w)–(Fe_{1-y}Co_y)–B$. Атомные доли элементов основной магнитной фазы находим из состава сплава по следующим формулам:

$$p = 0,9539x + 0,0499, \quad (1)$$

где p – содержание диспрозия в основной магнитной фазе; x – содержание диспрозия в материале;

$$h = 0,941w + 0,0151, \quad (2)$$

где h – содержание гадолиния в основной магнитной фазе; w – количество гадолиния в спеченном материале;

$$q = 0,9898y + 0,0096, \quad (3)$$

где q – содержание кобальта в основной магнитной фазе; y – содержание кобальта в материале.

Задача сводится к решению системы из четырех уравнений:

$$\mu_F(T) = \mu_F(0) B_{J_F} [\mu_F(0) \mu_B H_F(T) / kT], \quad (4)$$

где $\mu_F(T)$ – магнитный момент ионов Fe–Co при температуре T в градусах Кельвина (К); $\mu_F(0)$ – магнитный момент ионов Fe–Co при температуре 0 К; $B_{J_F} [\mu_F(0) \mu_B H_F(T) / kT]$ – функция Бриллюэна; $\mu_B = 9,2741 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл – магнетон Бора; $k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – константа Больцмана; $H_F(T)$ – молекулярное поле, действующее на ионы Fe–Co (в данном случае Fe–Co рассматривается как отдельный ион) при температуре T в градусах К;

$$\mu_P(T) = \mu_P(0) B_{J_P} [\mu_P(0) \mu_B H_P(T) / kT], \quad (5)$$

где $\mu_P(T)$ – магнитный момент иона Pr^{3+} при температуре T в градусах К; $\mu_P(0)$ – магнитный момент иона Pr при температуре 0 К; $B_{J_P}[\mu_P(0)\mu_B H_P(T)/kT]$ – функция Бриллюэна; $H_P(T)$ – молекулярное поле, действующее на ион Pr при температуре T в градусах К;

$$\mu_D(T) = \mu_D(0) B_{J_D}[\mu_D(0)\mu_B H_D(T)/kT], \quad (6)$$

где $\mu_D(T)$ – магнитный момент иона Dy^{3+} при температуре T в градусах К; $\mu_D(0)$ – магнитный момент иона Dy^{3+} при температуре 0 К; $B_{J_D}[\mu_D(0)\mu_B H_D(T)/kT]$ – функция Бриллюэна; $H_D(T)$ – молекулярное поле, действующее на ион Dy^{3+} при температуре T в градусах К;

$$\mu_G(T) = \mu_G(0) B_{J_G}[\mu_G(0)\mu_B H_G(T)/kT], \quad (7)$$

где $\mu_G(T)$ – магнитный момент иона Gd^{3+} при температуре T в градусах К; $\mu_G(0)$ – магнитный момент иона Gd^{3+} при температуре 0 К; $B_{J_G}[\mu_G(0)\mu_B H_G(T)/kT]$ – функция Бриллюэна; $H_G(T)$ – молекулярное поле, действующее на ион Gd^{3+} при температуре T в градусах К.

Здесь функция Бриллюэна выражена следующей формулой:

$$B_j(x) = \frac{2J+1}{2J} \text{cth}\left(\frac{2J+1}{2J}x\right) - \frac{1}{2J} \text{cth}\frac{x}{2J}, \quad (8)$$

где J – полный момент иона;

$$x = \mu(0)\mu_B H(T)/kT, \quad (9)$$

где $\mu(0)$ – магнитный момент иона при температуре 0 К; $H(T)$ – молекулярное поле, действующее на ион при температуре T в градусах К.

Полный момент ионов Fe–Co (J_F) с учетом количества кобальта (q) в основной магнитной фазе выражается соотношением

$$J_F = 0,5 (-0,5253q^4 + 1,2516q^3 - 1,3438q^2 - 0,2008q + 2,1987). \quad (10)$$

Полный момент иона Pr^{3+} – $J_P = 4$; полный момент иона Dy^{3+} – $J_D = 7,5$; полный момент иона Gd^{3+} – $J_G = 3,5$.

Магнитные моменты ионов Fe–Co, Pr^{3+} , Dy^{3+} и Gd^{3+} в единицах μ_B при температуре $T = 0$ К будут соответственно $\mu_F(0) = 2J_F$; $\mu_P(0) = 3,2$; $\mu_D(0) = 10$; $\mu_G(0) = 7$. Молекулярные поля, действующие на эти ионы, определяются следующими выражениями:

$$H_F(T) = d[14n_{FF}\mu_F(T) + 2(1-x-h)\cdot n_{PF}\mu_P(T) + 2x\cdot n_{DF}\mu_D(T) + 2h\cdot n_{GF}\mu_G(T)], \quad (11)$$

где n_{FF} – коэффициент молекулярного поля внутри подрешетки ионов Fe–Co; n_{PF} , n_{DF} , n_{GF} – коэффициенты молекулярного поля между подрешетками ионов соответственно празеодима, диспрозия, гадолиния и ионами Fe–Co;

$$H_P(T) = d[14n_{PF}\mu_F(T)], \quad (12)$$

$$H_D(T) = d[14n_{DF}\mu_F(T)], \quad (13)$$

$$H_G(T) = d[14n_{GF}\mu_F(T)], \quad (14)$$

$$d = \mu_B N \rho / A, \quad (15)$$

где $N = 6,023 \cdot 10^{23}$ – число Авогадро; ρ , A – соответственно плотность соединения и молекулярная масса фазы $(\text{Pr}_{1-p-h}\text{Dy}_p\text{Gd}_h)_2(\text{Fe}_{1-q}\text{Co}_q)_{14}\text{B}$;

$$A = 2(1-p-h)140,91 + 2p162,5 + 2h157,25 + 14(1-q)55,8 + 14q58,9 + 10,8, \quad (16)$$

$$\rho = [\rho^D(q) - \rho^{PG}(h, q)]p + \rho^{PG}(h, q), \quad (17)$$

где $\rho^D(q)$ – плотность фазы $\text{Dy}_2(\text{Fe}_{1-q}\text{Co}_q)_{14}\text{B}$ в зависимости от содержания Co в фазе; $\rho^{PG}(h, q)$ – плотность фазы $(\text{Pr}_{1-h}\text{Gd}_h)_2(\text{Fe}_{1-q}\text{Co}_q)_{14}\text{B}$ в зависимости от содержания Co и Gd в фазе;

$$\rho^D(q) = -3,292 \cdot 10^{-13} q^2 + 1,046q + 8,069,$$

$$\rho^{PG}(h, q) = [\rho^G(q) - \rho^P(q)]h + \rho^P(q),$$

где $\rho^G(q)$ – плотность фазы $Gd_2(Fe_{1-q}Co_q)_{14}B$ в зависимости от содержания Co в фазе; $\rho^P(q)$ – плотность фазы $Pr_2(Fe_{1-q}Co_q)_{14}B$ в зависимости от содержания Co в фазе;

$$\rho^G(q) = 0,16475q^2 + 0,71913q + 7,87323,$$

$$\rho^P(q) = 0,2111q^2 + 0,62759q + 7,47383.$$

Коэффициенты молекулярного поля n_{FF} , n_{PF} , n_{DF} , n_{GF} находим из выражения

$$T_C \alpha (T_C \beta - n_{FF}) - n_{RF}^2 = 0, \quad (18)$$

где T_C – температура Кюри; α и β – коэффициенты, зависящие от вида иона; n_{RF} – коэффициент молекулярного поля между подрешетками ионов (Pr, Dy или Gd) и Fe–Co;

$$\alpha = \left[\frac{3J_R}{J_R + 1} \right] [k / \mu_B d] / 2\mu_R^2(0), \quad (19)$$

где J_R – полный момент иона (R : празеодим, либо диспрозий, либо гадолиний); $\mu_R(0)$ – магнитный момент иона (R : празеодима, либо диспрозия, либо гадолиния) при температуре 0 К;

$$n_{FF} = 3919,9q^2 + 6753,9q + 4842,2. \quad (20)$$

Величину T_C для фазы $(Pr_{1-p-h}Dy_pGd_h)_2(Fe_{1-q}Co_q)_{14}B$ находим по формуле

$$T_C = [T_{gC}(q) - T_{aC}(p, q)]h + T_{aC}(p, q), \quad (21)$$

где $T_{gC}(q)$ – температура Кюри фазы $Gd_2(Fe_{1-q}Co_q)_{14}B$ в зависимости от содержания кобальта в фазе; $T_{aC}(p, q)$ – температура Кюри фазы $Dy_2(Fe_{1-q}Co_q)_{14}B$ в зависимости от содержания Co и Gd в фазе;

$$T_{gC}(q) = 243,71 q^3 - 823,06 q^2 + 968,60 q + 662,35,$$

$$T_{aC}(p, q) = [(-9675,93q^4 + 11280,78q^3 - 4546,45q^2 + 1391,95q + 592) -$$

$$- (209,75q^3 - 805,47q^2 + 1023,42q + 559,57)]p + (209,75q^3 - 805,47q^2 +$$

$$+ 1023,42q + 559,57),$$

$$\beta = \frac{3J_F k}{14d\mu_F(J_F + 1)\mu_F^2(0)}, \quad (22)$$

$$\mu_F(0) = 0,221 q^3 - 0,725 q^2 - 0,316 q + 2,201, \quad (23)$$

$$J_F = \mu_F(0)/2. \quad (24)$$

Коэффициенты молекулярного поля зависят от вида иона редкоземельного металла:

$$n_{RF} = [T_C \alpha (\beta T_C - n_{FF})]^{1/2}. \quad (25)$$

Расчет температурной зависимости намагниченности основан на приближении молекулярного поля. В этом случае расчет ведется по программе Mathcad численным решением системы уравнений (4)–(7) методом итераций.

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

Результаты и обсуждение

Сделаем расчет для состава $Dy_2Fe_{14}B$ и получим коэффициенты молекулярного поля: $n_{RR} = 1368$, $n_{RF} = -460$, $n_{FF} = 4676$. В работе [16] для этого состава получены следующие значения: $n_{RR} = 1340$, $n_{RF} = -554$, $n_{FF} = 4564$. Из сравнения результатов видно, что они достаточно хорошо соответствуют друг другу. Результаты расчета для материала

$(\text{Pr}_{1-x-w}\text{Dy}_x\text{Gd}_w)-(\text{Fe}_{1-y}\text{Co}_y)-\text{B}$ при различных концентрациях диспрозия, гадолиния и кобальта представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета магнитных характеристик (температурного коэффициента индукции и намагниченности насыщения) для некоторых спеченных материалов

Состав материала, атомн. долей	ТКИ, %/°C, при температуре $-60\div+100$ °C	$4\pi I_s$, Тл, при температуре 20 °C
$(\text{Pr}_{0,50}\text{Dy}_{0,40}\text{Gd}_{0,10})-(\text{Fe}_{0,65}\text{Co}_{0,35})-\text{B}$	0,0030	1,1132
$(\text{Pr}_{0,50}\text{Dy}_{0,40}\text{Gd}_{0,10})-(\text{Fe}_{0,65}\text{Co}_{0,30})-\text{B}$	-0,0008	1,1339
$(\text{Pr}_{0,55}\text{Dy}_{0,35}\text{Gd}_{0,10})-(\text{Fe}_{0,65}\text{Co}_{0,30})-\text{B}$	-0,0056	1,1837
$(\text{Pr}_{0,60}\text{Dy}_{0,30}\text{Gd}_{0,10})-(\text{Fe}_{0,65}\text{Co}_{0,30})-\text{B}$	-0,0090	1,2335
$(\text{Pr}_{0,60}\text{Dy}_{0,25}\text{Gd}_{0,10})-(\text{Fe}_{0,65}\text{Co}_{0,30})-\text{B}$	-0,0139	1,2830
$(\text{Pr}_{0,50}\text{Dy}_{0,40}\text{Gd}_{0,10})-(\text{Fe}_{0,65}\text{Co}_{0,25})-\text{B}$	-0,0053	1,1520
$(\text{Pr}_{0,50}\text{Dy}_{0,40}\text{Gd}_{0,10})-(\text{Fe}_{0,65}\text{Co}_{0,20})-\text{B}$	-0,0107	1,1671
$(\text{Pr}_{0,50}\text{Dy}_{0,40}\text{Gd}_{0,10})-(\text{Fe}_{0,65}\text{Co}_{0,15})-\text{B}$	-0,0170	1,1790
$(\text{Pr}_{0,50}\text{Dy}_{0,40}\text{Gd}_{0,10})-(\text{Fe}_{0,65}\text{Co}_{0,10})-\text{B}$	-0,0249	1,1880

На рис. 1 представлена вычисленная величина температурного коэффициента индукции (ТКИ) в диапазоне температур $-60\div+100$ °C и намагниченность насыщения при температуре 20 °C в зависимости от содержания диспрозия для спеченного материала состава $(\text{Pr}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Gd}_{0,10})-(\text{Fe}_{0,65}\text{Co}_{0,35})-\text{B}$.

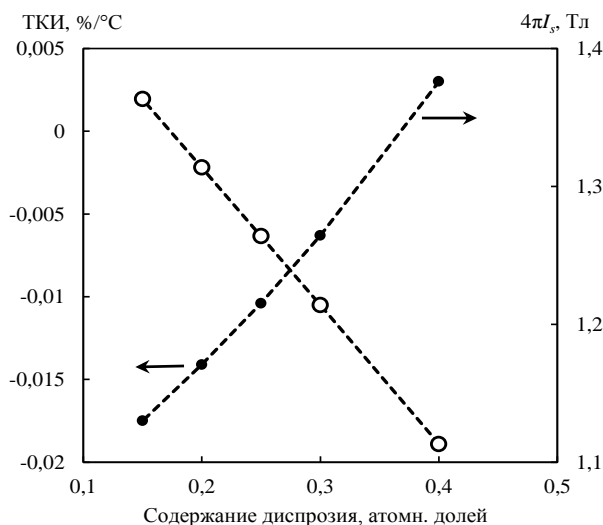


Рис. 1. Зависимость величины ТКИ в диапазоне температур $-60\div+100$ °C и намагниченности насыщения при 20 °C спеченного материала $(\text{Pr}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Gd}_{0,10})-(\text{Fe}_{0,65}\text{Co}_{0,35})-\text{B}$ от содержания диспрозия

На рис. 2 представлена вычисленная величина ТКИ в диапазоне температур $-60\div+100$ °C и намагниченность насыщения при температуре 20 °C в материале состава $(\text{Pr}_{0,50}\text{Dy}_{0,40}\text{Gd}_{0,10})-(\text{Fe}_{1-y}\text{Co}_y)-\text{B}$ от содержания кобальта.

На рис. 3 представлены кривые размагничивания по намагниченности и индукции для спеченных материалов $(\text{Pr}_{0,31}\text{Dy}_{0,58}\text{Gd}_{0,10})_{12,81}(\text{Fe}_{0,80}\text{Co}_{0,20})_{80,94}\text{B}_{6,25}$ и $(\text{Pr}_{0,33}\text{Dy}_{0,44}\text{Gd}_{0,22})_{12,69}(\text{Fe}_{0,80}\text{Co}_{0,20})_{81,33}\text{B}_{5,98}$ при комнатной температуре. Величина коэффициента прямоугольности (SF) кривой размагничивания для материала

$(Pr_{0,31}Dy_{0,58}Gd_{0,10})_{12,81}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{80,94}B_{6,25}$ составляет 0,22, а для материала $(Pr_{0,33}Dy_{0,44}Gd_{0,22})_{12,69}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{81,33}B_{5,98}$ – $SF = 0,47$. Расчетные температурные зависимости намагниченности этих материалов представлены на рис. 4.

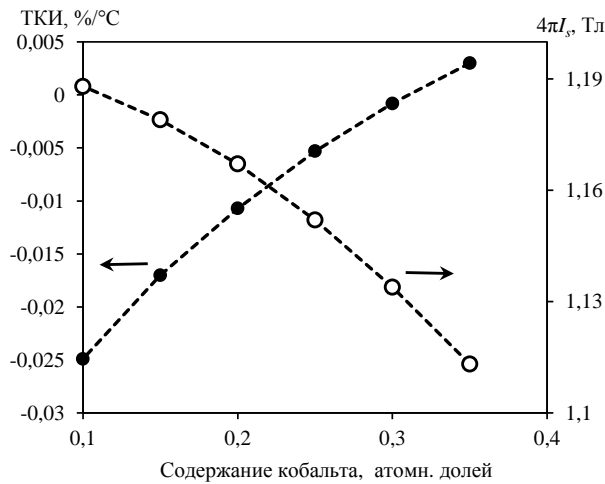


Рис. 2. Зависимость величины ТКИ в диапазоне температур $-60 \div +100$ °С и намагниченности насыщения при 20 °С спеченного материала $(Pr_{0,50}Dy_{0,40}Gd_{0,10})-(Fe_{1-y}Co_y)-B$ от содержания кобальта

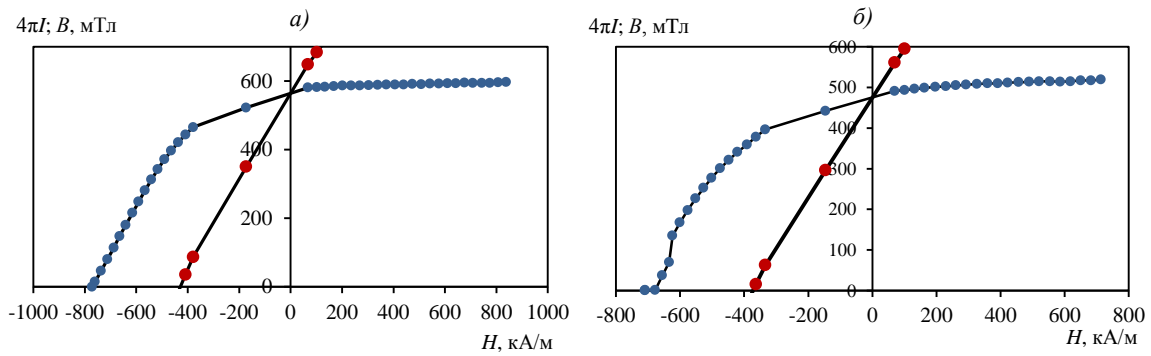


Рис. 3. Кривые размагничивания по намагниченности $4\pi I$ (●) и по индукции B (●) спеченных материалов составов $(Pr_{0,31}Dy_{0,58}Gd_{0,10})_{12,81}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{80,94}B_{6,25}$ (а) и $(Pr_{0,33}Dy_{0,44}Gd_{0,22})_{12,69}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{81,33}B_{5,98}$ (б) при температуре 20 °С

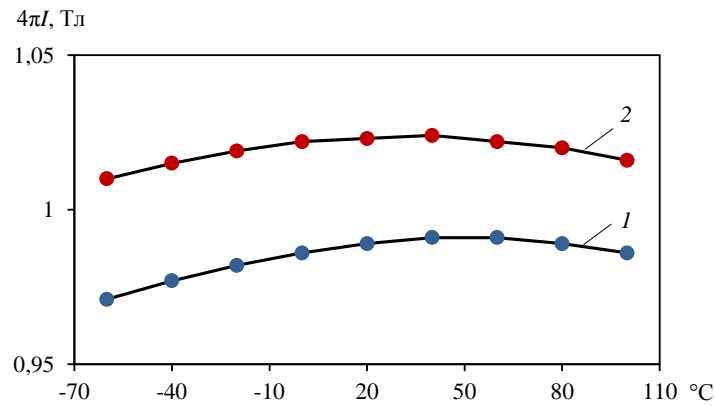


Рис. 4. Температурные зависимости намагниченности, полученные с помощью расчета для материалов $(Pr_{0,31}Dy_{0,58}Gd_{0,10})_{12,81}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{80,94}B_{6,25}$ (1) и $(Pr_{0,33}Dy_{0,44}Gd_{0,22})_{12,69}(Fe_{0,80}Co_{0,20})_{81,33}B_{5,98}$ (2)

Как видно из данных рис. 4, эти кривые имеют максимум в области температур 20–50 °С. Причем температура этого максимума определяется в основном содержанием диспрозия. У материала $(\text{Pr}_{0,31}\text{Dy}_{0,58}\text{Gd}_{0,10})_{12,81}(\text{Fe}_{0,80}\text{Co}_{0,20})_{80,94}\text{B}_{6,25}$ максимум наблюдается при температуре 50 °С, а у материала $(\text{Pr}_{0,33}\text{Dy}_{0,44}\text{Gd}_{0,22})_{12,69}(\text{Fe}_{0,80}\text{Co}_{0,20})_{81,33}\text{B}_{5,98}$ — при 40 °С. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Свойства исследованных магнитов

Состав материала, атомн. долей	H_{cl} , кА/м	H_{cb} , кА/м	B_r , мТл	SF*
$(\text{Pr}_{0,31}\text{Dy}_{0,58}\text{Gd}_{0,10})_{12,81}(\text{Fe}_{0,80}\text{Co}_{0,20})_{80,94}\text{B}_{6,25}$	772	437	648	0,22
$(\text{Pr}_{0,33}\text{Dy}_{0,44}\text{Gd}_{0,22})_{12,69}(\text{Fe}_{0,80}\text{Co}_{0,20})_{81,33}\text{B}_{5,98}$	709	363	461	0,47

* Характеризует прямоугольность кривой размагничивания.

Как видно из данных рис. 3, прямоугольность кривой размагничивания определяется содержанием диспрозия, а не гадолиния. При уменьшении содержания диспрозия (сумма диспрозия и гадолиния не меняется) величина SF увеличивается в ~2 раза. Полученные расчетные и экспериментальные данные представлены в табл. 3 для каждого рассмотренного состава.

Таблица 3

Расчетные и экспериментальные данные величины температурного коэффициента индукции (ТКИ) в области температур 20–100 °С в зависимости от состава спеченного материала

Состав материала, атомн. долей	ТКИ, %/°С		Разница между расчетом и экспериментом
	эксперимент	расчет	
$(\text{Pr}_{0,31}\text{Dy}_{0,58}\text{Gd}_{0,10})_{12,81}(\text{Fe}_{0,80}\text{Co}_{0,20})_{80,94}\text{B}_{6,25}$	–0,001	–0,0043	0,0033
$(\text{Pr}_{0,33}\text{Dy}_{0,44}\text{Gd}_{0,22})_{12,69}(\text{Fe}_{0,80}\text{Co}_{0,20})_{81,33}\text{B}_{5,98}$	–0,01	–0,01	0
$(\text{Pr}_{0,33}\text{Dy}_{0,34}\text{Gd}_{0,33})_{12,55}(\text{Fe}_{0,80}\text{Co}_{0,20})_{81,74}\text{B}_{5,71}$	–0,015	–0,010	0,005
$(\text{Pr}_{0,50}\text{Dy}_{0,45}\text{Gd}_{0,05})_{13,67}(\text{Fe}_{0,76}\text{Co}_{0,24})_{79,13}\text{B}_{7,2}$	–0,02	–0,017	0,003
$(\text{Pr}_{0,44}\text{Dy}_{0,45}\text{Gd}_{0,10})_{13,88}(\text{Fe}_{0,76}\text{Co}_{0,24})_{78,94}\text{B}_{7,18}$	–0,011	–0,013	0,002
$(\text{Pr}_{0,39}\text{Dy}_{0,45}\text{Gd}_{0,15})_{14,06}(\text{Fe}_{0,76}\text{Co}_{0,24})_{78,78}\text{B}_{7,16}$	–0,0093	–0,0090	0,0003
$(\text{Pr}_{0,37}\text{Dy}_{0,45}\text{Gd}_{0,19})_{14,2}(\text{Fe}_{0,76}\text{Co}_{0,24})_{78,65}\text{B}_{7,15}$	–0,007	–0,006	0,001
$(\text{Pr}_{0,40}\text{Dy}_{0,50}\text{Gd}_{0,10})_{12,98}(\text{Fe}_{0,70}\text{Co}_{0,30})_{80,99}\text{B}_{6,03}$	–0,0042	–0,0005	0,0037
$(\text{Pr}_{0,42}\text{Dy}_{0,38}\text{Gd}_{0,20})_{12,89}(\text{Fe}_{0,70}\text{Co}_{0,30})_{81,30}\text{B}_{5,81}$	–0,012	–0,0050	0,007
$(\text{Pr}_{0,41}\text{Dy}_{0,44}\text{Gd}_{0,15})_{12,94}(\text{Fe}_{0,70}\text{Co}_{0,30})_{81,14}\text{B}_{5,92}$	–0,010	–0,0029	0,0071
$(\text{Pr}_{0,44}\text{Dy}_{0,26}\text{Gd}_{0,30})_{12,78}(\text{Fe}_{0,70}\text{Co}_{0,30})_{81,64}\text{B}_{5,58}$	–0,012	–0,009	0,003
$(\text{Pr}_{0,51}\text{Dy}_{0,29}\text{Gd}_{0,21})_{12,78}(\text{Fe}_{0,64}\text{Co}_{0,36})_{81,52}\text{B}_{5,7}$	–0,014	–0,0072	0,0068
$(\text{Pr}_{0,52}\text{Dy}_{0,18}\text{Gd}_{0,30})_{12,94}(\text{Fe}_{0,64}\text{Co}_{0,36})_{81,56}\text{B}_{5,5}$	–0,03	–0,010	0,02

В работе [17] показано, что в соединении $\text{Dy}_2(\text{Fe}_{1-y}\text{Co}_y)_{14}\text{B}$ при $y > 0,57$ фаза 2-14-1 распадается на фазы 2-17, 1-4-1 и сумму переходных металлов железа и кобальта. Материал $(\text{Pr}_{0,31}\text{Dy}_{0,58}\text{Gd}_{0,10})_{12,81}(\text{Fe}_{0,80}\text{Co}_{0,20})_{80,94}\text{B}_{6,25}$ достаточно близок по составу к фазе 2-14-1. По-видимому, в некоторых областях зерен основной магнитной фазы содержание диспрозия и кобальта превышает критическое значение, и в этих областях фаза 2-14-1 распадается с выделением фазы на основе железа и кобальта с малой величиной поля анизотропии. Данная фаза может служить зародышем обратной намагниченности, поскольку она имеет слабое поле анизотропии. Именно поэтому спеченный материал $(\text{Pr}_{0,31}\text{Dy}_{0,58}\text{Gd}_{0,10})_{12,81}(\text{Fe}_{0,80}\text{Co}_{0,20})_{80,94}\text{B}_{6,25}$, имея более высокое содержание диспрозия, незначительно превышает по коэрцитивной силе материал $(\text{Pr}_{0,33}\text{Dy}_{0,44}\text{Gd}_{0,22})_{12,69}(\text{Fe}_{0,80}\text{Co}_{0,20})_{81,33}\text{B}_{5,98}$ (табл. 2) и имеет более низкое значение

прямоугольности кривой размагничивания. В работе [18] отмечено, что диспрозий неравномерно распределен по объему магнита, а значит и в фазе 2-14-1. Таким образом, легирование диспрозием при высоком содержании кобальта нежелательно. Необходим металл, для которого соединение 2-14-1 с кобальтом (без железа) существует, этот металл – тербий. Существенным преимуществом тербия является меньшее значение магнитного момента $9\mu_B$ против значения $10\mu_B$ у диспрозия, а также максимальное значение поля анизотропии в соединении 2-14-1 [19, 20]. Кроме того, соединение $Tb_2Co_{14}B$ существует и имеет величину поля анизотропии (H_A) при комнатной температуре (295 К) $H_A = 11200$ кА/м [20] против значения 10240 кА/м – для соединения $Dy_2(Fe_{0,43}Co_{0,57})_{14}B$ (а это – максимально возможная концентрация кобальта) [17]. Следует обратить внимание на то, что, согласно данным работы [21], ТКИ материалов системы Sm–Co (наименование в России: КСГЭ-26 (ТУ 48-0531-394-88, 1988 г.), КСДГ-25 (ТУ 48-0531-468-94, 2002 г.) и КС 25ДЦ (ТУ 48-4/0531-692, 2007 г.)) в зависимости от состава и технологии изготовления имеет величину в диапазоне температур – $50 \div +150$ °С на уровне $+0,0061 \div -0,0003$ %/°С. Однако из этих материалов невозможно изготавливать цельные кольцевые магниты с радиальной текстурой для динамически настраиваемых гироскопов, поэтому для авиационной техники они бесполезны.

Заключения

Методом молекулярного поля рассчитаны температурные зависимости намагниченности спеченных материалов системы Pr–Dy–Fe–Co–B. Разработанный расчет достаточно хорошо описывает экспериментальные результаты.

Получены экспериментальные данные о температурных зависимостях исследуемых сплавов. Установлено, что разработанный метод расчета точно предсказывает результаты экспериментов. Анализ концентрационных зависимостей намагниченности от содержания кобальта и диспрозия показывает, что подбор концентраций этих элементов позволит значительно уменьшить температурный коэффициент индукции и создать термически стабильные магниты, не изменяющие своей намагниченности в широком температурном диапазоне, требуемом при эксплуатации современных гироскопов.

Список источников

1. 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.
2. Фатеев В.В., Подчерцев В.П., Лютый М.Н. Вибрационный датчик угловой скорости // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. 1999. № 1 (33). С. 59–68.
3. Колосов Ю.А., Ляховецкий Ю.Г., Рахтеенко Е.Р. Гироскопические системы. Проектирование гироскопических систем. М.: Высшая школа, 1977. 233 с.
4. Дубинин А.В. Повышение ресурса газодинамической опоры малогабаритного динамически настраиваемого гироскопа для космических аппаратов: дис. ... канд. техн. наук. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 118 с.
5. Динамически настраиваемый гироскоп: пат. 2248524 Рос. Федерация; заявл. 29.04.04; опубл. 20.03.05.
6. Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г. Материаловедение. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 648 с.
7. Матвеев В.А., Подчерцев В.П., Фатеев В.В. Гироскопические стабилизаторы на динамически настраиваемых вибрационных гироскопах. М.: Машиностроение, 1988. 263 с.
8. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение, 1985. 472 с.
9. Пельпор Д.С., Матвеев В.А., Арсеньев В.Д. Динамически настраиваемые гироскопы. Теория и конструкция. М.: Машиностроение, 1988. 263 с.

10. 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. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-1-1579.
11. 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.
12. 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: 12.08.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-59-66.
13. 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://viam-works.ru> (дата обращения: 15.08.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-108-117.
14. Королев Д.В., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Бакрадзе М.М., Дворецкая Е.В., Коплак О.В., Моргунов Р.Б. Инженерия редкоземельных микромагнитов RE–TM–B (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 05. URL: <https://journal.viam.ru> (дата обращения: 15.08.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-44-60.
15. Каблов Е.Н., Пискорский В.П., Бурханов Г.С., Валеев Р.А., Моисеева Н.С. и др. Термостабильные кольцевые магниты с радиальной текстурой на основе Nd(Pr)–Dy–Fe–Co–B // Физика и химия обработки материалов. 2011. № 3. С. 43–47.
16. Li H.-S., Zhang Z.-W., Dang M.-Z. Molecular field theory analysis of $R_2Fe_{14}B$ intermetallic compounds // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1988. Vol. 71. P. 355–358.
17. Pedziwiatr A.T., Wallace W.E. Structure and magnetism of the $R_2Fe_{14-x}Co_xB$ ferromagnetic systems (R = Dy and Er) // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1987. Vol. 66. P. 61–68.
18. Tenaud Ph., Lemaire H., Vial F. Recent improvements in NdFeB sintered magnets // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1991. Vol. 101. P. 328–332.
19. Radwanski R.J., Franse J.J. M. Rare-earth in the magnetocrystalline anisotropy energy in $R_2Fe_{14}B$ // Journal of Physical Review B. 1987. Vol. 36. No. 16. P. 8616–8621.
20. Petziwiatr A.T., Chen H.Y., Wallace W.E. Magnetism of $Tb_2Fe_{14-x}Co_xB$ system // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1987. Vol. 67. P. 311–315.
21. Marinescu M., McGinnis K., Liu J.F., Walmer M.H. 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 (Sept. 8–10, 2008). Crete, 2008. P. 1–6.

References

1. Topilskaya S.V., Borodulin D.S., Korniyukhin A.V. An experimental assessment of acceptable mechanical influences on a dynamically customizable gyroscope. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Priborostroyeniye*, 2018, no. 4, pp. 69–79. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-4-69-79.
2. Fateev V.V., Nedezertsev V.P., Lyut M.N. Vibration sensor of angular velocity. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Priborostroyeniye*, 1999, no. 1 (33), pp. 59–68.
3. Kolosov Yu.A., Lyakhovetsky Yu.G., Rakhtenko E.R. *Gyroscopic systems. Design of gyroscopic systems*. Moscow: Higher School, 1977, 233 p.
4. Dubinin A.V. *Improving the resource of a gas-dynamic support of a small -sized dynamically customizable gyroscope for spacecraft*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow: Publishing House of Bauman MSTU, 2015, 118 p.
5. *Dynamically adjustable gyroscope*: pat. 2248524 Rus. Federation; filed 29.04.04; publ. 20.03.05.
6. Arzamasov B.N., Makarova V.I., Mukhin G.G. *Materials Science*. Moscow: Publishing House of Bauman MSTU, 2008, 648 p.
7. Matveev V.A., Podchezertsev V.P., Fateev V.V. *Gyroscopic stabilizers on dynamically customized vibrational gyroscopes*. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 263 p.
8. Timoshenko S.P. *Fluctuations in engineering*. Moscow: Mashinostroenie, 1985, 472 p.

9. Pelpor D.S., Matveev V.A., Arsenyev V.D. *Dynamically customized gyroscopes. Theory and design*. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 263 p.
10. Chirkin D.S., Roslovets P.V., Tatarinov F.V., Novikov L.Z. Reducing the drift of a dynamically customized gyroscope from launch to launch. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*, 2017, no. 1. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-1-1579.
11. 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.
12. Piskorskiy V.P., Valeev R.A., Korolev D.V., Morgunov R.B., Rezhichikova 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: August 12, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-59-66.
13. 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: August 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-108-117.
14. Korolev D.V., Piskorskii V.P., Valeev R.A., Bakradze M.M., Dvoretzkaya E.V., Koplak O.V., Morgunov R.B. Rare-earth RE–TM–B micromag-nets engineering (review). *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 15, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-44-60.
15. Kablov E.N., Piskorskiy V.P., Burkhanov G.S., Valeev R.A., Moiseeva N.S. et al. Thermostable ring magnets with a radial texture based on ND (PR)–DY–FE–CO–B. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2011, no. 3, pp. 43–47.
16. Li H.-S., Zhang Z.-W., Dang M.-Z. Molecular field theory analysis of $R_2Fe_{14}B$ intermetallic compounds. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1988, vol. 71, pp. 355–358.
17. Pedziwiatr A.T., Wallace W.E. Structure and magnetism of the $R_2Fe_{14-x}Co_xB$ ferromagnetic systems (R = Dy and Er). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1987, vol. 66, pp. 61–68.
18. Tenaud Ph., Lemaire H., Vial F. Recent improvements in NdFeB sintered magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1991, vol. 101, pp. 328–332.
19. Radwanski R.J., Franse J.J. M. Rare-earth in the magnetocrystalline anisotropy energy in $R_2Fe_{14}B$. *Journal of Physical Review B*, 1987, vol. 36, no. 16, pp. 8616–8621.
20. Petziwiatr A.T., Chen H.Y., Wallace W.E. Magnetism of $Tb_2Fe_{14-x}Co_xB$ system. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1987, vol. 67, pp. 311–315.
21. Marinescu M., McGinnis K., Liu J.F., Walmer M.H. 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*. Crete, 2008, pp. 1–6.

Информация об авторах

Королев Дмитрий Викторович, старший научный сотрудник, д.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Моргунов Роман Борисович, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Пискорский Вадим Петрович, заместитель начальника лаборатории по науке, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Dmitry V. Korolev, Senior Researcher, Doctor of Sciences (Phys. & Math.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Roman B. Morgunov, Leading Researcher, Doctor of Sciences (Phys. & Math.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vadim P. Piskorskiy, Deputy Head of Laboratory of Science, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 01.09.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 06.09.2022.

The article was submitted 01.09.2022; approved and accepted for publication after reviewing 06.09.2022.