

УДК 621.313.84:62-752.4

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-89-94

Е.Н. Каблов¹, О.Г. Оспенникова¹, В.П. Пискорский¹,
Р.А. Валеев¹, И.И. Резчикова¹, А.В. Бузенков¹

КОЛЬЦЕВЫЕ МАГНИТЫ С РАДИАЛЬНОЙ ТЕКСТУРОЙ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКИ НАСТРАИВАЕМЫХ ГИРОСКОПОВ

Основными приборами для инерциальной навигации, в конструкцию которых включены магниты, являются динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ) и акселерометры. Кольцевой магнит с радиальной текстурой (КМРТ) является оптимальной конструкцией магнита для динамически настраиваемых гироскопов (ДНГ). Приведены технология изготовления КМРТ и методы их контроля. Предложен расчет усадки кольцевого магнита с радиальной текстурой, поля на его оси и угла наклона текстуры в его плоскости. На примере материала состава, % атомн.: $(Nd_{0,93}Dy_{0,07})_{15,5}(Fe_{0,99}Co_{0,01})_{ост}Al_{1,1}Ti_{1,3}B_{6,7}$, показано совпадение теоретического расчета параметров с экспериментом. Установлено, что основная неоднородность текстуры расположена в области кольца, прилегающей к его внутреннему диаметру.

Ключевые слова: кольцевой магнит с радиальной текстурой, динамически настраиваемый гироскоп, радиальная текстура.

Magnets are used as components of dynamically tuned gyroscopes (DTG) and accelerometers, which are the basic devices for the inertial navigation. An optimum design of magnets for dynamically tuned gyroscopes (DTG) is a ring magnet with radial texture (RMRT). The article is focused on the production technology of RMRTs and methods of their control. Calculations of the shrinkage of a ring magnet with radial texture, the field at the axis and texture inclination angle in its plane have been made. It was demonstrated that theoretical calculations of parameters are closely correlated with experimental data for the material of the following composition (%at.): $(Nd_{0,93}Dy_{0,07})_{15,5}(Fe_{0,99}Co_{0,01})_{rest}Al_{1,1}Ti_{1,3}B_{6,7}$. It was found out that the main inhomogeneity of the texture is located in the area adjacent to the inner diameter of the ring.

Keywords: ring magnet with radial texture, dynamically tuned gyroscope, radial texture.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Инерциальная навигация – метод навигации для определения координат и параметров движения различных объектов (судов, самолетов, ракет и др.), а также управления их движением, основанный на свойствах инерции тел и являющийся автономным, т. е. не требующим наличия внешних ориентиров или поступающих извне сигналов. Составными частями любой инерциальной навигационной системы являются блок чувствительных элементов (акселерометров и гироскопов) и вычислитель, в котором реализуется навигационный алгоритм. Динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ) принадлежат к классу гироскопов с упругим подвесом ротора, в которых свобода угловых движений оси собственного вращения обеспечивается за счет упругой податливости конструктивных элементов (например, торсионов). В ДНГ за счет подбора моментов инерции рамок подвеса и угловой скорости вращения ротора осуществляется компенсация упругих моментов подвеса, приложенных к ротору. Оптимальной конструкцией магнита для ДНГ является кольцевой магнит с радиальной текстурой (КМРТ) [1–15]. КМРТ – это магнит с конкретной

геометрией, которую необходимо контролировать. Однако контроль возможен только для магнитов простой геометрии – например, в форме призмы. Кроме того, для изготовления КМРТ необходимы достаточно сложные пресс-формы, при изготовлении которых необходимо учитывать усадку заготовки при спекании. Усадка зависит от состава материала и условий прессования. В данной статье рассматриваются технология КМРТ и методы их контроля.

Материалы и методы

В данной работе исследован материал следующего состава, % (атомн.): $(Nd_{0,93}Dy_{0,07})_{15,5}(Fe_{0,99}Co_{0,01})_{ост}Al_{1,1}Ti_{1,3}B_{6,7}$. Сплав выплавлен в вакуумной индукционной печи по обычной методике [16–18]. Слитки дробили до размера частиц <630 мкм в инертной атмосфере. Тонкий помол проводили в центробежно-планетарной мельнице в среде трифтортрихлорэтана. Заготовки магнитов в виде кольцевых магнитов прессовали в радиальном магнитном поле 800 кА/м методом «влажного» прессования. Спекание проводили в вакуумной печи СНВЭ 1.3.1/16-ИЗ при температуре 1150°C в течение 1 ч.

Результаты

Величина усадки после спекания магнитов системы Nd–Fe–В вдоль оси текстуры всегда больше, чем в направлении перпендикулярно этой оси [19]. В соответствии с этим расчет размеров пресс-формы (а значит, и усадки) для магнитов простых форм (в виде призмы) не представляет сложности. Величина усадки уменьшается с увеличением давления прессования, увеличивается с увеличением температуры спекания, а также зависит от состава материала. Публикации, в которых приводятся данные по величине усадки заготовок КМРТ, отсутствуют.

Пусть величина усадки призмы определяется следующими соотношениями:

$$a = \varepsilon_1 A; \tag{1}$$

$$b = \varepsilon_2 B, \tag{2}$$

где A, B – размеры пресс-заготовки в направлениях параллельно и перпендикулярно оси текстуры; a, b – размеры заготовки после спекания; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – параметры усадки заготовки в направлениях параллельно и перпендикулярно оси текстуры.

Рассмотрим бесконечно малый элемент площади КМРТ в его плоскости (рис. 1).

Для площади кольца (R_1, R_2 – внутренний и наружный радиусы кольца) справедливо выражение:

$$S = \int_0^{2\pi R_2} \int_{R_1}^R r \cdot dr \cdot d\varphi = \pi(R_2^2 - R_1^2). \tag{3}$$

Умножим обе части выражения (3) на $\varepsilon_1 \varepsilon_2$:

$$S \varepsilon_1 \varepsilon_2 = \pi [(\sqrt{\varepsilon_1} \varepsilon_2 R_2)^2 - (\sqrt{\varepsilon_1} \varepsilon_2 R_1)^2]. \tag{4}$$

Но в выражении $\int_0^{2\pi R_2} \int_{R_1}^R \varepsilon_2 r d\varphi \cdot \varepsilon_1 dr$ величины $\varepsilon_2 r d\varphi$

и $\varepsilon_1 dr$ означают размеры бесконечно малого элемента кольца после усадки. Поскольку элемент площади бесконечно малый, его можно считать прямоугольным. Следовательно, в соответствии с выражениями (3) и (4) размеры внутреннего и наружного радиуса кольца после усадки (R') одинаковы и записываются с помощью выражения:

$$R' = \sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_2} R = \varepsilon R. \tag{5}$$

Для большинства магнитов простых геометрических форм рассчитаны формулы, связывающие поле в какой-либо точке пространства вокруг магнита с его намагниченностью в рабочей точке ($4\pi I_{p,t}$). В общем случае можно записать

$$H = K \cdot 4\pi I_{p,t}, \tag{6}$$

где K – коэффициент, зависящий только от геометрических размеров магнита.

Рассмотрим КМРТ в цилиндрической системе координат (рис. 2). Наличие радиальной текстуры приводит к появлению отрицательных объемных магнитных зарядов с плотностью ρ :

$$\rho = -\operatorname{div} \vec{I} = -\frac{|\vec{I}|}{r} \tag{7}$$

и поверхностных с плотностью σ :

$$\sigma = \pm |\vec{I}|, \tag{8}$$

где знак + (плюс) соответствует внешнему радиусу кольца (R_2), а знак - (минус) – внутреннему радиусу (R_1).

В соответствии с законом Кулона для магнитных зарядов [20], поле, создаваемое объемным или поверхностным зарядом (dP) на расстоянии, определяемом радиус-вектором (\vec{R}), может быть вычислено по формуле:

$$dH = \frac{\vec{R} dP}{R \cdot R^2}. \tag{9}$$

С помощью принятых на рис. 2 обозначений можно записать выражения для поверхностных зарядов, расположенных в точке P :

$$dH_\sigma = \frac{IR_2 d\varphi \cdot dZ}{R}, \tag{10}$$

и для объемных, расположенных в точке O :

$$dH_\rho = \frac{Ir \cdot dr \cdot d\varphi \cdot dZ}{rR}, \tag{11}$$

где R – расстояние от выбранной точки (P или O) до точки на оси кольца z_1 .

Опуская несложные промежуточные выкладки, можно показать, что Z -составляющая поля, создаваемого в точке z_1 поверхностными зарядами, расположенными на поверхности КМРТ с радиусом R_2 , может быть вычислена по формуле:

$$H_\sigma(z_1) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^h \frac{(z_1 - z) IR_2}{[(z_1 - z)^2 + R_2^2]^{3/2}} dz, \tag{12}$$

а объемными:

$$H_\rho(z_1) = - \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^h dz \int_{R_1}^{R_2} \frac{(z_1 - z) I}{[(z_1 - z)^2 + r^2]^{3/2}} dr, \tag{13}$$

где h – высота магнита.

Для нахождения Z -составляющей поля в точке z_1 , создаваемого поверхностными зарядами, расположенными на внутренней поверхности КМРТ (R_1), в формуле (12) нужно изменить знак и заменить R_2 на R_1 . Интегралы (12) и (13) вычислены аналитически. Можно показать, что формулы могут быть записаны следующим образом:

$$H(z) = \frac{1}{2} 4\pi I_{p,t} \cdot kR(z), \tag{14}$$

где

$$kR(z) = k_\sigma + k_\rho; \tag{15}$$

$$k_\sigma(z) = \frac{B(D_2, z) - A(D_2, z)}{B(D_2, z) \cdot A(D_2, z)} - \frac{B(D_1, z) - A(D_1, z)}{B(D_1, z) \cdot A(D_1, z)}; \tag{16}$$

$$k_p(z) = \ln \frac{[1+B(D_2, z)][1+A(D_1, z)]}{[1+A(D_2, z)][1+B(D_1, z)]}, \quad (17)$$

где введены обозначения:

$$A(D, z) = \left[1 + \left(\frac{h}{D} \right)^2 \left(\frac{z}{h/2} - 1 \right)^2 \right]^{1/2}; \quad (18)$$

$$B(D, z) = \left[1 + \left(\frac{h}{D} \right)^2 \left(\frac{z}{h/2} + 1 \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (19)$$

а расстояние z теперь отсчитывается от центра кольца. В формулах (16)–(19): h, D_2, D_1 – высота, наружный и внутренний диаметр КМРТ соответственно.

Графики зависимости $kR(z)$ и $kA(z)$ представлены на рис. 3. Видно, что зависимость $kR(z)$ (а значит, и поле на оси) с точностью до знака является симметричной функцией относительно плоскости симметрии, проходящей через центр кольца. Предположим, что текстура кольца не является строго радиальной, а отклоняется от плоскости (рис. 4). В этом случае аксиальная составляющая намагниченности I_A будет также давать свой вклад в поле на оси кольца. Зависимость Z -составляющей поля на оси кольца с аксиальной текстурой известна и приведена в монографии [21]. В принятых в данной статье обозначениях она может быть представлена следующим образом:

$$H(z) = \frac{1}{2} 4\pi I_{p.t} \cdot kA(z), \quad (20)$$

где коэффициент $kA(z)$ записан как

$$kA(z) = \left(\frac{h}{D_2} \right) \left[\frac{\frac{z}{h/2} + 1}{B(D_2, z)} - \frac{\frac{z}{h/2} - 1}{A(D_2, z)} \right] \cdot \left(\frac{h}{D_1} \right) \left[\frac{\frac{z}{h/2} + 1}{B(D_1, z)} - \frac{\frac{z}{h/2} - 1}{A(D_1, z)} \right]. \quad (21)$$

Рассмотрим поля, создаваемые составляющими намагниченности I_R и I_Z на оси кольца. Видно (см. рис. 4), что суммарные составляющие поля в точках z и $-z$ будут отличаться по абсолютной величине:

$$H(z) = H_R(z) + H_A(z); \quad (22)$$

$$H(-z) = H_R(-z) + H_A(-z), \quad (23)$$

где $H(z), H(-z)$ – суммарные Z -составляющие поля на оси в точках z и $-z$; H_R и H_A – поля на оси, создаваемые радиальной и аксиальной составляющими намагниченности соответственно.

Следует подчеркнуть, что формулы (22) и (23) справедливы в области максимумов зависимости $kR(z)$ (т. е. именно в тех точках, где обычно контролируют КМРТ), когда величина $|I_A| \ll |I_R|$. На основании выражений (22) и (23) в точках $z = z_{\max}$, где H_R является максимальной по абсолютной величине, можно записать:

$$H_A(z_{\max}) = \frac{1}{2} [H(z_{\max}) - H(-z_{\max})]; \quad (24)$$

$$H_R(z_{\max}) = \frac{1}{2} [H(z_{\max}) + H(-z_{\max})]. \quad (25)$$

Легко показать, что

$$4\pi I_{p.t}^A = \frac{2H_A(z_{\max})}{kA(z_{\max})}; \quad (26)$$

$$4\pi I_{p.t}^R = \frac{2H_R(z_{\max})}{kR(z_{\max})}. \quad (27)$$

Откуда получаем соотношение между измеряемыми параметрами полей на оси и углом отклонения текстуры α

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{I_{p.t}^A}{I_{p.t}^R} = \frac{kR(z_{\max})}{kA(z_{\max})} \cdot \frac{H_A(z_{\max})}{H_R(z_{\max})}. \quad (28)$$

Подчеркнем, что формула (28) справедлива только в том случае, когда максимумы поля на оси кольца определяются радиальной составляющей намагниченности.

После спекания заготовок состава $(\text{Nd}_{0,93}\text{Dy}_{0,07})_{15,5}(\text{Fe}_{0,99}\text{Co}_{0,01})_{\text{ост}}\text{Al}_{1,1}\text{Ti}_{1,3}\text{B}_{6,7}$ усредненные размеры колец составляли: $D_2 = 17,9$ мм, $D_1 = 11,4$ мм. Таким образом, в соответствии с обозначениями (5) параметр усадки колец (ε) составил: 0,86 – по внутреннему диаметру, 0,82 – по наружному, т. е. усадка КМРТ по наружному диаметру составляет 18%, а по внутреннему 14% (на 22% меньше), что, казалось бы, полностью противоречит формуле (5). Однако этот результат легко объяснить искажением текстурирующего магнитного поля в области, прилегающей к внутреннему диаметру пресс-формы.

В таблице представлены результаты измерения угла отклонения текстуры в плоскости КМРТ для идентичных колец, имеющих различные геометрические размеры. Разница в размерах колец достигалась только механической обработкой. Образцы 1–5 соответствуют исходным заготовкам КМРТ после спекания. Как видно из данных таблицы, средний угол наклона текстуры в плоскости кольца $\langle \alpha \rangle$ составляет 6,3 град, что весьма близко к величине угла наклона текстурирующего поля внутри пресс-формы (~5 град), полученного по результатам измерений.

Увеличение внутреннего диаметра D_1 на ~9% без изменения наружного диаметра D_2 приводит к уменьшению величины $\langle \alpha \rangle$ до 4,1 град (образцы 6–13 – см. таблицу). Уменьшение величины D_2 на ~6% (без изменения D_1) дает величину $\langle \alpha \rangle$ 16,1% (образцы 14–16). Следующее увеличение D_1 на 13% (образцы 17–18) уменьшает величину $\langle \alpha \rangle$ до 7,7 град. Дальнейшее увеличение D_1 (образцы 19–20) опять приводит к уменьшению $\langle \alpha \rangle$ до 7,2 град, а дальнейшее уменьшение D_2 (образцы 21–24) приводит к увеличению $\langle \alpha \rangle$ до 12,3 град. Таким образом, результаты, представленные в таблице позволяют сделать следующие выводы:

– угол наклона текстуры в плоскости КМРТ, вычисленный по формуле (28), соответствует эксперименту;

– изменение среднего угла наклона текстуры КМРТ в зависимости от значений D_1 и D_2 позво-

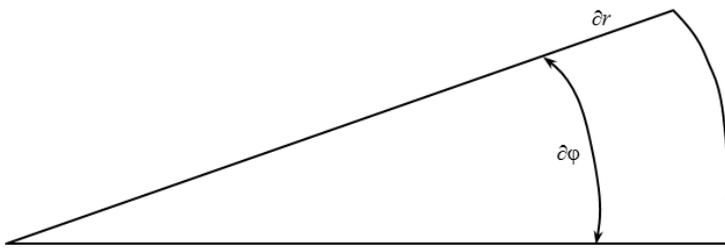


Рис. 1. Бесконечно малый элемент площади в плоскости кольцевого магнита с радиальной текстурой (КМРТ)

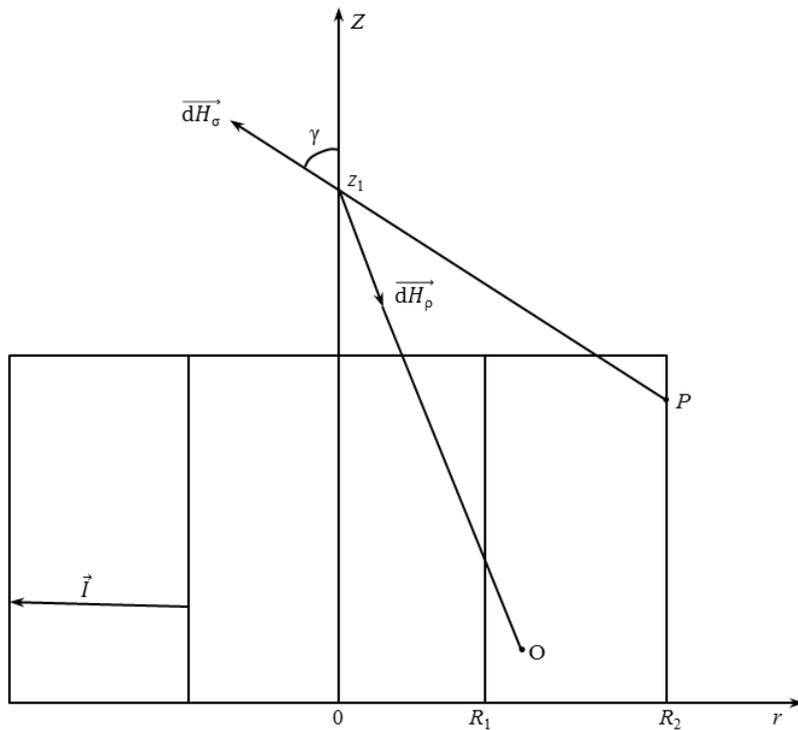


Рис. 2. Поля, создаваемые объемными и поверхностными зарядами в точке z_1 на оси. \vec{dH}_ρ – поле, создаваемое объемными зарядами, расположенными в точке O кольца; \vec{dH}_σ – поле, создаваемое поверхностными зарядами, расположенными в точке P ; γ – угол между направлением поля и осью Z ; I – намагниченность КМРТ

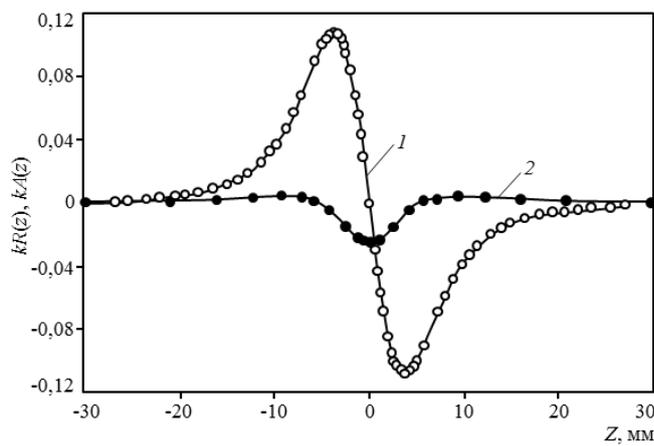


Рис. 3. Зависимость коэффициентов, связывающих Z -составляющую поля на оси кольцевого магнита, от расстояния до его центра (z): 1 – коэффициент $kR(z)$ для кольца с радиальной текстурой; 2 – коэффициент $kA(z)$ для кольца с аксиальной текстурой ($D_1=12,2$ мм; $D_2=16,5$ мм; $h=3,1$ мм)

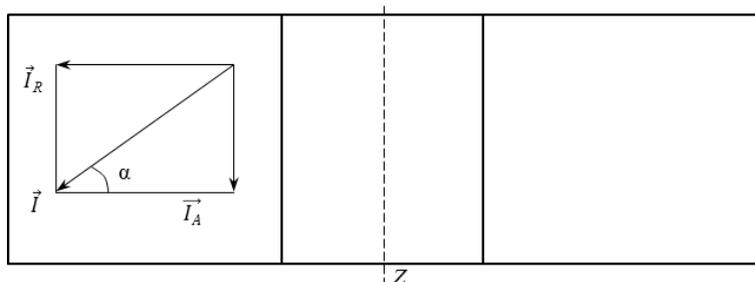


Рис. 4. Кольцевой магнит, текстура которого отклоняется от радиальной оси Z

Результаты контроля совершенства текстуры КМРТ*

Условный номер образца	D_1	D_2	h	H_{\max_1}	H_{\max_2}	z_{\max}	kR_{\max}	kA_{\max}	α
1	11,2	17,5	4,1	92,4	100,6	3,808	0,205	0,064	7,7
2	11,0	17,3	4,8	104,0	110,5	3,872	0,239	0,074	5,6
3	11,1	17,5	4,7	107,0	114,5	3,904	0,234	0,072	6,3
4	11,1	17,4	5,2	113,0	120,5	4,0	0,251	0,075	6,1
5	10,9	17,3	4,8	116,6	109,5	3,856	0,244	0,076	5,8
Среднее значение угла:									6,3
6				58,0	60,8				4,1
7				62,0	60,1				2,7
8				64,1	61,7				3,3
9				63,5	61,0				3,4
10	12,2	17,5	3,0	60,9	64,7	3,776	0,121	0,040	5,3
11				59,0	62,7				5,3
12				62,1	64,3				3,0
13				61,4	57,6				5,5
Среднее значение угла:									4,1
14				71,1	58,7				16,4
15	11,3	16,5	3,5	66,9	55,7	3,616	0,155	0,050	15,8
16				66,7	55,4				16,0
Среднее значение угла:									16,1
17				43,4	40,9				5,3
18	12,8	16,5	3,0	38,5	43,2	3,792	0,086	0,0278	10,1
Среднее значение угла:									7,7
19	13,4	16,4	3,0	30,4	32,4	3,856	0,0672	0,0212	5,8
20	13,3	16,4	3,0	33,7	30,6	3,856	0,0699	0,0226	8,5
Среднее значение угла:									7,2
21				35,1	31,2				10,3
22				35,9	31,6				11,1
23	12,8	15,6	3,0	35,3	30,8	3,696	0,0688	0,0223	11,9
24				35,8	29,8				15,7
Среднее значение угла:									12,3

* D_1 , D_2 , h – внутренний, внешний радиусы кольца и высота соответственно, мм; H_{\max_1} , H_{\max_2} – абсолютные максимальные значения Z -составляющей поля на оси КМРТ по обе стороны от его центра, мТл; z_{\max} – вычисленное значение точки максимума коэффициента kR_{\max} , мм; kA_{\max} – значение коэффициента пропорциональности в точке z_{\max} ; α – угол отклонения текстуры КМРТ от плоскости, град.

ляет однозначно утверждать, что основная неоднородность текстуры расположена в области кольца, прилегающей к его внутреннему диаметру.

Обсуждение и заключения

1. Теоретический расчет размеров усадки КМРТ отличается от экспериментального значения на 22%, что можно объяснить искажением

текстурирующего магнитного поля в области, прилегающей к внутреннему диаметру пресс-формы.

2. Предложенный расчет угла наклона текстуры в плоскости КМРТ соответствует эксперименту.

3. Основная неоднородность текстуры расположена в области кольца, прилегающей к его внутреннему диаметру.

ЛИТЕРАТУРА

- Бурханов Г.С., Пискорский В.П., Терешина И.С., Моисеева Н.С., Давыдова Е.А., Валеев Р.А. Существование области гомогенности по бору магнитотвердой фазы 2-14-1 // ДАН. 2012. Т. 447. №3. С. 277–279.
- Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №8. С. 7–17.
- Пискорский В.П., Бурханов Г.С., Оспенникова О.Г., Валеев Р.А., Терешина И.С., Давыдова Е.А. Влияние термической обработки на свойства наноструктурированных магнитотвердых материалов Pr–Dy–Fe–Co–B // Металлы. 2010. №3. С. 84–91.
- Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 01 (viam-works.ru).
- Чабина Е.Б., Алексеев А.А., Филонова Е.В., Лукина Е.А. Применение методов аналитической микроскопии и рентгеноструктурного анализа для исследования структурно-фазового состояния материалов // Труды ВИАМ. 2013. №5. Ст. 06 (viam-works.ru).

6. Шмотин Ю.Н., Старков Р.Ю., Данилов Д.В., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Новые материалы для перспективного двигателя ОАО «НПО „Сатурн”» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 6–8.
7. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорочкин К.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Методы исследования конструкционных композиционных материалов с интегрированной электромеханической системой //Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 17–20.
8. Каблов Е.Н., Морозов Г.А., Крутиков В.Н., Муравская Н.П. Аттестация стандартных образцов состава сложнолегированных сплавов с применением эталона //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 9–11.
9. Пискорский В.П., Бурханов Г.С., Оспенникова О.Г., Валеев Р.А., Терешина И.С. Эффект Вестендорпа на магнитах Pr(Nd)–Dy–Ce–Fe–Co–B //Перспективные материалы. 2010. №3. С. 22–25.
10. Пискорский В.П., Бурханов Г.С., Оспенникова О.Г., Валеев Р.А., Терешина И.С., Давыдова Е.А. Расчет температурного коэффициента индукции наноструктурированных магнитотвердых материалов Pr–Dy–Gd–Fe–Co–B методом молекулярного поля //Металлы. 2010. №1. С. 64–67.
11. Пискорский В.П., Бурханов Г.С., Мельников С.А., Паршин А.П., Валеев Р.А., Терешина И.С., Иванов С.И. Влияние содержания неодима на свойства наноструктурированных материалов Nd(Pr)–Fe–B, полученных по бинарной технологии //Перспективные материалы. 2010. №9. С. 195–197.
12. Каблов Е.Н., Пискорский В.П., Бурханов Г.С., Валеев Р.А., Моисеева Н.С., Степанова С.В., Петраков А.Ф., Терешина И.С., Репина М.В. Термостабильные кольцевые магниты с радиальной текстурой на основе Nd(Pr)–Dy–Fe–Co–B //Физика и химия обработки материалов. 2011. №3. С. 43–47.
13. Мельников С.А., Пискорский В.П., Беляев И.В., Валеев Р.А., Верклов М.М., Иванов С.И., Оспенникова О.Г., Паршин А.П. Температурные зависимости магнитных свойств спеченных сплавов Nd–Fe–B, легированных сплавами РЗМ с переходными металлами //Перспективные материалы. 2011. №11. С. 201–207.
14. Пискорский В.П., Бурханов Г.С., Оспенникова О.Г., Терешина И.С., Валеев Р.А., Моисеева Н.С. Влияние бора на магнитные свойства магнитов на основе интерметаллидов с тетрагональной структурой //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 143–148.
15. Магнитный материал и изделие, выполненное из него: пат. 2368969 Рос. Федерация; опубл. 27.09.2007.
16. Каблов Е.Н., Петраков А.Ф., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Чабина Е.Б. Влияние церия и иттрия на магнитные свойства и фазовый состав материала системы Nd–Dy–Fe–Co–B //МиТОМ. 2005. №10. С. 25–29.
17. Каблов Е.Н., Петраков А.Ф., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Чабина Е.Б. Влияние празеодима на магнитные свойства и фазовый состав материала системы Nd–Pr–Dy–Fe–Co–B //МиТОМ. 2005. №6. С. 12–16.
18. Каблов Е.Н., Петраков А.Ф., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Назарова Н.В. Влияние диспрозия и кобальта на температурную зависимость намагниченности и фазовый состав материала системы Nd–Pr–Dy–Fe–Co–B //МиТОМ. 2007. №4. С. 3–10.
19. McGuinness P.J., Williams A.J., Harris I.R., Rozendaal E., Ormerod J. Sintering behavior of NdFeB magnets //IEEE Trans. on Magnet. 1989. V. 25. №5. P. 3773–3775.
20. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: Наука. 1976. 616 с.
21. Ягола Г.К., Спиридонов Р.В. Измерение магнитных характеристик современных магнитотвердых материалов. М.: Изд-во стандартов. 1989. 196 с.