

Ограничение допустимой коэрцитивной силы, вызванное полем рассеяния магнита

© Н.С. Моисеева,¹ И.И. Резчикова,^{1,¶} Д.В. Королев,¹ Р.Б. Моргунов,² В.П. Пискорский¹

¹ Всероссийский институт авиационных материалов,
105005 Москва, Россия

² Институт проблем химической физики РАН,
142432 Черноголовка, Россия

¶ e-mail: rezchikovai@mail.ru

Поступило в Редакцию 29 ноября 2018 г.

В окончательной редакции 29 ноября 2018 г.

Принято к публикации 22 января 2019 г.

Показано, что форма образца определяет нижний допустимый предел коэрцитивной силы материала, который может быть использован для изготовления магнита данной формы. На примере колец с радиальной намагниченностью показано, что они могут быть изготовлены только из редкоземельных сплавов, имеющих достаточно высокую коэрцитивную силу для того, чтобы максимально допустимая температура эксплуатации магнита удовлетворяла техническим требованиям.

DOI: 10.21883/JTF.2019.07.47799.413-18

Введение

В навигационной технике используют постоянные магниты для создания поля в рабочем зазоре прибора. Для динамически настраиваемых гироскопов изготавливают кольцевые магниты с радиальной текстурой. Для акселерометров необходимы магниты в виде призм, аксиально намагниченных цилиндров и аксиально намагниченных кольцевых магнитов. Магниты, работающие в открытой магнитной цепи, всегда находятся в размагничивающем поле, создаваемом поверхностными магнитными зарядами на поверхности магнита. Размагничивающее поле зависит от размагничивающего фактора магнита, который, в свою очередь, определяется геометрией магнита. Важно отметить, что максимальная рабочая температура магнита определяется конкуренцией размагничивающего поля и магнитной анизотропии, которая уменьшается с ростом температуры. Поэтому изменение размагничивающего поля, вызванное изменением формы образца, влияет также и на максимальную рабочую температуру магнита. В работе [1] вводится определение максимальной рабочей температуры магнита, как такой температуры, нагрев до которой уменьшает потокосцепление образца на 5%. Для определения рабочей точки проводят измерение потокосцепления образца ψ_1 в катушках Гельмгольца перед нагревом и потокосцепление образца ψ_2 после нагрева и охлаждения до комнатной температуры. Вычисляют величину необратимых потерь L после нагрева по формуле

$$L = ((\psi_1 - \psi_2)/\psi_1) \cdot 100\%. \quad (1)$$

Если после нагрева (и охлаждения до комнатной температуры) величина необратимых потерь достигает 5%, то эта температура называется максимальной рабочей

температурой (T_w) [1]. В работе [1] было установлено, что T_w зависит от геометрии магнита, поскольку от геометрии зависит величина размагничивающего фактора (N).

Под рабочей точкой магнита (P) подразумевается величина [1]:

$$P = \frac{4\pi}{N} - 1. \quad (2)$$

Откуда находим $N = 4\pi/(P + 1)$.

Так, у магнита из материала $\text{Nd}(\text{Fe}_{0.80}\text{Co}_{0.12}\text{B}_{0.08})_{5.5}$ в форме цилиндра и в форме призмы (с величиной $P = 2$) T_w для цилиндра составила 60°C , для призмы 80°C [1]. Величина T_w зависит от температуры Кюри (T_C) и коэрцитивной силы по намагниченности (H_{ci}) [2]. Так, магнит состава $\text{Nd}_{34.5}\text{Dy}_{1.5}\text{Fe}_{61.5}\text{Al}_{1.2}\text{B}_1$ с величиной H_{ci} более 1600 kA/m имел $L = 0.88\%$ при 150°C , а магнит состава $\text{Nd}_{35.4}\text{Fe}_{62.3}\text{B}_{13}$ с $H_{ci} = 704 \text{ kA/m}$ имел $L = 59.21\%$ [2]. Среди современных магнитов высокие значения T_w имеют магниты из сплава Fe-Cr-Co . Их $T_C = 850^\circ\text{C}$, $T_w = 500^\circ\text{C}$ [3]. Магниты ЮНДК (Al-Ni-Co-Fe) имеют $T_C = 890^\circ\text{C}$ и $T_w = 550^\circ\text{C}$ [4,5]. Магниты $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ имеют $T_C = 800^\circ\text{C}$ и $T_w = 300^\circ\text{C}$ [6]. Магниты SmCo_5 имеют $T_C = 725^\circ\text{C}$ и $T_w = 250^\circ\text{C}$ [7]. Таким образом, величина максимальной рабочей температуры магнита определяется его температурой Кюри, коэрцитивной силой по намагниченности и величиной его рабочей точки. Следовательно, для магнитов заданного состава и с известными магнитными характеристиками эксплуатационные свойства зависят только от величины рабочей точки. Следует также отметить, что во всех магнитах за исключением магнитов эллипсоидальной формы величина размагничивающего поля (H_D) неоднородно распределена внутри магнита [8]. Для магнитов разной геометрии величина P может быть вычислена по методике, предложенной в работе [9].

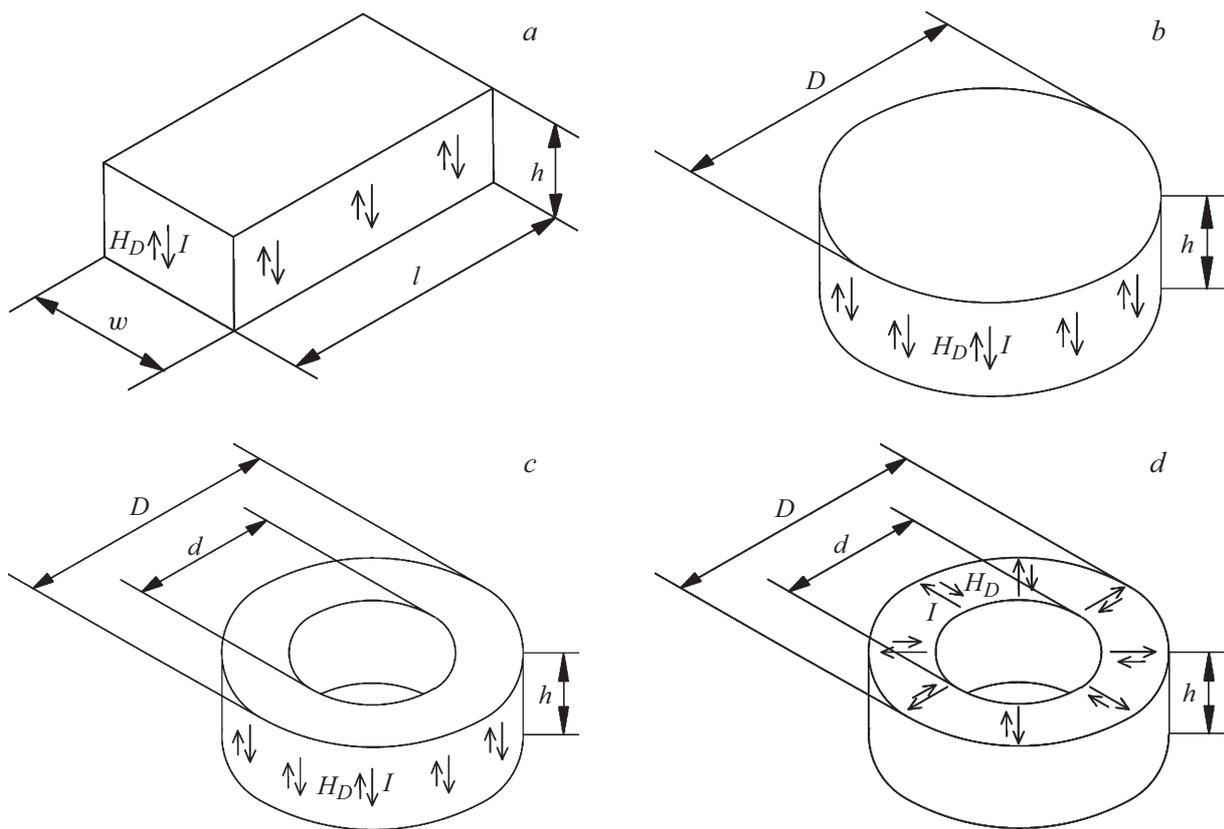


Рис. 1. Геометрия магнитов: *a* — призматический магнит, *b* — цилиндрический магнит с аксиальной текстурой, *c* — кольцевой магнит с аксиальной текстурой, *d* — кольцевой магнит с радиальной текстурой.

В работе [9] показано, что величина рабочей точки может быть записана следующим образом:

$$P = \frac{T}{A} \times \sqrt{\frac{\pi}{2}} S. \quad (3)$$

Здесь T — размер магнита в направлении намагничивания или текстуры, A — площадь среднего сечения магнита перпендикулярно текстуре, S — общая площадь поверхности магнита. Таким образом, не любые материалы могут быть использованы для создания сложных по форме магнитов, так как поле рассеивания может сделать тот или иной материал в принципе непригодным. Настоящая работа посвящена вычислению рабочей точки магнитов различной геометрии и определению тех типов магнитных сплавов, которые пригодны для создания кольцевых магнитов, используемых в прецизионной технике.

Настоящая работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 11.1: „Термостабильные магнитотвердые материалы и математические модели расчета их температурных характеристик для навигационных приборов нового поколения“ („Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года“) [10].

Результаты исследований

На рис. 1 представлены типы магнитов. Приведем результаты вычислений рабочей точки с помощью формулы (3) для нескольких типичных геометрий магнитов:

1. Рабочая точка магнита в форме прямоугольной призмы (рис. 1, *a*) P будет даваться формулой

$$P = 1.77(h/lw)[h(l+w) + lw]^{1/2}, \quad (4)$$

где h — размер призмы в направлении намагничивания или текстуры, l — длина магнита, w — ширина магнита.

2. Для магнита в форме аксиально намагниченного цилиндра (рис. 1, *b*)

$$P = (2h/D)[1 + (2h/D)]^{1/2}, \quad (5)$$

где h — высота цилиндра, D — его диаметр.

3. Магнит в форме аксиально намагниченного кольца (рис. 1, *c*)

$$P = [1.596h/(D^2 - d^2)][(D+d)(D-d+2h)]^{1/2}, \quad (6)$$

где h — высота кольца в направлении текстуры, D — внешний диаметр, d — внутренний диаметр.

4. Магнит в форме радиально намагниченного кольца (рис. 1, *d*) имеет рабочую точку

$$P = [(D-d)/2h(D+d)][D^2 - d^2 + 2h(D+d)]^{1/2}. \quad (7)$$

Здесь D — внешний диаметр кольцевого магнита с радиальной текстурой, d — его внутренний диаметр, а h — высота кольцевого магнита.

Обсуждение результатов исследований

Зная величину рабочей точки, можно определить из каких магнитотвердых материалов они могут быть изготовлены. Рассмотрим этот вопрос на примере кольцевых магнитов с радиальной намагниченностью. Типичный размер кольцевых магнитов для динамически настраиваемых гироскопов составляет $D = 16.5 \text{ mm}$, $d = 12.2 \text{ mm}$, $h = 3 \text{ mm}$. По формуле (7) находим величину рабочей точки $P = 0.43$.

Рабочей точке соответствует величина размагничивающего поля (H_D):

$$H_D = \frac{4\pi I_{wp}}{1 + \frac{B}{H}}. \quad (8)$$

Здесь $4\pi I_{wp}$ намагниченность в рабочей точке кольцевого магнита с радиальной текстурой (КМРТ). Пусть $4\pi I_{wp} = 0.9 \text{ T}$, тогда $H_D = 503 \text{ kA/m}$. Отсюда следует, что КМРТ могут быть изготовлены только из редкоземельных магнитов [11–12]. Это связано с тем, что у магнитов Fe–Cr–Co величина H_{ci} не превышает 88 kA/m [3]. У магнитов ЮНДК величина $H_{ci} = 110–135 \text{ kA/m}$ [13]. У магнитов из материалов системы РЗМ–Fe–Co–В (РЗМ — редкоземельный металл) величина H_{ci} составляет более 800 kA/m [14].

На рис. 2 показана зависимость размагничивающего поля кольцевого магнита с радиальной текстурой от толщины стенки кольца при фиксированных значениях внутреннего диаметра и высоты: $d = 12.2 \text{ mm}$, $h = 3 \text{ mm}$. Из рисунка видно, что размер кольцевого магнита из материала РЗМ–Fe–Co–В не ограничен. Из материалов на основе ЮНДК можно изготавливать кольцевые магниты с радиальной текстурой с толщиной стенки более 16 mm , из материалов на основе Fe–Cr–Co с

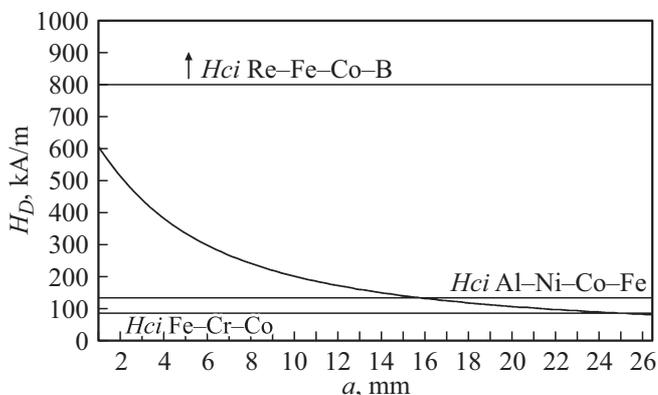


Рис. 2. Зависимость размагничивающего поля кольцевого магнита с радиальной текстурой от толщины стенки кольца при фиксированных значениях внутреннего диаметра и высоты: $d = 12.2 \text{ mm}$, $h = 3 \text{ mm}$.

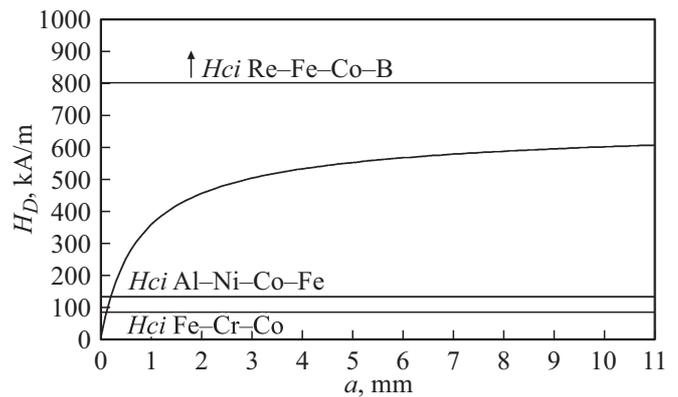


Рис. 3. Зависимость размагничивающего поля кольцевого магнита с радиальной текстурой от высоты кольца при фиксированных значениях внутреннего и внешнего диаметров: $D = 16.5 \text{ mm}$, $d = 12.2 \text{ mm}$.

толщиной стенки более 25 mm при внутренних диаметре и толщине кольца $d = 12.2 \text{ mm}$, $h = 3 \text{ mm}$, однако магниты таких размеров в динамически настраиваемых гироскопах не используются.

На рис. 3 показана зависимость размагничивающего поля кольцевого магнита с радиальной текстурой от высоты кольца при фиксированных значениях внутреннего и внешнего диаметров: $D = 16.5 \text{ mm}$, $d = 12.2 \text{ mm}$. Из рисунка видно, что размер кольцевого магнита из материала РЗМ–Fe–Co–В не ограничен. Из материалов на основе ЮНДК можно изготавливать кольцевые магниты с радиальной текстурой высотой менее 0.2 mm , из материалов на основе Fe–Cr–Co с толщиной стенки высотой менее 0.1 mm внутреннем и внешнем диаметрах: $D = 16.5 \text{ mm}$, $d = 12.2 \text{ mm}$, однако магниты таких размеров в динамически настраиваемых гироскопах не используются и возникают трудности с изготовлением таких магнитов.

Легко показать, используя формулы (4)–(6), что магниты в форме призмы, аксиально намагниченного цилиндра, аксиально намагниченного кольца из материалов Fe–Cr–Co и ЮНДК могут быть изготовлены только с определенным соотношением геометрических размеров, которые и определяют величину размагничивающего поля (см. формулу (8)).

Для типовых размеров магнитов для акселерометров размагничивающее поле представлено ниже.

Для магнитов в виде призм с размерами $h = 4 \text{ mm}$, $l = 8 \text{ mm}$, $w = 5 \text{ mm}$ величина рабочей точки, согласно формуле (4), составляет $P = 1.7$, что соответствует величине размагничивающего поля $H_D = 267 \text{ kA/m}$ при $4\pi I_{wp} = 0.9 \text{ T}$.

Для магнитов в виде цилиндра с размерами $D = 14.5 \text{ mm}$, $h = 4 \text{ mm}$ величина рабочей точки, согласно формуле (5), составляет $P = 0.69$, что соответствует величине размагничивающего поля $H_D = 426 \text{ kA/m}$ при $4\pi I_{wp} = 0.9 \text{ T}$.

Для магнитов в виде аксиально намагниченных колец с размерами $D = 16.5 \text{ mm}$, $d = 12.2 \text{ mm}$, $h = 3 \text{ mm}$ величина рабочей точки, согласно формуле (6), составляет $P = 0.67$, что соответствует величине размагничивающего поля $H_D = 431 \text{ kA/m}$ при $4\pi I_{wp} = 0.9 \text{ T}$.

Выводы

1. Получены формулы для вычисления рабочей точки магнитов различной геометрии. Это позволяет устанавливать требования к величине коэрцитивной силы материала магнитов.
2. Показано, что кольцевой магнит с радиальной намагниченностью не может быть изготовлен из материалов Fe–Cr–Co и ЮНДК из-за низкой величины их коэрцитивной силы. Для изготовления магнитов такой формы требуются редкоземельные магниты с высокой коэрцитивной силой.

Список литературы

- [1] *Strnat K.J., Xiao Y., Mildrum H.F.* // J. Appl. Phys. 1988. Vol. 64. N 10. P. 5522–5524.
- [2] *Kappel W., Codescu M.M., Popa D.* // Roman. Report. Phys. 2004. Vol. 56. N 3. P. 391–398.
- [3] *Akbar S., Ahmad Z., Awan M.S., Farooque M., Ali A.* // Key Engineer. Mater. 2012. Vol. 510–511. P. 507–512.
- [4] *White E.M.H., Kassen A.G., Dennis K.W., Palasyuk A., McCallum R.W., Anderson I.E.* // Intern. J. Powder Metall. 2016. Vol. 52. N 4. P. 33–39.
- [5] Постоянные магниты. Справочник. Под ред. Ю.М. Пятиня. М.: Энергия, 1971. 375 с.
- [6] *Durst K.D., Kronmuller H., Ervens W.* // Phys. Stat. Sol. (A). 1988. Vol. 108. P. 403–416.
- [7] *Сергеев В.В., Булыгина Т.И.* Магнитотвердые материалы. М.: Энергия, 1980. 224 с.
- [8] *Гуревич А.Г.* Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973. 588 с.
- [9] *Parker R.J., Studders R.J.* NY., London: John Wiley and Sons, Inc. 1962. 400 p.
- [10] *Каблов Е.Н.* // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1. С. 3–33.
DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33
- [11] *Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Пискорский В.П., Резчикова И.И., Валеев Р.А., Давыдова Е.А.* // Авиационные материалы и технологии. 2015. № S2. С. 5–10.
DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S2-5-10
- [12] *Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Резчикова И.И., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Королев Д.В.* // Авиационные материалы и технологии. 2015. № S2. С. 24–29.
DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S2-24-29
- [13] *Кекало И.Б., Самарин Б.А.* Физическое металловедение прецизионных сплавов. М.: Металлургия, 1989. 496 с.
- [14] *Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Чередищенко И.В., Резчикова И.И., Валеев Р.А., Пискорский В.П.* // Авиационные материалы и технологии. 2015. № S2. С. 11–19.
DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S2-11-19