

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 620.19

КОНТРОЛЬ НАМАГНИЧЕННОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ДЛЯ МАГНИТОСИЛОВЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, О.О. НОВИКОВА, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: alnikbltov@rambler.ru

© Болотов А.Н., Новикова О.О., 2023

Предложена методика контроля однородности намагниченности магнитов, основанная на экспериментальном определении напряженности магнитного поля на полярной поверхности магнита различной формы. При отклонении экспериментального значения магнитного поля от расчетного, определенного по характеристикам, указанным в соответствующем ГОСТе, более чем на 10 % магниты бракуются. Для выполнения расчетов магнитосиловых свойств механизмов предлагается использовать экспериментально определенное среднее значение намагниченности. Теоретические формулы для определения магнитного поля призматических, цилиндрических и кольцевых магнитов получены с использованием метода эквивалентного соленоида.

Ключевые слова: постоянные магниты, высококоэрцитивные магнитные материалы, намагниченность, магнитная сила, магнитные механизмы.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-3-40-46

ВВЕДЕНИЕ

Активное производство механизмов с магнитной связью (муфт, редукторов, подшипников, пружин фиксирующих устройств) началось после создания в конце прошлого века магнитов на основе редкоземельных элементов [1–7], которые характеризуются в первую очередь высокой остаточной намагниченностью и коэрцитивной силой.

Разделяют два класса редкоземельных магнитов [5, 8]: на основе сплава самария и кобальта (Sm-Co) и на основе сплава, содержащего неодим, железо и бор (Nd-Fe-B). Магниты первой группы (Sm-Co) имеют остаточную индукцию 0,7...0,95 Тл, температурный коэффициент обратимых изменений остаточной намагниченности 0,035...0,045 %/°С и диапазон изменения рабочих температур от –70 до 300 °С. Остаточная индукция магнитов Nd-Fe-B второй группы существенно выше: 1...1,35 Тл, однако температурный коэффициент у них больше – 0,07...0,13 %/°С, а диапазон рабочих температур менее широкий – 60...180 °С. Магниты Nd-Fe-B более дешевы, но имеют низкую коррозионную стойкость и, как правило, требуют нанесения специальных защитных покрытий. Отметим, что ферритовые магниты, имевшие широкое распространение до появления магнитов редкоземельных, характеризуются остаточной индукцией не более 0,4 Тл и температурным коэффициентом 0,2 %/°С.

Магнитостатическая сила взаимодействия идеальных магнитов зависит от намагниченности во второй степени, поэтому сила между магнитами из сплава Nd-Fe-B примерно в 2 раза выше, чем для аналогичных по размерам магнитов из сплава R-Co.

Для расчета сил взаимодействия между постоянными магнитами удобно использовать метод эквивалентного соленоида [6, 7]. Этот метод можно применять при расчете магнитных полей, создаваемых современными высококоэрцитивными магнитами на основе редкоземельных элементов. Предполагается, что такие магниты имеют однородную и анизотропную намагниченность, поэтому их можно представить в виде соленоидов с постоянной плотностью тока в обмотке соленоида. Однако используемые на практике магниты обычно не имеют однородную намагниченность, так что расчеты магнитных сил будут не совсем точные. Кроме того, при нагревании магнитов происходит обратимое и необратимое уменьшение остаточной намагниченности, которое зависит от температуры, локальной структуры материалов, формы и размеров магнитов. В результате этих изменений магниты в определенной мере теряют однородную намагниченность, что тоже следует учитывать при расчете магнитных механизмов.

Неоднородная намагниченность не только затрудняет теоретические расчеты, но и может привести к ухудшению свойств магнитных механизмов. Нами было показано, что, несмотря на применение в магнитных подшипниках постоянных магнитов с осевой симметрией формы, внешнее магнитное поле не сохраняет осевую симметрию. При измерении поля по соосным с магнитом окружностям, лежащим на некотором расстоянии от его поверхности, наблюдаются случайные отклонения величины индукции поля от среднего значения. Величина неоднородности поля зависит от материала магнитов и способа его получения. Например, для цилиндрических магнитов из сплава SmCo_5 с осевой намагниченностью, полученных изостатическим прессованием, неоднородность поля на расстоянии 10^{-4} м от поверхности магнита составляет 2...2,5 %. Для магнитов, изготовленных методом линейного прессования, однородность поля хуже и составляет 3...5 %. Действие размагничивающих полей может ухудшать однородность поля магнита.

Во время работы магнитного подшипника на каждый из магнитов воздействует со стороны сопряженных магнитов переменное магнитное поле, которое приводит к тому, что на вращающуюся часть подшипника действует электромагнитный момент торможения, обусловленный диссипацией кинетической энергии на вихревые токи и магнитный гистерезис. Поэтому для повышения точности расчета магнитных сил между постоянными магнитами и увеличения эффективности функционирования магнитных механизмов необходимо контролировать степень однородности намагниченности по объему магнитов.

Цель работы заключалась в создании простой и достаточно объективной методики контроля намагниченности постоянных магнитов и ее однородности по объему для оценки возможности применения магнитов в технических устройствах.

Методика для контроля свойств (остаточной намагниченности, однородности намагниченности) и отбраковки высококоэрцитивных постоянных магнитов в виде параллелепипеда, цилиндра или кольца, которые изготовлены из сплавов Fe_2O_3 -Ba, Nd-Fe-B, Sm-Co и прочих, распространяется только на магниты, которые предполагается использовать в магнитосиловых устройствах, например системах магнитной разгрузки, муфтах или подшипниках.

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ

Основным показателем качества магнитосиловых систем является величина магнитной силы притяжения или отталкивания, возникающей между постоянными магнитами, а также постоянным магнитом и ярмом из магнитомягкого материала. Для сокращения затрат относительно дорогого магнитомягкого материала и уменьшения размеров магнитной системы величина силы должна быть максимально возможной в расчете на единицу объема магнита. Магнитная сила (для магнитов оговоренных материалов) пропорциональна квадрату остаточной намагниченности J_r , поэтому именно остаточная намагниченность выбрана в качестве основного контролируемого параметра.

В идеальном случае постоянный магнит должен иметь однородную по всему объему намагниченность. Однако по технологическим причинам, а также в результате некачественного намагничивания постоянные магниты имеют неоднородную магнитную структуру, т.е. содержат области с различной остаточной намагниченностью. Определение степени однородности намагниченности предлагается производить по значениям напряженности магнитного поля, создаваемого магнитом в нескольких точках около его поверхности. Значения величины полей не должны существенно отличаться от соответствующих значений, полученных для однородно намагниченных магнитов.

Поле однородного магнита рассчитывают теоретически, т.е. исходят из гостированного значения остаточной намагниченности и учитывают его форму и размеры. Если величина поля контролируемого магнита не такая, как у идеального, то его намагниченность нельзя считать однородной.

При производстве магнитов разброс свойств может достигать 10 % и более [9]. Принято считать технологически разумным допустимое отклонение свойств магнитов от гостированных на 10 % в меньшую сторону и на любое – в большую.

Если учитывать ошибку измерения намагниченности магнитов в производственных условиях, то намагниченность поставляемого с завода магнита может отличаться от номинальной на величину до 15 %.

Приведем пример, показывающий экономические последствия технического применения магнитов с намагниченностью, которая на 10 % меньше нормированной. В пассивных магнитных подшипниках используются магниты из закритических магнитомягких материалов, которые работают на отталкивание или притяжение. Максимальная сила F_{\max} взаимодействия (при зазоре, стремящемся к нулю) между двумя цилиндрическими магнитами оптимальных размеров выражается по формуле

$$F_{\max} = 4,5 \cdot 10^{-5} \mu_0 J_r^2 V^{\frac{2}{3}}, \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; J_r – остаточная намагниченность; V – объем магнита.

Оптимальными считались магниты с такими размерами, для которых заданная сила взаимодействия реализуется при минимальном объеме магнитомягкого материала. Расчеты показывают, что у оптимальных магнитов соотношение размеров $\frac{h}{r} = 1,19$, где h – высота, r – радиус магнита.

Из выражения (1) для силы взаимодействия получается, что при уменьшении намагниченности на 10 % сила взаимодействия снижается более чем на 20 %. Чтобы компенсировать уменьшение силы, требуется увеличить на 33 % объем магнитомягкого материала. В денежном выражении это приводит к удельному удорожанию материала для изготовления магнитосиловой продукции на ~25 долл/кг ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) и на ~30 долл/кг (SmCo_5) [10].

СОДЕРЖАНИЕ МЕТОДИКИ

В основе методики лежат аналитические расчеты магнитного поля магнитов различной формы с однородной намагниченностью. Расчет проводился методом эквивалентного соленоида для «идеальных» магнитов с однородной намагниченностью. Учитывая геометрию магнитов в виде призмы, для описания магнитного поля использовали декартову систему координат, начало которой находилось в середине ребра магнита, вдоль которой направлен вектор намагниченности. Размеры магнита были приняты следующими: a , b – стороны полярной поверхности; h – высота магнита.

Аналогичным методом в цилиндрической системе координат выполнялся расчет магнитного поля цилиндрического магнита с радиусом r и высотой h , намагниченного вдоль оси. Полярную ось z удобно направить вдоль оси магнита, а начало отсчета зафиксировать на его поверхности.

Призматические магниты (рисунок а). Фиксируются три точки на полярной поверхности магнита для определения его свойств: первая – в центре поверхности; две другие – на прямой, проходящей параллельно большому ребру магнита через центр на расстоянии $a/6$ от краев магнита, где a – длина большей стороны магнита. Могут быть взяты и любые другие точки, только не на близком расстоянии от краев, где есть большая неоднородность магнитного поля. Другая причина выбора указанных точек на поверхности магнита заключается в том, что в этих точках по технологическим причинам может наблюдаться более низкое значение намагниченности. При выборе точек наблюдения следует учитывать и размер активной зоны датчика Холла (у миниатюрных, но дорогостоящих датчиков Холла размеры активной зоны могут быть менее $0,1 \times 0,1$ мм²).

Рассчитываются значения напряженности магнитного поля в указанных точках для «идеального» магнита. Для центральной точки 1 – по формуле

$$H_{p1} = \frac{J_r}{\pi} \cdot \left[\operatorname{arctg} \frac{ab}{2\Delta \cdot \sqrt{a^2 + b^2 + 4\Delta^2}} - \operatorname{arctg} \frac{ab}{2(\Delta+h) \cdot \sqrt{a^2 + b^2 + 4(\Delta+h)^2}} \right]; \quad (2)$$

для крайних точек 2, 3 – по формуле

$$H_{p2,3} = \frac{J_r}{2\pi} \cdot \left[-\operatorname{arctg} \frac{(a-x) \cdot \frac{b}{2}}{(h+\Delta) \cdot \sqrt{(a-x)^2 + \frac{b^2}{4} + (h+\Delta)^2}} - \operatorname{arctg} \frac{x \cdot \frac{b}{2}}{(h+\Delta) \cdot \sqrt{x^2 + \frac{b^2}{4} + (h+\Delta)^2}} + \right. \\ \left. + \operatorname{arctg} \frac{(a-x) \cdot \frac{b}{2}}{\Delta \cdot \sqrt{(a-x)^2 + \frac{b^2}{4} + \Delta^2}} + \operatorname{arctg} \frac{x \cdot \frac{b}{2}}{\Delta \cdot \sqrt{x^2 + \frac{b^2}{4} + \Delta^2}} \right], \quad (3)$$

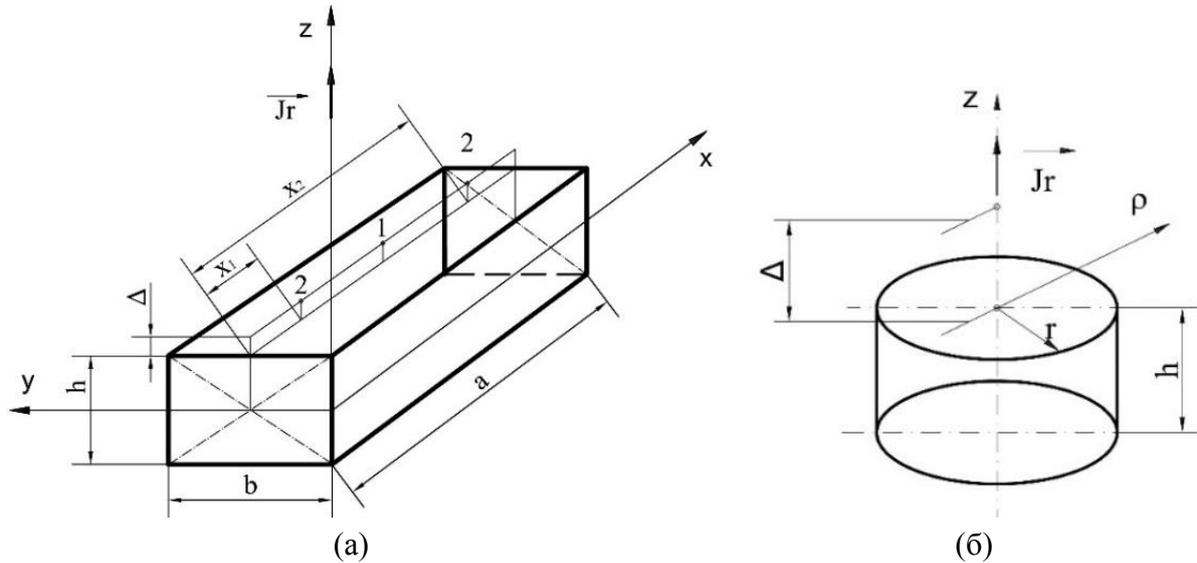
где J_r – остаточная намагниченность (берется из соответствующих ГОСТов); Δ – расстояние от поверхности магнита до преобразователя Холла (обычно 0,4...1,2 мм); $x_1 = a/6$, $x_2 = 5a/6$, $y = b/2$, $z = \Delta+h/2$ – координата точки, в которой измеряется поле.

С помощью тесламетра (гауссметра) измеряется напряженность магнитного поля в указанных точках для контролируемого магнита. Можно использовать достаточно точный тесламетр марки Ф4354/1, у которого $\Delta = 0,4$ мм.

Цилиндрические магниты (рисунок б). Для цилиндрических магнитов принято экспериментально определять напряженность магнитного поля в двух точках, расположенных на расстоянии Δ от центра полярных поверхностей. Для этих же точек рассчитывается магнитное поле H_c «идеального» магнита по формуле

$$H_c = \frac{J_r}{2} \left[\frac{\Delta+h}{\sqrt{R^2+(\Delta+h)^2}} - \frac{\Delta}{\sqrt{R^2+\Delta^2}} \right]. \quad (4)$$

Как и в предыдущем случае, остаточная намагниченность берется из соответствующего ГОСТа.



Расчетные схемы призматического (а) и цилиндрического (б) магнитов

Магниты в виде кольца прямоугольного сечения. Приведенную формулу (3) можно вполне применить и для расчета магнитного поля H_r кольцевого магнита. Кольцевой магнит в этом случае представляется в виде двух соленоидов, вставленных один в другой, по обмоткам которых протекают токи Ампера в противоположных направлениях. Тогда магнитное поле в точке $z = \Delta$ на оси магнита

$$H_r = H_c(r) - H_c(R),$$

где R, r – внешний и внутренний радиусы кольцевого магнита.

Анализ результатов. Сравниваются расчетные и экспериментальные значения напряженности поля:

если расхождение значений поля в идентичных точках не превышает 10 %, то магнит считается однородно намагниченным и может использоваться в магнито-силовых системах;

если хотя бы одно экспериментальное значение напряженности поля меньше расчетного более чем на 10 %, то магнит отбраковывается.

Для прошедших контроль магнитов рассчитывается среднее значение остаточной намагниченности. Определяются три (призматические магниты) или два (цилиндрические магниты) значения намагниченности J_r по экспериментальным величинам магнитного поля на основании использования вышеприведенных формул (2)–(5). Затем находится среднее значение намагниченности магнита и по этому значению рекомендуется проводить расчеты магнитных систем конкретных механизмов. Отбракованные магниты могут найти применение в менее ответственных магнитных механизмах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена простая и наглядная методика оценки однородности намагниченности постоянных магнитов из закритических магнитомягких материалов. Методика основана на экспериментальном изучении топографии магнитного поля постоянного магнита. Недопустимым считается отклонение намагниченности постоянного магнита на 10 % в меньшую сторону от значения, указанного в ГОСТе на магнитный материал. Для расчетов магнитных механизмов предложено использовать среднее значение намагниченности, определенное для трех или двух областей магнита. В данном случае качество магнитного механизма будет достигнуто при меньшем объеме дорогостоящего магнитного материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Filion G., Ruel J., Dubois M.R. Reduced-Friction Passive Magnetic Bearing: Innovative Design and Novel Characterization Technique // *Machines*. 2013. V. 1. P. 98–115.
2. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Расчет и оптимизация размеров бесконтактного магнитного механизма поступательного перемещения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 2 (14). С. 12–20.
3. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Аналитическое моделирование взаимодействия постоянных магнитов из закритических материалов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 2 (14). С. 69–76.
4. Bolotov A.N., Novikov V.V., Pavlov V.G. Magneto-liquid sliding bearings // *Journal of Friction and Wear*. 2004. V. 25. № 3. P. 286–291.
5. Bolotov A.N., Khrenov V.L. Tribology of bearings and guides with magnetic loading off // *Journal of Friction and Wear*. 1995. V. 16. № 6. P. 1048–1069.
6. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Расчет и оптимизация постоянных магнитов для специальных подшипниковых опор: монография. Изд. 2-е, испр. и доп. Тверь: ТвГТУ. 2013. 123 с.
7. Comparative study of torque analysis for synchronous permanent magnet coupling with parallel and halbach magnetized magnets based on analytical field calculations / H. Kang [et al.] // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2014. V. 50. № 11. P. 1–4.
8. Тишин А.М. Перспективы применения редкоземельных постоянных магнитов в электроприводах специального назначения. К 100-летию использования постоянных магнитов в технике // *Инноватика и экспертиза*. 2017. Т. 1. № 19. С. 175–192.
9. Постоянные магниты: справочник / под ред. Ю.М. Пятина. М.: Энергия. 1971. 486 с.
10. Экономические аспекты производства постоянных магнитов (обзор) / И.В. Чередниченко [и др.] // *Новости материаловедения. Наука и техника*. 2016. № 4 (22). С. 58–76.

Для цитирования: Болотов А.Н., Новикова О.О. Контроль намагниченности промышленных постоянных магнитов для магнитосиловых механических систем // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 3 (19). С. 40–46.

CONTROL OF THE MAGNETIZATION OF INDUSTRIAL PERMANENT MAGNETS FOR MAGNETIC-POWER MECHANICAL SYSTEMS

A.N. BOLOTOV, Dr. Sc., O.O. NOVIKOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation, e-mail: alnikbltov@rambler.ru

A method for controlling the homogeneity of magnetization of magnets is proposed, based on the experimental determination of the magnetic field strength on the polar surface of a magnet of various shapes. If the experimental value of the magnetic field deviates from the calculated value determined by the characteristics specified in the corresponding GOST, the magnets are rejected by more than 10 %. To perform calculations of the magnetosilic properties of mechanisms, it is proposed to use an experimentally determined average value of magnetization. Theoretical formulas for determining the magnetic field of prismatic, cylindrical and annular magnets are obtained using the equivalent solenoid method.

Keywords: permanent magnets, high-coercivity magnetic, magnetization, magnetic force, magnetic mechanisms.

Поступила в редакцию/received: 04.04.2023; после рецензирования/revised: 20.04.2023;
принята/accepted: 27.04.2023

УДК 620.16

ПОВЫШЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ КАРБОНАТНОГО БЕТОНА

В.В. БЕЛОВ, д-р техн. наук, Т.Р. БАРКАЯ, канд. техн. наук,
П.В. КУЛЯЕВ, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: vladim-bel@yandex.ru

© Белов В.В., Баркая Т.Р., Куляев П.В., 2023

В статье рассмотрена зависимость механического поведения карбонатного бетона от скорости деформации. Установлено, что в основе этой зависимости лежат два различных физических механизма: процесс разрушения, влияющий на скорость образования трещин, и вязкоупругие деформации неповрежденной (неразрушенной) цементной пасты. Показано, что при анализе различных аспектов механизма разрушения следует принимать во внимание трещинообразование для простых и карбонатных бетонов и учитывать влияние скорости деформации. Выявлено, что для формирования полной картины разрушения этих бетонов механизм образования трещин должен быть включен в анализ различных аспектов морфологии сечений образцов и проявления признаков роста трещин.

Ключевые слова: мелкозернистые карбонатные бетоны, деформативные свойства, трещиностойкость, влияние известнякового микронаполнителя, химические добавки.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-3-46-52

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 3 (19), 2023*