

КОМБИНИРОВАННЫЕ ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ: РАСШИРЕНИЕ КЛАССИФИКАЦИИ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Кравченко А.И., к.т.н., Бовда А.М.

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», НПФ "Полюс-Н", тел. (0572) 26-40-25, E-mail: alex@krawa.net

Комбіновані магніти, які зібрані з магнітів різного типу, розглядаються як новий клас постійних магнітів, властивості яких визначаються як властивостями вхідних у них магнітів і їхнім об'ємним змістом, так і схемою зборки. Описані експериментально установлені властивості комбінованого магніту Sm-Co/ Nd-Fe-B / Sm-Co, який виготовлений з магнітних матеріалів одного класу і комбінованого магніту Nd-Fe-B/ Al-Ni-Co-Fe/ Nd-Fe-B, який виготовлений з магнітних матеріалів різних класів. Зроблено висновок про перспективність теоретичного й експериментального вивчення комбінованих магнітів з метою їхнього практичного застосування.

Комбинированные магниты, собранные из магнитов разного типа, рассматриваются как новый класс постоянных магнитов, свойства которых определяются как свойствами входящих в них магнитов и их объёмным содержанием, так и схемой сборки. Описаны экспериментально установленные свойства комбинированного магнита Sm-Co/ Nd-Fe-B / Sm-Co, изготовленного из магнитных материалов одного класса и комбинированного магнита Nd-Fe-B/ Al-Ni-Co-Fe/ Nd-Fe-B, изготовленного из магнитных материалов разных классов. Сделан вывод о перспективности теоретического и экспериментального изучения комбинированных магнитов с целью их практического применения.

При рассмотрении постоянных магнитов как изделий различают однородные магниты, изготовленные из какого-либо одного магнитотвёрдого материала, и композиционные магниты, изготовленные из порошка магнитотвёрдого материала и немагнитной связки [1,2]. Между тем, классификация магнитов должна быть расширена добавлением нового класса магнитов: комбинированных магнитов. Предпосылкой к этому является появление новых сведений о свойствах магнитов, собранных из магнитотвёрдых материалов разных типов [3-6]. Комбинированным магнитом мы называем магнит, собранный из магнитов разного типа.

Цель публикации – рассмотреть возможные свойства комбинированных магнитов и привлечь внимание исследователей и разработчиков аппаратуры к новому классу постоянных магнитов.

Некоторые возможные схемы сборки комбинированных магнитов в форме диска или призмы с осевым направлением намагничивания или в форме кольца с радиальным направлением намагничивания показаны на рис.1 (для простоты рассматриваются только двухполюсные комбинированные магниты и выполненные с использованием только двух типов магнитов).

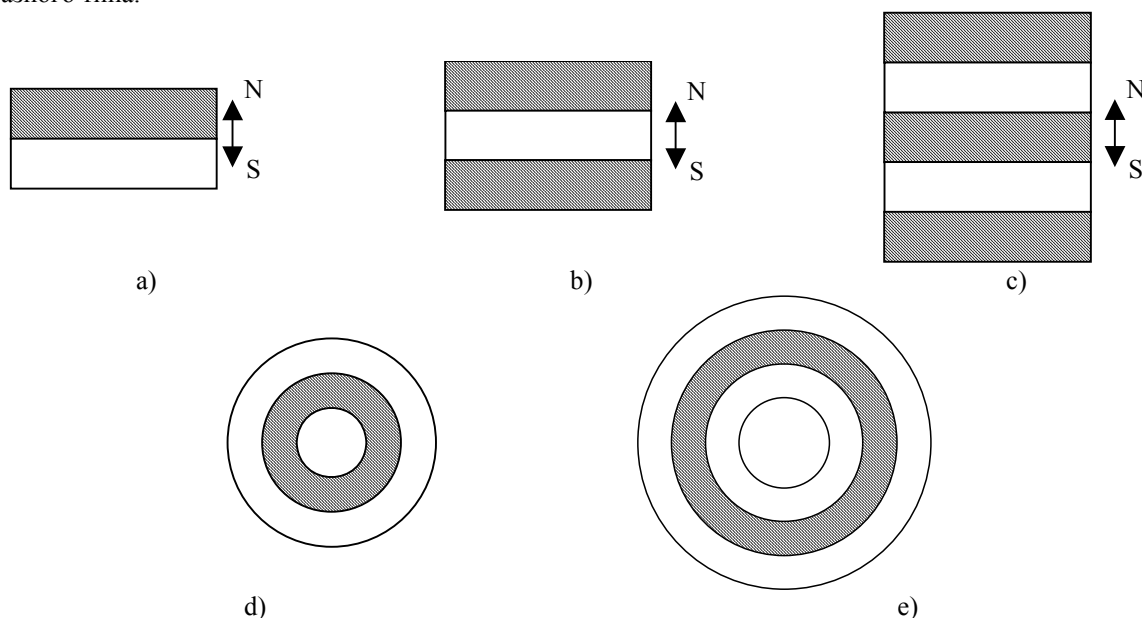


Рис.1. Некоторые возможные схемы сборки комбинированных магнитов: а-д) с осевым направлением намагничивания; е, ф) с радиальным направлением намагничивания.

В табл.1, построенной по данным справочных литературных изданий [1,2], приведены основные магнитные свойства и ориентировочная цена постоянных магнитов наиболее распространённых марок.

Для сравнимости значения характеристик магнитов приведены в относительных единицах (за единицу той или иной величины взято её значение, характерное для магнита Nd-Fe-B).

Магнитные свойства и цена некоторых типов магнитов разных классов
(в относительных единицах, ориентировочно)

Класс	Тип	B_r	$H_{св}$	$H_{см}$	W	T_e	C
Редко-земельные	Nd-Fe-B	1,0...1,2	0,9...1,0	2	2,2...2,5	1...1,5	0,5...1
	Sm-Co	0,8...0,9	0,7...0,8	1,6...1,9	1,1...1,3	2...3	2
Сплавы системы Al-Ni-Co-Fe	ЮН14ДК24	1,2	0,06	0,06	0,18	5	0,5...1
	ЮН14ДК25А	1,4	0,07	0,07	0,28	5	0,7...1
	ЮНДК35Т5БА	1,0	0,14	0,14	0,36	5	1
Ферриты	Бариевый	0,3	0,25	0,38	0,08	2	0,03...0,05
	Стронциевый	0,4	0,24	0,25	0,12	2	0,05...0,1
	Кобальтовый	0,2	0,16	0,17	0,06	2	0,05...0,1
	Редкоземельный	0,4	0,18	0,18	0,12	2	0,1...0,2

Примечание:

B_r -остаточная индукция по измерению в зазоре (1 отн. ед. B_r равна 1 Тл),

$H_{св}$ -коэрцитивная сила по индукции (1 отн. ед. $H_{св}$ равна 800 кА/м),

$H_{см}$ -коэрцитивная сила по намагниченности (1 отн. ед. $H_{см}$ равна 800 кА/м),

W -максим. энергетическое произведение (1 отн. ед. W равна 100 кДж/м³),

T_e -верхний предел рабочей температуры (1 отн. ед. T_e равна 100 °С),

C -цена (1 отн. ед. цены равна 100 долл. США / кг).

Естественно предположить, что значение той или иной характеристики комбинированного магнита является некоторым усреднением значений этой характеристики для магнитов, входящих в сборку, и что оно зависит от соотношения долей содержания магнитов разных типов в сборке. Также можно ожидать, что эффект от применения магнитов разных типов в сборке будет более заметен на тех характеристиках, значения которых для этих магнитов разнятся больше (см. табл.1).

Комбинированные магниты могут быть собраны как из магнитов разных классов, так и из магнитов одного класса. Так, установлено, что магнит Sm-Co/ Nd-Fe-B/ Sm-Co, собранный из закритических магнитов со значениями верхнего предела рабочей температуры, соответственно, $T_c(\text{Nd-Fe-B})=100$ °С и $T_c(\text{Sm-Co})=200...220$ °С, имеет значение этой величины $T_e=160...170$ °С. (Закритический магнит, в отличие от докритического, будучи намагниченным вместе с магнитопроводом из магнитомягкого материала, полностью сохраняет свой магнитный поток после отсоединения от магнитопровода. Среди распространённых магнитов некоторые ферриты и сплавы системы Al-Ni-Co-Fe являются докритическими материалами, а редкоземельные магниты Nd-Fe-B и Sm-Co и некоторые ферриты – закритическими [1,2]). Цена такого комбинированного магнита примерно в полтора раза ниже цены Sm-Co-магнита, значения других его характеристик мало отличаются от близких друг другу значений соответствующих характеристик входящих в сборку магнитов. В итоге расширяется номенклатура магнитов, изготовленных из редкоземельных магнитотвёрдых материалов [3,4]. Важным для понимания возможностей, связанных с созданием комбинированных магнитов, следует считать следующее наблюдение. При нагреве внутренней Nd-Fe-B-части сборки Sm-Co/ Nd-Fe-B / Sm-Co размагничивается меньше, чем в сборке из Nd-Fe-B-магнитов. Например, при температуре 180 °С и времени нагрева 40 минут относительное изменение магнитного потока $-\Delta\Phi/\Phi$ внутренней Nd-Fe-B-части сборки Sm-Co/ Nd-

Fe-B/ Nd-Fe-B/ Sm-Co, собранной из магнитов с размерами 16x8x6 мм³, равно примерно 25 %, в то время как в сборке из четырёх Nd-Fe-B-магнитов тех же размеров – более 50 % [3]. Более термостабильные Sm-Co-магниты своим полем препятствуют размагничиванию внутренней Nd-Fe-B-части сборки. Таким образом, у комбинированного магнита наблюдается свойство, которое является неаддитивной величиной по отношению к входящим в сборку магнитам.

Примером комбинированного магнита, собранного из материалов разных классов, является магнит Nd-Fe-B/ Al-Ni-Co-Fe/ Nd-Fe-B. Установлено, что магнитный поток Al-Ni-Co-Fe-магнита с размерами 40x37x9 мм³, находящегося между Nd-Fe-B-магнитами, при доле Nd-Fe-B-магнитов в сборке $\eta \geq 55$ об. % почти в 5 раз больше потока этого магнита в свободном (вне какой-либо системы) состоянии [5]. При указанных значениях η такой комбинированный магнит переходит из докритического состояния в закритическое. Предложено применение такого комбинированного магнита для упрощения сборки систем с Al-Ni-Co-Fe-магнитами (магнит Nd-Fe-B/Al-Ni-Co-Fe/Nd-Fe-B устанавливается напротив посадочного места в магнитопроводе, магниты Nd-Fe-B фиксируются, после чего Al-Ni-Co-Fe-магнит перемещается в посадочное место, а Nd-Fe-B-магниты удаляются [6]).

Ожидается, что комбинированный магнит, собранный из ферритов и Al-Ni-Co-Fe-магнитов, расширит номенклатуру известных магнитов (кривые размагничивания феррита и Al-Ni-Co-Fe-магнита, построенные в одной системе координат, имеют точку пересечения, причём значения остаточной индукции и коэрцитивной силы этих магнитов, а также цены, заметно разнятся).

Для оценки влияния закритических магнитов на магнитный поток помещённого между ними докритического магнита был введен коэффициент влияния $k=(\Phi-2\Phi_1)/\Phi_0$, где Φ , Φ_1 и Φ_0 – магнитные потоки, соответственно, сборки, одного внешнего закритического магнита и свободного (вне сборки) докритического магнита. Установлено, что k зависит как от η ,

так и от соотношения в размерах внутреннего магнита. Значение коэффициента k увеличивается с увеличением размеров магнита в плане и уменьшается с увеличением высоты внутреннего магнита.

Может быть рассмотрен вопрос о классе комбинированного магнита в зависимости от класса входящих в сборку магнитов. На рис.2 в качестве примера схематически изображены кривые размагничивания докритического и закритического магнитов. ОА - вспомогательная прямая с угловым коэффициентом $-\mu_0$ (μ_0 – магнитная постоянная). Кривые 1 и 2 имеют линейный участок между осью ординат и началом колена – точки a_1 и a_2 соответственно. Точка a_1 лежит левее точки c_1 , а точка a_2 – правее точки c_2 , поэтому кривая 1 является кривой размагничивания закритического магнита, а кривая 2 – докритического [2].

Предполагая, что значение индукции комбинированного магнита является неким усреднением значений этой величины для входящих в сборку магнитов и что оно зависит от доли η второго компонента, для комбинированного магнита можно провести усреднённую кривую 3 с линейным участком между осью ординат и началом колена – точкой a_3 (точнее, кривые 3' и 3'', соответствующие различным значениям η : $\eta' > \eta''$). Если $|a_1| < |a_2|$, то, проведя вертикальную прямую через точку a_1 , найдём точки a'_3 и a''_3 начала колена на кривых 3' и 3'' соответственно (если $|a_2| < |a_1|$, то для нахождения точек a'_3 и a''_3 вертикальную прямую надо проводить через точку a_2).

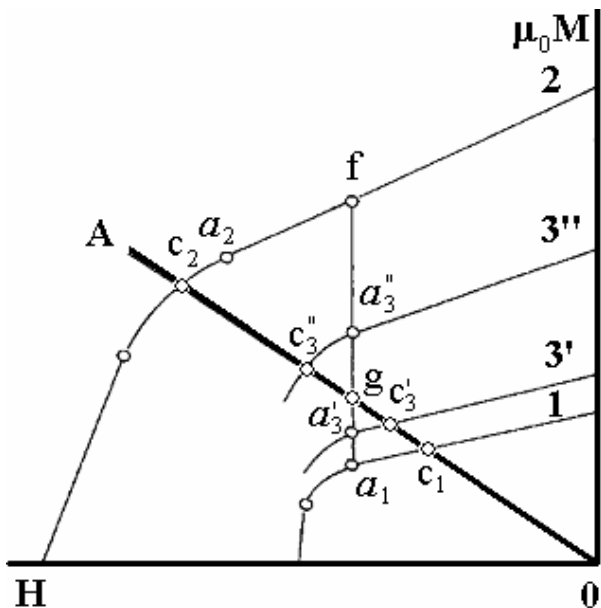


Рис.2. Кривые размагничивания $\mu_0 M = f(H)$: 1 – закритический магнит; 2 – докритический магнит; 3' и 3'' – комбинированные магниты (μ_0 – магнитная постоянная, M – намагниченность, H – магнитное поле).

Очевидно, что кривая 3 может иметь вид, характерный как для докритического, так и для закритического магнита в зависимости от положения точек a_1 и a_2 (т.е. от конкретного вида кривых 1 и 2) и от значения η_2 . Существует критическое значение η_c , при котором происходит переход комбинированного магнита из одного состояния в другое. В первом приближе-

нии для кривой 3' доля второго компонента $\eta' = a_1 a'_3 / a_1 f$, а для кривой 3'' $\eta'' = a_1 a''_3 / a_1 f$; критическая доля $\eta_c = a_1 g / a_1 f$ (см. рис.2).

Нетрудно выполнить подобный анализ для других возможных комбинаций входящих в сборку магнитов. Обобщённые результаты такого анализа приведены в табл.2 (для упрощения анализа не рассматриваются критические магниты).

Таблица 2

Класс комбинированного магнита (по признаку магнитных свойств) в зависимости от класса входящих в него магнитов

Класс магнитов, входящих в комбинированный магнит	Класс комбинированного магнита
Докритический и докритический	Докритический
Докритический и закритический	Докритический или закритический, в зависимости от доли η закритических магнитов (если кривая размагничивания докритического магнита лежит ниже кривой размагничивания закритического магнита, то комбинированный магнит является докритическим при любом значении η)
Закритический и закритический	Докритический или закритический, в зависимости от доли η одного из магнитов

В заключение следует сделать вывод о перспективности теоретического и экспериментального изучения комбинированных магнитов с целью их практического использования. Такое изучение должно включать в себя выбор оптимальных комбинаций входящих в сборку магнитов, определение оптимальной схемы сборки, установление допустимых условий эксплуатации и областей полезного применения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Корицкого Ю.В., Пасынкова В.В., Тареева Б.М. - Т.3. - 3-е изд. - Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отд. 1988.-728 с.
- [2] Постоянные магниты: Справочник / Альтман А.Б., Гербергер А.Н., Гладышев П.А. и др. Под ред. Пятинина Ю.М. - 2-е изд. - М.: Энергия. 1980.-488 с.
- [3] Bovda A.M., Kravchenko A.I. Heat demagnetization of combined magnet Nd-Fe-B / Sm-Co // Functional materials, 2003. V.10. N.1. P.176-178.
- [4] Кравченко А.И., Бовда А.М. Постоянный магнит. Патент Украины № 1591 (15.01.2003г. Бюл. № 1). Мки H01F7/02, H01F1/053.
- [5] Bovda A.M., Kravchenko A.I. Magnetic flux of combined magnet Al-Ni-Co-Fe / Nd-Fe-B // Functional materials, 2003. V.10. N.2. P.354-356.
- [6] Кравченко А.И., Бовда А.М. Способ изготовления магнитной системы с Al-Ni-Co-Fe-магнитами. Патент Украины № 52480А (16.12.2002г. Бюл. № 12). Мки H01F7/02, H01F41/00.

Поступила 06.05.2003