

УДК 621.318.2

СОВРЕМЕННЫЕ МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Зарихта К.С.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Константинова С.В.

Издавна магнит был очень загадочным и необъяснимым предметом, который повлиял на становление человечества. Постоянный магнит – главная составляющая компаса, что сегодня является надежным атрибутом воздушной и морской навигации. Также это основной элемент исследований электродинамического процесса, что сформировал ряд теорий и является фундаментом всей электродинамической техники.

На сегодня сфера применения магнитов гораздо шире. Чаще всего их используют для:

- производства микроэлектродвигателей;
- телевизоров, компьютерных мониторов;
- научных, медицинских и измерительных приборов;
- телефонов;
- систем возбуждения электрических машин;
- динамических громкоговорителей и микрофонов;
- кредитных и дебетовых карт;
- маломощных держателей (сепараторы, защелки, ловители и др.);
- декоративных изделий и игрушек.

К основным современным видам постоянных магнитов относят:

1) **Магниты с полимерным наполнителем, применяемые в медицине** эластичные магнитофоры (магнитопласты, магнитоэласты).

$B_r =$ до 0.05 Тесл (50 миллитесл = 500 Гаусс).

2) **Магнитопласты на основе наполнителя** (например, порошка анизотропного $NdFeB$). Поддаются механической обработке, благодаря пластичности (как резина) и возможности изготовления сложных форм методом литья под давлением (в том числе, с монтажными отверстиями и средствами крепления). Не нагреваются при работе в переменных электромагнитных полях (нечувствительны к воздействию вихревых токов). Максимальная рабочая температура – до 120–220 градусов Цельсия, в зависимости от теплостойкости связующего материала.

$B_r = 0.5–0.6$ Тл (5000–6000 Гаусс) ($Nd-Fe-B$).

3) **Ферриты** (прессованные керамические ферритобариевые и ферритостронциевые, недорогие ферромагниты чёрного цвета). В отличие от “железных” магнитов, имеют очень высокое электрическое сопротивление (поэтому феррит бария используют в цепях, подвергающихся действию высокочастотных полей), хорошую механическую прочность, коррозионную стойкость, меньший вес, по сравнению с железными – в 1.5–2 раза. Есть возможность осуществлять у них многополюсное намагничивание на цельном изделии. Имеют неплохую устойчивость к воздействию внешних магнитных полей. По стоимости – на порядок дешевле ЮНДК, имея, при этом, более высокие показатели коэрцитивной силы. Широко применяются в двигателях постоянного тока, в генераторах, в профессиональных и домашних аудио-системах (повышенную индукцию – набирают склейкой двух колец). Недостатки ферромагнитов – хрупкость и твёрдость (обрабатывать можно только шлифованием и при помощи алмазной резки) и уменьшение коэрцитивной силы при охлаждении ниже – 20 °С (что снижает, на морозе, стойкость к размагничиванию маг. полем; зимой, при – 60 градусах – магнитные свойства необратимо теряются и не восстанавливаются при возврате к нормальным термическим условиям) или при нагреве (особенно чувствительны бариевые). Если температура изменяется быстрее 5–10 °С/мин – на феррите образуются трещины, что ухудшает его физические свойства. Максимальное энергетическое произведение – в несколько раз хуже, чем у $SmCo$. Температурный коэффициент остаточной магнитной индукции – раз в десять хуже, т.е. больше, чем у литых магнитов.

$Br = 0.1-0.4$ Тл (1000–4000 Гаусс).

Современные – от 0.2 до 0.43Тл.

$T_c \text{ of } Br \sim -0.20\%$ на $^{\circ}C$ (Температурный коэффициент).

$T_{max}/T_{cur} = 250-300 / 450$ $^{\circ}C$ (Максимальная рабочая температура / Точка Кюри).

$H_{cb} = 2-4$ кЭ (Коэрцитивная сила по индукции, килоэрстед).

Диапазон максимальной энергии (энергетическое произведение) – от 1,1 до 4,5 МГЭ.

4) **Термостабильные литые или спечённые магниты “Альнико” ($AlNiCo$, российское название – ЮНДК)** на основе сплавов железо–алюминий–никель–медь–кобальт. Они легче редкоземельных самарийкобальтовых, при примерно одинаковых параметрах индукции, и заметно дешевле их. Имеют высокую коррозионную и радиационную стойкость. Используются в акустических системах и динамических студийных микрофонах (ставят *Alnico V*), в гитарных звукоснимателях, в электродвигателях и электрогенераторах, в приборостроении (сенсоры, реле и т.д.) Типовые формы: пластины, призмы, кольца и трубки, диски и стержни. Недостаток – $AlNiCo$ хрупкие (обрабатываются полированием, шлифованием, резкой абразивным кругом) и легко размагничиваются (низкая коэрцитивная сила) под воздействием внешнего магнитного поля, что делает неверными показания стрелочных приборов, в которых они установлены.

$Br = 0.7-1.3$ Тл.

$T_c \text{ of } Br \sim -0.02\%$ на $^{\circ}C$ (это очень хороший показатель).

$T_{max}/T_{cur} = 250-550/800-850$ $^{\circ}C$.

$H_c = 0.6-1.9$ кЭ.

Диапазон максимальной энергии – от 1,4 до 7,5 МГсЭ.

5) **Термоустойчивые деформируемые магниты типа ХК (железо–хром–кобальт, $Fe-Cr-Co$).** Прочность и пластичность современных типов этого сплава – на порядок превосходит аналогичные показатели ЮНДК24 (Алنيко 5) при сопоставимых магнитных свойствах. Могут быть получены в виде холоднокатаного листа, горячекатаного и кованого прутка для последующей механической и термомагнитной обработки. В последние годы, осваиваются новые, перспективные наноструктурные, магнитотвёрдые $FeCrCo$ – сплавы с улучшенными характеристиками. Максимальные рабочие температуры достигают 450 $^{\circ}C$.

$Br = 1.1-1.5$ Тл.

$T_c \text{ of } Br = \text{от } -0,015 \text{ до } -0,028\%$ на $^{\circ}C$ (ГОСТ 24897–81).

H_{cb} – больше 0.5 кЭ.

6) **Спечённые редкоземельные магниты** на основе сплавов самарий–кобальт ($SmCo$, долговечная металлокерамика). Имеют лучшую коррозионную стойкость (то есть, не ржавеют, поэтому и не нуждаются в защитном покрытии) по сравнению с остальными редкоземельными материалами и большие значения максимальной рабочей температуры (термостабильные до 350 $^{\circ}C$) и коэрцитивной силы (то есть, магнитотвёрдые – устойчивые к размагничиванию). По сравнению с ЮНДК – на порядок большая коэрцитивная сила по намагниченности. Недостатки – хрупкость и высокая цена. Применяются в космических аппаратах и мобильных телефонах, в мотоциклах и газонокосилках, в авиационной и компьютерной технике, в медицинском оборудовании, в миниатюрных электромеханических приборах и устройствах (наручных часах, наушниках и т.д.) Используются в современном приборостроении.

$Br = 0.8-1.1$ Тл.

$T_c \text{ of } Br \sim -0.035\%$ на $^{\circ}C$.

$T_{max}/T_{cur} = \text{от } -60 \text{ до } 250-500 / >700-800$ $^{\circ}C$.

$H_{cb} = 8-10$ кЭ.

Диапазон максимальной энергии – от 18 до 32 МГсЭ.

7) **Неодимовые** – редкоземельные супермагниты на основе сплавов неодим–железо–бор ($Nd-Fe-B$, $NdFeB$).

Диапазон рабочих температур – от -60 до $+150-220$ $^{\circ}C$.

Они хрупкие и чувствительные к температуре (предел допустимого нагрева – зависит от марки магнита). После сильного перегрева – необратимо и полностью теряется намагниченность (восстановить можно перемагничиванием на специальной установке). Имеют невысокую коррозионную стойкость – легко окисляются (ржавеют), если повреждено антикоррозионное покрытие (краска, лак, тонкая металлическая плёнка из никеля, меди или цинка). В виде порошка – могут воспламениться, с выделением ядовитого дыма. Лучше поддаются механической обработке – гибкие *Nd*-магнитопласты (*NdFeB*). Спечённые неодимовые магниты имеют преимущество – наибольшую, по сравнению с остальными видами, силу остаточной магнитной индукции и очень высокое энергетическое произведение. Максимальная рабочая температура будет выше – при добавлении кобальта вместо железа, но это ведёт к удорожанию материала. Широко применяются в компьютерной технике (двигатели электроприводов дисков, устройства считывания и записи информации), в моторах и датчиках.

$Br = 1.0\text{--}1.4$ Тл (10000–14000 Гаусс).

$Tc \text{ of } Br = \text{от } -0.07 \text{ до } -0.13\%$ на °С.

$Tmax/Tcur = 80(Nxx) - 120(NxxH) - 150(NxxS/U) - 200(xxEH) - 220 / 310\text{--}330$ *Hc* = 12 кЭ.

Диапазон макс. энергии – от 1 до 50 МГЭ.

8) **Сверхпроводящие магниты**, относящиеся к категории сверхмощных, могут иметь максимальные значения индукц.

$Br > 5$ Тл.

Способы усиления

Для усиления (концентрации силовых линий) магнитного поля – используют полюсные наконечники в виде сужающихся конусов, что значительно увеличивает индукцию в малом объёме.

Из нескольких магнитов, соединяя их последовательно (разноимёнными полюсами) – можно собирать магнитные батареи. В итоге – повышение мощности и более протяжённые, и линейные (на достаточном расстоянии) силовые линии поля.

Основные характеристики современных магнитов

Остаточная магнитная индукция (*Br*, Тесл или Гаусс, *G*) – намагниченность, оставшаяся после намагничивания материала, из которого изготовлен постоянный магнит, измеренная на его поверхности, в замкнутой системе. Единица измерения – Тесла, в системе СИ или Гаусс, в сист. СГС. Это основная характеристика магнита. Иногда, эту величину называют – “сила магнита”.

Магнитная индукция, B / Br (Тесл или Гаусс, *G*) – результат приборного измерения (гауссметром / тесламетром или магнитометром) реального, фактического поля магнита на каком-то расстоянии от него или на его поверхности.

Коэрцитивная сила по индукции, *Hcb* (кА/м) – величина внешнего магнитного поля, требуемого для полного размагничивания магнита, намагниченного до состояния насыщения. Характеризует устойчивость к размагничиванию (ГОСТ 19693).

Максимальное энергетическое произведение, $(BH)max$ МГсЭ (МГауссЭрстед, в системе СГС) – мощность магнита.

Температурный коэффициент остаточной магнитной индукции, $Tc \text{ of } Br$ (*TKBr*) (% на °С) – характеризует изменение магнитной индукции от температуры.

Максимальная рабочая температура, *Tmax* (градусов по Цельсию) – предел температуры, при которой магнит временно теряет часть своих магнитных свойств. При последующем охлаждении – все магнитные свойства восстанавливаются (в отличие от точки Кюри). Превышение нагрева на несколько десятков градусов больше *Tmax* – может вызвать частичное размагничивание магнетика (после остывания, оставшаяся сила притяжения будет меньше изначальной; при этом, точные измерительные стрелочные приборы и т.п. – уже не годятся для работы).

Точка Кюри, *Tcur* (°С) – температура, выше которой исчезает намагниченность ферромагнетиков.

Никель – +358 °С.

Железо – +769 °С.

Кобальт – +1121 °С.

Сила сцепления – усилие (направленное перпендикулярно плоскостям контакта), необходимое, чтобы оторвать магнит от обработанной, плоской и ровной стальной поверхности. Например, относительно небольшой неодимовый магнитик, выполненный в виде компактного цилиндра или шайбы без центрального отверстия, с собственным весом, примерно, триста грамм, диаметром 50 миллиметров и высотой 20 мм – притягивается к железу с силой, составляющей более 80 килограмм. Нужно учесть, что при продольном сдвиге вдоль контактной поверхности или при отрыве с края – понадобится приложить меньшие усилия. Мощность и индукция однотипных магнетиков, приблизительно, пропорциональны их массе. При работе с сильными магнитами, необходимо строго соблюдать правила техники безопасности, особенно – беречь от травм руки, чтобы их не прищемило.

Размагничивание и срок службы

Магниты теряют намагниченность – при сильных механических вибрациях, ударах, деформациях и значительных перепадах температуры. Полное размагничивание произойдет при нагревании выше температуры Кюри (она отличается для каждого конкретного ферромагнитного материала, например – Железо +769 °С и свои значения – для сплавов нескольких металлов) или в мощном магнитном поле, затухающем переменном или противоположно направленном постоянном, напряжённостью – не меньше величины коэрцитивной силы для данного магнетика. Самые распространённые железные магниты, в обычных комнатных условиях и без нарушения условий эксплуатации – будут размагничиваться очень долго. За период 10 лет – неодимовые магниты теряют менее 2 % силы, кобальтовые – меньше 1 процента своей намагниченности. Хуже параметры у ферритов и Альнико – они ненадёжны, быстро садятся, стареют и работают в полсилы, что, нередко, считается их недомагнитностью и заводским браком в производстве.

Подводя итог всему вышеописанному следует отметить, что мы много знаем об электричестве и магнетизме и с каждым днем узнаем все больше и больше. Но за одной проблемой встают другие, не менее сложные и интересные. Жизнь всегда будет полна загадок. И наряду с самыми сложными – загадкой жизни и загадкой Вселенной – загадка магнита всегда будет давать пищу для любознательного ума.

Вряд ли, когда-нибудь найдется человек, который возьмет на себя смелость утверждать: “Я постиг загадку магнита!” Однако ученые, познающие толику тайны, смогли создать устройства, способные соперничать с самыми сильными магнитами, созданными природой.

Литература

1. Большая советская энциклопедия – М. : Советская энциклопедия , 1974.
2. Карцев, В.П. Магнит за три тысячелетия / В.П. Карцев. – М. : Знание , 1986г. – 230с.
3. Пятин, Ю.М. Постоянные магниты / Ю.М. Пятин. – М. : Энергия, 1980.