

УДК 622.237:621.318

М.Т. Кобылянский

## АНАЛИЗ И ВЫБОР МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В МАГНИТНЫХ ЛОВИТЕЛЯХ БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА

Выбор типа магнитного материала для бурового магнитного улавливающего устройства имеет большое значение, т. к. во многом определяет силовые и магнитные параметры ловителя.

Энергия магнитного поля, создаваемого в окружающем пространстве единицей объёма постоянного магнита, может быть выражена через магнитную индукцию  $B_M$  и напряжённости поля  $H_M$  в рабочей точке по формуле:

$$W_M = \int_0^{B_M} H_M dB_M = \frac{1}{\mu_0} \int_0^{B_M} B_M dB_M = \frac{B_M^2}{2\mu_0} = H_M B_M / 2. \quad (1)$$

Максимальное значение удельной магнитной энергии  $W_{Mmax}$  или пропорциональное ей часто используемое на практике максимальное произведение  $(BH)_{max}$  является важнейшим параметром магнитотвёрдых материалов, поскольку, в конечном счёте, при конструировании оптимальной магнитной системы определяют объём материала, необходимого для создания заданной интенсивности и топографии магнитного поля в заданном объёме пространства.

Диапазон изменения максимальной удельной магнитной энергии применяемых в настоящее время магнитотвёрдых материалов весьма широк: от 1 кДж/м<sup>3</sup> для хромистых сталей до 80 кДж/м<sup>3</sup> для интерметаллических соединений кобальта с редкоземельными элементами и даже более 128 кДж/м<sup>3</sup> для некоторых лабораторных образцов этих же соединений.

Существуют различные классификации магнитотвёрдых материалов. Наиболее целесо-

образной является классификация, предложенная С.В. Вонсовским, в основе которой лежат различия в химическом составе, природе высококоэрцитивного состояния и технология изготовления. В соответствии с этой классификацией магнитотвёрдые материалы делятся на девять основных групп. Следует отметить, что шесть из них вследствие невысоких магнитных, физических, а также технологических характеристик применять в магнитных ловителях бурового инструмента нерационально. Рассмотрим оставшиеся три группы магнитотвёрдых материалов.

1. Диффузно-твердющие сплавы на основе системы Fe-Ni-Al, с добавками Co, Cu и др. Принципиальное отличие состоит в том, что в этих сплавах основную роль играет анизотропия формы выделений сильно магнитной фазы. Сплавы типа ЮНДК обладают высокими магнитными свойствами, которые достигаются не только за счёт высокого легирования сплава дефицитными металлами (Ni, Co, Ti, Nb), но и специальной термической обработкой, обеспечивающей структурную и наведённую магнитную анизотропию. Сплавы системы Fe-Ni-Al-Co (ЮНДК) имеют свойства намного выше применяемых ранее материалов. Из сплавов, нормированных ГОСТ 17809-72, наиболее высокие магнитные свойства имеет сплав ЮНДК35Т5АА: остаточная индукция  $B_r=1.05 T$ ; коэрцитивная сила по магнитной индукции  $H_c=118$  кА/м; максимальная магнитная энергия  $W_{max}=40$  кДж/м<sup>3</sup>.

В магнитных ловителях типа ФМ по ОСТ 26-16-1606-78 применяются магниты ЮН14ДК25БА. Известно, что индукция на полюсах при опти-

мальных размерах системы с литыми магнитами не может превышать 1,2 T, что обеспечивает удельную силу притяжения в пределах 6,0-6,5 кг/см<sup>2</sup>. Недостатком сплавов ЮНДК является также их высокая стоимость и дефицитность исходных материалов.

2. Магнитотвёрдые ферриты бария  $(\text{BaO})_6\text{Fe}_2\text{O}_3$ , стронция  $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$  и кобальта  $\text{CoO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  обладают высокой константной магнитокристаллической анизотропии. Марки и свойства ферритов бария и стронция определяются и контролируются в жёстко регламентируемых условиях согласно ГОСТ 24063-80 «Ферриты магнитотвёрдые». Марки и основные параметры» и ОСТ 11 707.023-81 «Ферриты магнитотвёрдые прецизионные. Марки и основные параметры».

В нашей стране и за рубежом наиболее распространены оксидно-бариевые магниты. Эти магниты имеют ряд преимуществ перед литыми и поэтому рассматриваются нами как прогрессивный и основной вид постоянных магнитов для применения в магнитных ловителях бурового инструмента. Наилучшими магнитными свойствами обладают анизотропные феррито-бариевые магниты 22БА220, 22БА190 и 28БА190. Остаточная индукция магнитов  $B_r$  находится в пределах 0,36-0,39 T, коэрцитивная сила  $H_c$  - 185-215 кА/м, магнитная энергия  $W_{max}$  - 11,0-14,0 кДж/м<sup>3</sup>.

Благодаря высокой коэрцитивной силе  $H_c$  ферритовые магниты всех марок устойчивы против размагничивающего действия постоянных и переменных внешних магнитных полей напряжённостью до 10 кА/м, что даёт возможность

намагничивать ферритовые магниты отдельно до сборки магнитной системы. Это позволяет разрабатывать любые компоновки магнитных систем, не ограничиваясь возможностью их намагничивания. Таким образом, применение ферритовых магнитов вносит принципиальное отличие в конструкцию магнитных ловителей, а также в методику их расчёта.

Ферриты бария и стронция обладают структурной стабильностью неограниченное время. Они сохраняют магнитные параметры при эксплуатации и хранении по ГОСТ 24063-80 в течение не менее 10 лет. К концу срока эксплуатации (или хранения) изменение остаточной индукции  $B_r$ , коэрцитивной силы по индукции  $H_{cb}$  и намагниченности  $H_{cm}$ , энергии  $W_{max}$  намагниченных ферритовых магнитов практически отсутствует (не превышает 0,5 %). Ферриты сохраняют магнитные параметры в процессе и после воздействия следующих факторов: вибраций в диапазоне частот от 5 до 2500 Гц с ускорением до 200 м/с<sup>2</sup>; многократных ударов с ускорением до 1500 м/с<sup>2</sup>; одиночных ударов с ускорением до 500 м/с<sup>2</sup> вплоть до разрушения магнитов; повышенной влажности воздуха до 98 % при температуре 35°C. При нагревании магнитных систем с ферритовыми магнитами до 300°C необратимых изменений намагниченности не происходит. Температурный коэффициент остаточной индукции составляет  $-2 \cdot 10^{-3} \text{ С}^{-1}$  в интервале температур  $-70 \dots +200^\circ\text{C}$ . Температура Кюри –  $450^\circ\text{C}$ . Ферритовые магниты имеют достаточную механическую прочность и твёрдость (HRC 45-55; по Шору – 70).

Ферритовые магниты, будучи помещёнными в магнитную систему, создают весьма выгодную, с точки зрения магнитных свойств, конструкцию, способную создать в рабочем зазоре индукцию, значительно превышающую по величине индук-

цию литых магнитов. Иными словами, магнитные системы с ферритовыми магнитами способны трансформировать магнитную индукцию.

3. Сплавы металлов группы железа с редкоземельными металлами ( $\text{SmCo}_5$ ,  $\text{Sm}_2(\text{Co},\text{Fe})_{17}$ ,  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  и др.), представляющие собой интерметаллические соединения с исключительно высокой кристаллографической анизотропией с полями анизотропии напряжённостью 2,4...23,2 МА/м. В настоящее время промышленностью выпускаются четыре марки специальных магнитотвёрдых материалов на основе соединений Co с Sm и Pr по ГОСТ 21559-76 ( $\text{SmCo}_5$  наиболее технологичный из них).

Редкоземельные магниты обладают весьма высокими магнитными характеристиками и применяются в настоящее время в основном в космической и авиационной технике. Постоянные магниты марки КСП37А имеют остаточную магнитную индукцию  $B_r = 0,9\text{T}$  коэрцитивную силу по магнитной индукции  $H_{cb} = 500 \text{ кA/m}$ . Удельная магнитная энергия в 5-6 раз превышает удельную энергию ферритовых магнитов и достигает  $72 \text{ кДж/m}^3$ . Наивысший уровень магнитных свойств получен японскими исследователями. По данным фирмы «Синецу индастри» в материале  $\text{Sm}(\text{Co}_{0,8}\text{Cu}_{0,14}\text{Fe}_{0,06})_7$  марки «Реренет» получено значение максимальной магнитной энергии  $W_{max} = 108 \text{ кДж/m}^3$ . В лабораторных условиях на овоидных монокристаллах  $\text{SmCo}_5$  достигнуто значение  $H_{cb} > 2400 \text{ кA/m}$ ,  $W_{max} > 160 \text{ кДж/m}^3$ . Однако, малые размеры монокристаллов ограничивают возможности их применения. Температурный коэффициент индукции насыщения редкоземельных магнитов мал и составляет  $-0,03 \dots -0,05 \cdot 10^{-3} \text{ С}^{-1}$  при температурах до  $300^\circ\text{C}$ . Температура Кюри для сплава  $\text{SmCo}_5 = 724^\circ\text{C}$ .

Препятствие к широкому промышленному применению редкоземельных магнитов в их высокой стоимости, которая, однако, постоянно снижается по мере совершенствования технологии изготовления постоянных магнитов, в частности, за счёт замены чистого редкоземельного элемента их смесью, так называемым мишметаллом, обогащённым одним из элементов.

Высокая энергоёмкость, очень большие значения коэрцитивной силы, способность работать в больших размагничивающих полях, независимость магнитных параметров от статических и динамических нагрузок позволяют применять их в любых условиях и создают предпосылки для разработки новых конструкций магнитных ловителей бурового инструмента с весьма высокими силовыми и магнитными параметрами.

Для оценки качества магнитотвёрдого материала О.Ю. Пятиным [2] предложен критерий добротности как максимум произведения  $R_g R_{cm}$ :

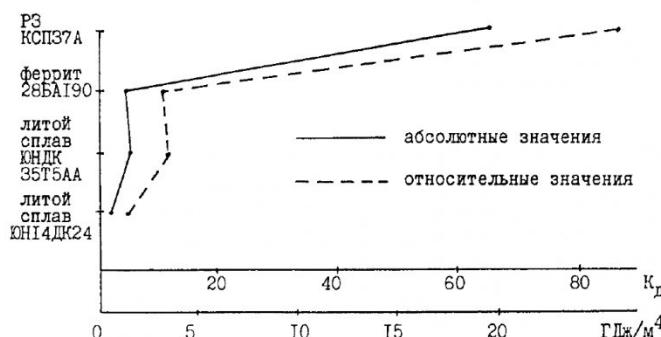
$$K_g = (R_g R_{cm})_{max} = (H_{cm,np} \cdot BH/2)_{max} \quad (2)$$

где  $R_g = BH/2$  – ресурс удельной энергии;  $R_{cm} = H_{cm,np}$  – ресурс стабильности, характеризующий предельно-допустимое значение внешнего размагничивающего поля, не вызывающее необратимой потери потока.

Обозначив через  $B_M$  и  $H_M$  координаты рабочей точки магнита, коэффициент магнитного возврата через  $K_b$ , и учитывая, что кривая размагничивания определяется как  $B_M = f(H_M)$ , получим:

$$K_g = (R_g R_{cm})_{max} = \left\{ \frac{H_M^2 [f(H_M) + H_M K_b]}{8} \right\}_{max}. \quad (3)$$

Максимум правой части можно найти аналитически, используя аппроксимирующую формулу кривой размагничива-



*Критерии добротности основных магнитотвёрдых материалов*

ния. Значения критерия добротности основных магнитотвёрдых материалов приведены в диаграмме, откуда следует, что критерии добротности ферритобариевых магнитов лишь не намного меньше, чем литых. Однако, как показано выше, ферритовые магниты обладают рядом преимуществ перед литыми материалами. Добротность же редкоземельных магнитов в 20 раз выше, чем у ферритов.

В результате проведённого анализа по основным параметрам делаем вывод о том, что в магнитных системах ловителей бурового инструмента следует использовать ферритовые и редкоземельные магниты.

Для изготовления магнитопроводов применяются следующие ферромагнитные материалы: технически чистое железо, качественная углеродистая сталь, серый чугун, электротехническая кремнистая сталь, железоникелевые сплавы, железокобальтовые сплавы и др.

Свойства магнитомягких материалов регламентируются ГОСТами 17809-72 и 13601-68. Магнитомягкие материалы, используемые в магнитных системах, должны обладать высокой индукцией насыщения  $B_h$ , вы-

сокой магнитной проницаемостью в средних и сильных полях  $\mu_m$ , низкой коэрцитивной силой  $H_c$ . Поскольку магнитопроводы часто одновременно выполняют роль корпусных и других деталей, несущих нагрузки, то при выборе материалов для их изготовления следует учитывать как магнитные, так и прочностные и технологические характеристики. Всем требованиям удовлетворяют качественные углеродистые стали, из которых для изготовления магнитопроводов наиболее подходящими являются стали марок СТ.3 и СТ.20 по ГОСТ 11036-75 и ТУ 14-1-233-77 с содержанием углерода от 0,07 до 0,35 %. Они имеют хорошие технологические и механические свойства (твёрдость по Бринеллю  $H_b=210/120$ , предел прочности  $\sigma_b=100/55$  кг/мм<sup>2</sup>, предел текучести  $\sigma_t=100/15$  кг/мм<sup>2</sup>), значительную индукцию насыщения  $B_h$  (до 2,15 T), малую коэрцитивную силу  $H_c$  (до 110 А/м), магнитную проницаемость  $\mu_m=2000-4000$ . Углеродистые стали широко выпускаются промышленностью в виде прямоугольных, круглых и других сечений.

Из всех известных в настоящее время магнитомягких материалов наилучшими магнитными свойствами обладают железокобальтовые сплавы (прецессионные магнитомягкие сплавы пермендор, супермендор, фимакс и др.) В них достигается минимальное значение константы магнитострикции и, следовательно, максимальное значение магнитной проницаемости  $\mu_m$ .

Магнитный сплав пермендор 49К2Ф (Co – 5 %, Fe – 48,2 %, V – 1,8 %) имеет индукцию насыщения  $B_h$  более 2,4 Т, коэрцитивную силу  $H_c = 100$  А/м, магнитную проницаемость  $\mu_m = 4500$ , температуру Кюри 980° С. Преимущества пермендора перед другими магнитомягкими материалами становятся очевидными, начиная с индукции 1,4 Т. Так, при величине индукции 1,8 Т проницаемость пермендора больше проницаемости углеродистой стали приблизительно в 40 раз. Препятствием к широкому использованию пермендора служит высокая стоимость и дефицитность кобальта.

При изготовлении немагнитных деталей ловителей используются латуни, бронзы и нержавеющие стали аустенитного класса. Сравнительно высокие механические свойства этих материалов увеличивают общую прочность магнитного ловителя. Заливка свободного пространства между магнитами и магнитопроводами производится силумином, а также эпоксидными смолами (ЭД-5, ЭД-6 и др.), удачно сочетающими физико-механические и технологические свойства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вонсовский С.В. Магнетизм. – М: Наука, 1973. – 1032 с.
2. Постоянные магниты: Справочник / Под ред. Ю.М. Пятин. – М.: Энергия, 1980. – 486 с.

□ Автор статьи:

Кобылянский  
Михаил Трофимович  
докт. техн. наук, проф., зав. каф. начертательной геометрии и графики