

## Магнитотвёрдые материалы

**Магнитотвёрдые материалы** (магнитожёсткие материалы), материалы с коэрцитивной силой по индукции  $H_{сВ}$  не менее 4 кА/м. Иначе их называют высококоэрцитивными материалами.

### Основные характеристики магнитотвёрдых материалов

Основными техническими параметрами магнитотвёрдых материалов, характеризующими их свойства, являются  $H_{сВ}$  (или нормальная коэрцитивность), коэрцитивная сила по намагниченности  $H_{сМ}$  (или внутренняя коэрцитивность), остаточная индукция  $B_r$ , остаточная намагниченность  $M_r$ , максимальное энергетическое произведение  $(BH)_{\text{макс}}$ , область рабочих температур, температура Кюри  $T_C$ , а также температурные коэффициенты  $\alpha$  обратимых изменений величин  $B_r$ ,  $H_{сВ}$ ,  $H_{сМ}$  и т. д.

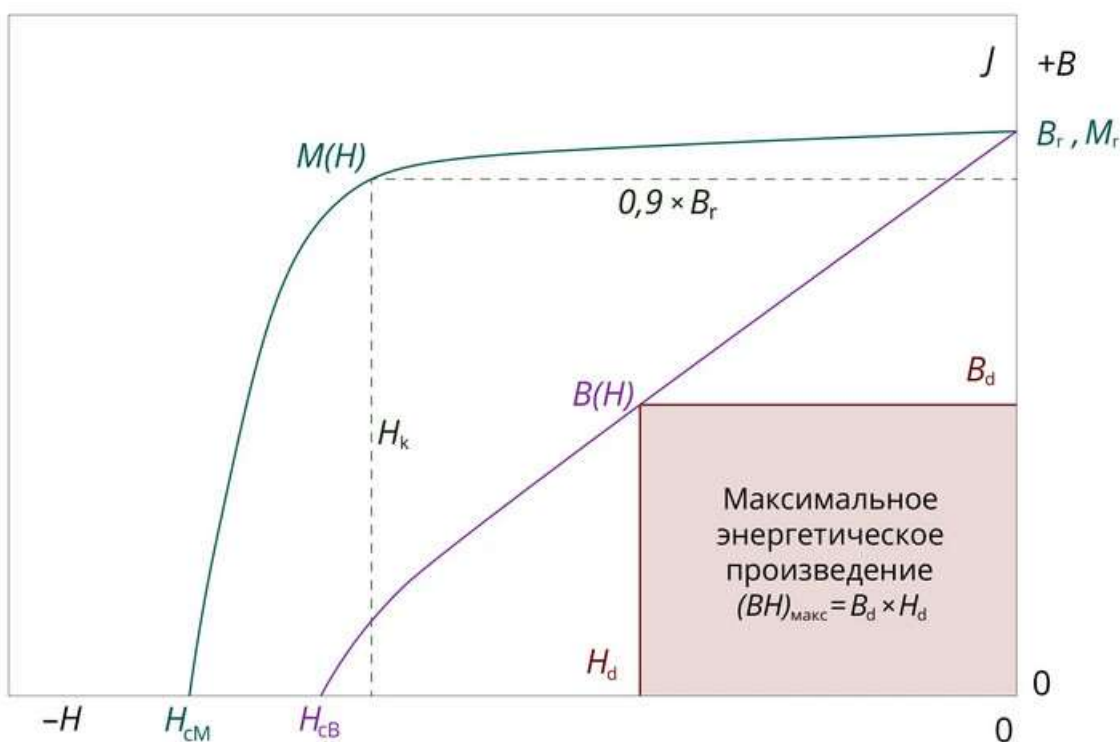


Рис. 1. Второй квадрант кривых размагничивания магнитотвёрдых материалов, полученных после намагничивания до насыщения, и основные магнитные параметры магнитотвёрдых материалов.

Магнитотвёрдые материалы – материалы с большими величинами  $H_{сВ}$ ,  $H_{сМ}$  и  $M_r$ . Параметры  $H_{сВ}$ ,  $H_{сМ}$ ,  $B_r$ ,  $M_r$  и  $(BH)_{\text{макс}}$  определяют из кривых размагничивания магнитотвёрдых материалов  $M(H)$  и  $B(H)$  (рис. 1). Зависимость намагниченности от напряжённости магнитного поля  $M(H)$ , как правило, используют в физике, а зависимость индукции магнитного поля от

напряжённости  $B(H)$  – в технике. Петля магнитного гистерезиса  $B(H)$  является геометрической суммой петли  $\mu_0 M(H)$  и  $\mu_0 H$  (с учётом знака поля) в соответствии с формулой  $B(H) = \mu_0(M(H) + H) = \mu_0 \mu H$ , где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot \text{м}^{-1}$  – магнитная постоянная. Величину  $(BH)_{\text{макс}}$  определяют из зависимости  $B(H)$  как максимальное произведение  $BH$  при изменении  $H$  и устанавливают наиболее энергетически выгодные условия эксплуатации изделий из магнитотвёрдых материалов с индукцией  $B_d$  в поле  $H_d$  (рис. 1).

В таблице 1 представлены основные параметры некоторых магнитотвёрдых материалов. Природа высоких значений коэрцитивной силы  $H_c$  в них определяется одним из трёх основных механизмов задержки процессов перемагничивания в магнетиках: необратимым вращением вектора их спонтанной намагниченности  $M_s$ ; задержкой образования и/или роста зародышей перемагничивания (зародышей магнитной фазы с иным направлением вектора спонтанной намагниченности  $M_s$ ); закреплением доменных стенок на различных локальных неоднородностях и структурных несовершенствах кристаллов.

*Таблица 1. Характеристики различных магнитотвёрдых материалов*

Основные параметры магнитотвёрдых материалов различных типов									
Тип материала	Марка материала	Состав, % по массе	$B_r$ , Тл	$H_c B$ , кА/м	$H_c M$ , кА/м	$(BH)_{\text{макс}}$ , кДж/м <sup>3</sup>	$\alpha(H_c B)$ , %/°C	$T_C$ , °C	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Литой	ЮНДКТ5 (тиконал)	7 % Al, 14 % Ni, 35 % Co, 3,5 % Cu, 5 % Ti, 0,8 % Nb, остальное Fe	1,1	120		88	–0,01		7,5
	23X15K5 ФА	23 % Cr, 15 % Co, 5 % V, остальное Fe	1,25	42		38	0,015		7,65
Спечённый	KC37	38,5 % Sm, остальное Co	0,77	540	1300	110	–0,045	730	8,2
	KC25ДЦ240	25 % Sm, 2,8 % Zr, 19 % Fe, 5,2 % Cu,	1,1	780	900	240	–0,03		

		остальное Co							
	НмБ 320/120	30 % Nd, 0– 20 % Co, 1–2 % В, 0– 25 % Dy, Pr, Tb, остальное Fe	1,3 5	940	>120 0	360	–0,12	59 3	7,6
	28БА190 (бариевый феррит)	BaO·6Fe2 O3	0,3 9	185	190	28	–0,2	45 0	5,1

*Примечание. Материалы ЮНДКТ5, 23Х15К5ФА, КС25ДЦ240 двухфазны и имеют две температуры Кюри.*

Из магнитотвёрдых материалов изготавливают постоянные магниты, эксплуатационные характеристики которых совпадают с вышеперечисленными основными параметрами магнитотвёрдых материалов. Постоянные магниты должны сохранять свои магнитные свойства длительное время, а любое намагниченное состояние магнитотвёрдого материала является метастабильным, поэтому микроструктура и химический состав магнитотвёрдых материалов формируются таким образом, чтобы максимально увеличить временную стабильность величин коэрцитивной силы, гистерезиса и других магнитных свойств. При этом временная стабильность не связана с временем релаксации или магнитной вязкостью, а определяется термодинамикой физико-химических процессов. В настоящее время магнитные характеристики лучших магнитотвёрдых материалов (а следовательно, и постоянных магнитов на их основе) изменяются не более чем на несколько процентов за десятилетия эксплуатации в составе изделия или хранения изделия на открытых площадках.

### **Классификация магнитотвёрдых материалов**

Основные типы магнитотвёрдых материалов: литые, спечённые и композиционные. Литые сплавы на основе систем железо – никель – алюминий – кобальт, легированные медью, титаном, ниобием, промышленно выпускаются с 1930-х гг. Эти сплавы могут быть изотропными и анизотропными. Изотропные литые магнитотвёрдые материалы имеют более низкие значения основных магнитных параметров, но являются более дешёвыми, чем анизотропные. Такие сплавы обрабатываются шлифовкой или электроэрозионной резкой. К их преимуществам относятся: высокая однородность свойств по объёму, высокая температурная стабильность,

способность работать при высоких температурах (до 450 °C), высокая радиационная стойкость. Эти материалы используются в магнитных системах измерительных приборов, сейсмодатчиках, прецизионных электродвигателях и в военной технике. К литым магнитотвёрдым материалам также относятся сплавы на основе системы железо – кобальт. Их преимущество – в наличии пластической деформации даже в высококоэрцитивном состоянии.

Спечённые магнитотвёрдые материалы изготавливают путём прессования порошков (размер частиц до 2–3 мкм) в магнитном поле с последующим спеканием. Различают следующие типы спечённых магнитотвёрдых материалов: ферритовые магнитотвёрдые материалы, материалы на основе соединений типа  $\text{SmCo}_5$  и  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ , магнитотвёрдые материалы на основе соединения  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ . В настоящее время применяют различные технологии для изготовления спечённых магнитотвёрдых материалов – измельчение сплава, текстурирование в магнитном поле, спекание, кристаллизация из аморфного состояния, горячая деформация аморфного материала, HDDR-технология (гидрирование – дегидрирование – деспропорционизация – рекомбинация). Основными достоинствами спечённых магнитотвёрдых материалов являются: наличие отработанных технологий для их массового производства, существенно более высокие характеристики магнитных свойств, чем у магнитотвёрдых материалов других типов. Магнитотвёрдые материалы этой группы, имея общую керамическую технологию изготовления, существенно различаются между собой по магнитным параметрам и стоимости.

Ферритовые магнитотвёрдые материалы могут быть изотропными и анизотропными; они самые дешёвые и распространённые. Кроме низкой стоимости к их достоинствам относятся более высокие значения  $H_c$ , чем у литых магнитотвёрдых материалов. Стронциевый феррит  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  – практически единственный материал, величина  $H_cM$  которого не убывает, а возрастает при увеличении температуры (рис. 2).

Магнитотвёрдые материалы типа  $\text{Sm-Co}$  разработаны в конце 1960-х гг. К их достоинствам относятся высокие магнитные свойства (уступают только  $\text{Nd-Fe-B}$ ), высокая температурная стабильность, позволяющая использовать их при температуре до 500 °C, и высокая коррозионная стойкость.

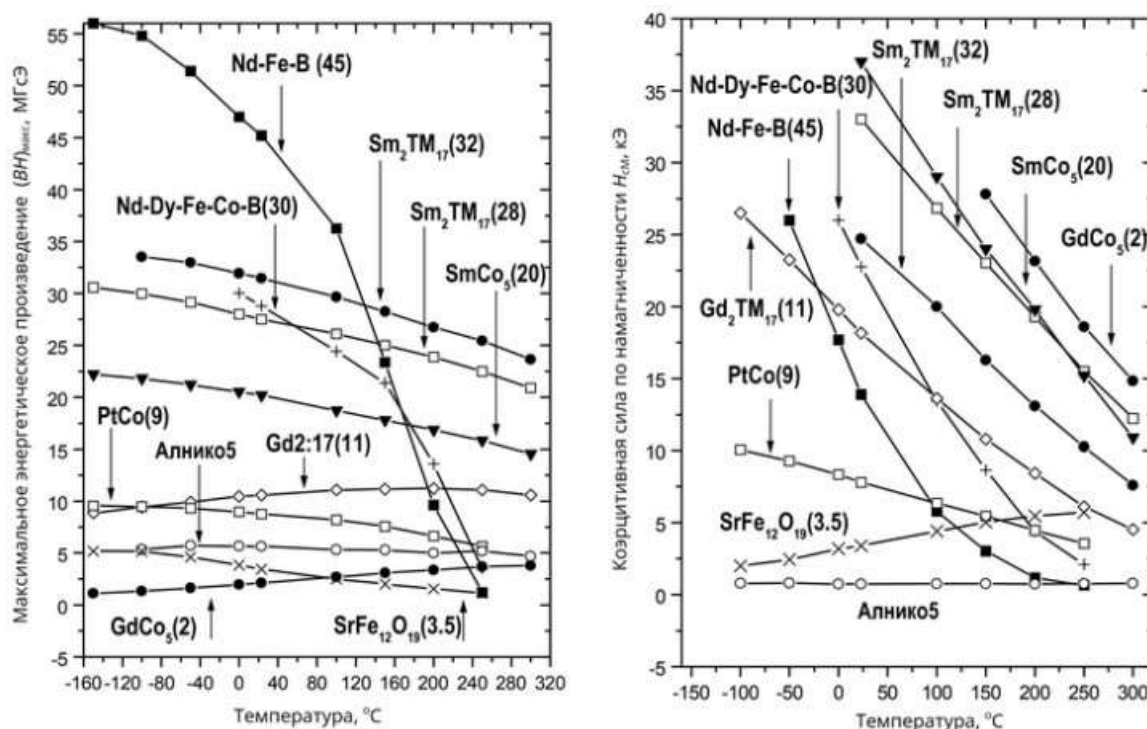


Рис. 2. Влияние температуры на магнитные параметры различных марок магнитотвёрдых материалов. Цифры в скобках возле химических формул обозначают величину энергетического произведения. Графики из статьи: Walmer M. S. A new class of Sm-TM magnets for operating temperatures up to 550/spl deg/C / M. S. Walmer, C. H. Chen, V. H. Walmer // IEEE Transactions on Magnetics. 2000. Vol. 36, № 5. P. 3376–3381. Перевод: БРЭ.

Магнитотвёрдые материалы типа Nd–Fe–B разработаны в середине 1980-х гг. Их преимущества: самые высокие значения  $(BH)_{\text{макс}}$  (до 440 кДж/м<sup>3</sup>) и более низкая по сравнению с Sm–Co стоимость. Эти материалы имеют сильную зависимость свойств от температуры (применяют до 180 °C) (рис. 2), низкую коррозионную стойкость и, как правило, требуют нанесения защитных покрытий (цинк, никель и т. п.). Особенно эта проблема значима при их использовании в среде углеводородов (нефть, бензин). В стоимостном выражении доля магнитотвёрдых материалов типа Nd–Fe–B наибольшая из всех производимых магнитотвёрдых материалов и составляет примерно 15 млрд долл. США из общего объёма рынка магнитотвёрдых материалов (23 млрд долл. США в 2020). Это связано в том числе с постоянным прогрессом в технологии и параметрах производимых магнитотвёрдых материалов. В весовом выражении производство ферритов составляет 900 тыс. т, в то время как магнитотвёрдых материалов типа Nd–Fe–B – только 156 тыс. т из общего объёма производства всех видов магнитотвёрдых материалов (1150 тыс. т в 2020).

В таблице 2 приведены значения магнитных параметров современных магнитотвёрдых материалов типа Nd–Fe–B и проведено их сопоставление с максимальными значениями по группам материалов ГОСТ Р 52956.

*Таблица 2. Значения магнитных параметров современных магнитотвёрдых материалов марок Nd2Fe14B*

Марка материала магнита	Br, Тл	HсВ, кА/м	HсМ, кА/м	(BH)макс, кДж/м3
N54	1,47–1,5	836	876	406–438
N52H	1,43	995	1350	390–422
N50SH	1,4	995	1592	374–406
N48UH	1,36	971	1990	358–390
N45EH	1,32	955	2388	335–366
N38TH	1,22	876	2627	287–310

К композиционным магнитотвёрдым материалам относят полимерные постоянные магниты, или магнитопласты. По технологии изготовления они могут быть литыми и прессованными. В таблице 3 приведены максимально возможные параметры промышленно выпускаемых литых и прессованных магнитопластов. Видно, что магнитные параметры прессованных магнитопластов выше, чем у литых. Достоинства литых магнитопластов – большая механическая прочность, возможность изготовления из них магнитов сложной формы без дополнительной механической обработки или даже сразу готового изделия с магнитом (например, ротор электродвигателя с валом и магнитом). Как правило, магнитопласты используются для изготовления многополюсных постоянных магнитов.

*Таблица 3. Магнитные параметры современных литых и прессованных магнитопластов*

Магнитные параметры магнитопластов	Литые магнитопласты	Прессованные магнитопласты
Br (Тл)	0,6	0,77
HсВ (кА/м)	350	490
HсМ (кА/м)	700	1100
(BH)макс (кДж·м3)	60	92

При выборе прессованных магнитопластов для постоянных магнитов надо учитывать не только величины магнитных параметров магнитотвёрдых материалов разных типов, но и их временную стабильность и стойкость к внешним воздействующим факторам. При отсутствии воздействия внешних размагничивающих полей лучшая временная стабильность у литых типа ЮНДК (Миткевич. 2015).

При совокупности внешних воздействующих факторов (внешние электромагнитные поля, температура, соляной туман, влага) наилучшую стойкость имеют магнитотвёрдые материалы типа Sm2Co17 (KC25 в

русской терминологии). В большинстве магнитотвёрдых материалов параметры  $(BH)_{\text{макс}}$  и  $H_cM$  убывают с ростом температуры; наиболее сильно это проявляется в материалах Nd–Fe–B и Nd–Dy–Fe–Co–B (рис. 2).

### **Применение магнитотвёрдых материалов**

Магнитотвёрдые материалы применяются для производства постоянных магнитов, записи магнитной информации и т. д. Они являются источниками постоянных магнитных полей, используемых в различной аппаратуре в электро- и радиотехнике, автоматике, приборостроении, электронике. Каждый автомобиль, компьютер, мобильный телефон имеет несколько (современные автомобили – несколько десятков) устройств, в состав которых входят постоянные магниты. В настоящее время производятся синхронные электромашин на постоянных магнитах мощностью до 65 МВт. Для низкооборотных электромашин (ветряков, морских приводов и т. п.) нормальным уровнем является масса в 800–1000 кг постоянных магнитов, выполненных из редкоземельных магнитотвёрдых материалов, приходящаяся на 1 МВт мощности.

Тишин Александр Метталинович, Лилеев Алексей Сергеевич,  
Надеев Михаил Михайлович

### **Библиография:**

- Мишин Д. Д. Магнитные материалы : учебное пособие для студентов вузов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1991.
- Thermal stability of Sm–TM high temperature magnets at 300–550 C / С. Н. Chen, М. S. Walmer, М. Н. Walmer [et al.] // IEEE Transactions on Magnetics. – 2000. – Vol. 36, № 5. – P. 3291–3293.
- Миткевич А. В. Стабильность постоянных магнитов. – Изд. 2-е. – Москва : URSS : Ленанд, 2015.