

## Нанокристаллические магнитомягкие материалы

Нанотехнологии не обошли стороной магнитомягкие материалы, используемые для изготовления трансформаторов, реакторов и других электромагнитных компонентов в силовой электронике, в системах связи и обработки данных. Первый нанокристаллический магнитомягкий сплав разработали японские инженеры Йошизава, Ямаучи и Огума в компании Hitachi Metals (японская заявка на патент от 1986 года). Через несколько лет после публикации первых результатов [1] новые материалы стали широко использоваться во всем мире.

Юрий СТАРОДУБЦЕВ  
yunstar@mail.ru  
Владимир БЕЛОЗЕРОВ

Основным параметром, характеризующим мягкость магнитных материалов, то есть их способность намагничиваться, является коэрцитивная сила. Чем ниже коэрцитивная сила, тем более слабое магнитное поле может довести материал до насыщения. На рис. 1 представлена зависимость коэрцитивной силы  $H_c$  от размера зерна  $d$  в поликристаллических магнитомягких материалах. С уменьшением размера зерна примерно до 100 нм коэрцитивная сила растет пропорционально величине  $1/d$  вследствие увеличения плотности дефектов (объемной доли межзеренных границ). При этом макроскопическая магнитная анизотропия материала совпадает с локальной магнитной анизотропией отдельных кристаллитов. Если размер зерна меньше некоторой длины, а именно длины магнитной обменной корреляции, то происходит ослабление макроскопической магнитной анизотропии вследствие межзеренного взаимодействия. При этом коэрци-

тивная сила снижается с уменьшением размера зерна пропорционально  $d^6$ . Объяснение этому эффекту дает модель случайной магнитной анизотропии [2].

Технология производства нанокристаллических магнитомягких материалов включает получение из расплава быстрозакаленной ленты с аморфной структурой толщиной до 30 мкм и последующую нанокристаллизацию аморфного прекурсора в результате термической обработки. Первооткрыватели нанокристаллических магнитомягких материалов использовали сплав на основе железа  $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$ . В настоящее время этот сплав с небольшими вариациями по химическому составу остается основным для производства нанокристаллических магнитомягких материалов. Кремний и бор, как обычно, используют для получения аморфной структуры в быстрозакаленной ленте. Медь способствует формированию кластеров, обогащенных медью на начальной стадии отжига,

и обеспечивает начало кристаллизации из большого числа центров по всему объему материала. Ниобий формирует более мелкие кластеры меди, сдерживает рост кристаллической фазы до более высокой температуры и препятствует формированию боридов железа. В результате нанокристаллизации формируются зерна  $Fe_{80}Si_{20}$  с о. ц. к. решеткой, имеющие размер около 10 нм и окруженные остаточной аморфной фазой. Объемная доля кристаллической фазы составляет примерно 0,7. В настоящее время разработаны сплавы с нанозернами из  $\alpha$ -Fe («наноперм») и  $\alpha'$ -FeCo («хитперм»), которые имеют более высокую магнитную индукцию насыщения — 1,7 и 2,0 Тл соответственно. Однако ввиду значительных технологических трудностей эти нанокристаллические сплавы не получили заметного применения в технике.

Чтобы определить место нанокристаллических сплавов в семействе магнитомягких материалов, воспользуемся графиками,

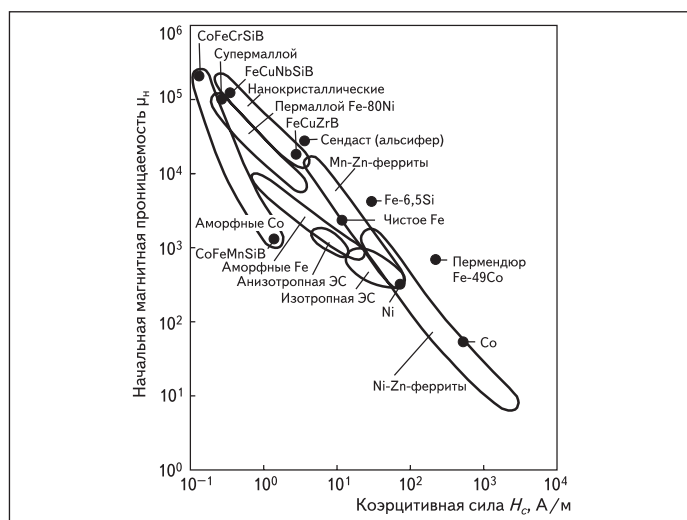


Рис. 1. Зависимость коэрцитивной силы  $H_c$  от размера зерна  $d$  в магнитомягких материалах

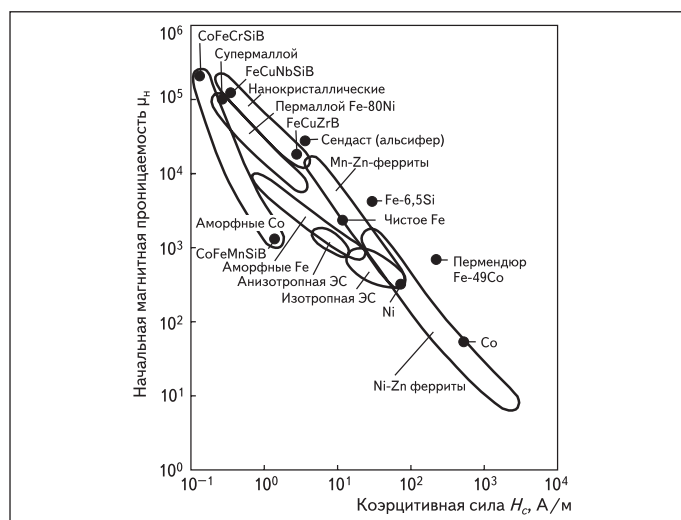


Рис. 2. Взаимосвязь начальной магнитной проницаемости  $\mu_n$  и коэрцитивной силы  $H_c$  в магнитомягких материалах

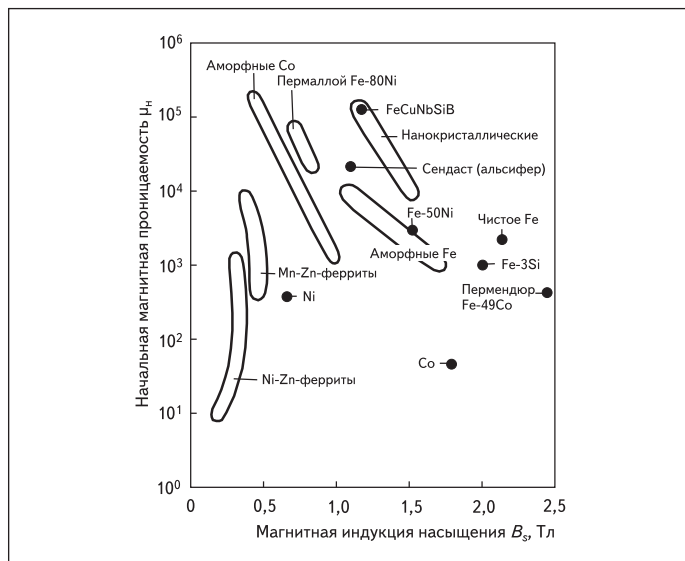


Рис. 3. Взаимосвязь начальной магнитной проницаемости  $\mu_n$  и магнитной индукции насыщения  $B_s$  в магнитомягких материалах

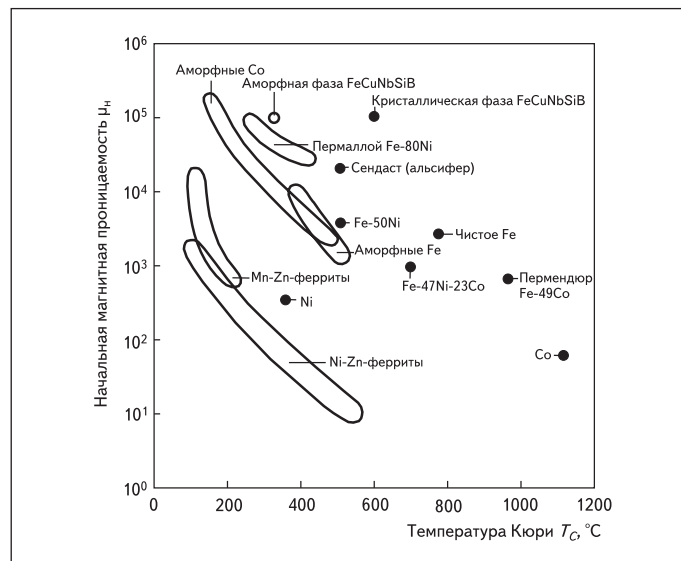


Рис. 4. Взаимосвязь начальной магнитной проницаемости  $\mu_n$  и температуры Кюри  $T_c$  в магнитомягких материалах

на которых представлена взаимосвязь магнитных параметров материала. Такая взаимосвязь отражает единую природу ферромагнитных материалов, связанную с формированием в них спонтанной намагниченности. На рис. 2 схематически нанесены области начальной магнитной проницаемости и коэрцитивной силы, соответствующие различным магнитомягким материалам. Видно, что нанокристаллические сплавы относятся к группе материалов с высокой магнитной проницаемостью и этот уровень является наивысшим для материалов с коэрцитивной силой порядка 1 А/м. Заметим, что основой нанокристаллических сплавов служит недорогое железо, в то же время их конкуренты в данной группе материалов — аморфные сплавы и пермаллой — изготавливаются на основе кобальта и никеля соответственно.

Магнитная индукция насыщения  $B_s$  характеризует потенциальную энергоёмкость материала. Для разных магнитных материалов, представленных на рис. 3, видна тенденция снижения магнитной проницаемости с увеличением  $B_s$ . Этой закономерности нет у ферритов, которые относятся к ферромагнетикам с косвенным обменным взаимодействием. На общем фоне нанокристаллические сплавы выделяются наилучшей комбинацией высокой магнитной индукции насыщения и начальной магнитной проницаемости.

Важной характеристикой магнитомягких материалов является температура Кюри, которая определяет температурную область применения. Опять же вследствие общих закономерностей ферромагнитного состояния высокая температура Кюри и высокая магнитная проницаемость несовместимы (рис. 4). Самой большой начальной магнитной проницаемостью обладают аморфные сплавы на основе кобальта, имеющие температуру Кюри ниже 200 °С. Нанокристаллический магнитомягкий

сплав  $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$  является двухфазным. Его основу составляют нанозерна  $\text{Fe}_{80}\text{Si}_{20}$  с температурой Кюри  $T_c \approx 600$  °С, магнитное взаимодействие между которыми осуществляется через ферромагнитную аморфную фазу, обогащенную ниобием и бором. Температура Кюри аморфной матрицы  $T_c \approx 300$  °С значительно ниже, чем у нанокристаллов. Поэтому при нагреве выше 300 °С межкристаллитная прослойка теряет ферромагнитные свойства. Нарушение магнитной связи приводит к снижению магнитной проницаемости и повышению коэрцитивной силы, а коэффициент прямоугольности петли магнитного гистерезиса приближается к значению  $B_r/B_s \approx 0,83$ , теоретически рассчитанному для случайного ориентированных не взаимодействующих кристаллитов [2] (рис. 5). Таким образом, условная верхняя граница применимости нанокристаллических сплавов в качестве магнитного материала с высокой магнитной проницаемостью составляет примерно 200 °С.

Наиболее существенное изменение магнитной проницаемости с температурой происходит вблизи  $T_c$  (эффект Гопкинсона). Маг-

нитомягкие материалы с высокой магнитной проницаемостью имеют низкую температуру Кюри, поэтому они обладают значительной температурной нестабильностью магнитной проницаемости. Благодаря двухфазной структуре и высокой температуре Кюри нанокристаллического сплава слабо изменяется с температурой и остается стабильно высокой в области от  $-200$  до  $+200$  °С (рис. 5).

Нанокристаллы кремнистого железа обеспечивают хорошую восприимчивость сплава к различным видам термической обработки. За счет выбора режима отжига можно получить магнитопроводы с высокой магнитной проницаемостью, низкой или высокой остаточной магнитной индукцией [3]. При этом петля магнитного гистерезиса является округлой, линейной или прямоугольной (рис. 6). Другие магнитные характеристики этих магнитопроводов, которые были измерены при температуре 25 °С, представлены в таблице 1. Магнитопроводы производятся на Научно-производственном предприятии ГАММАМЕТ, которое обладает

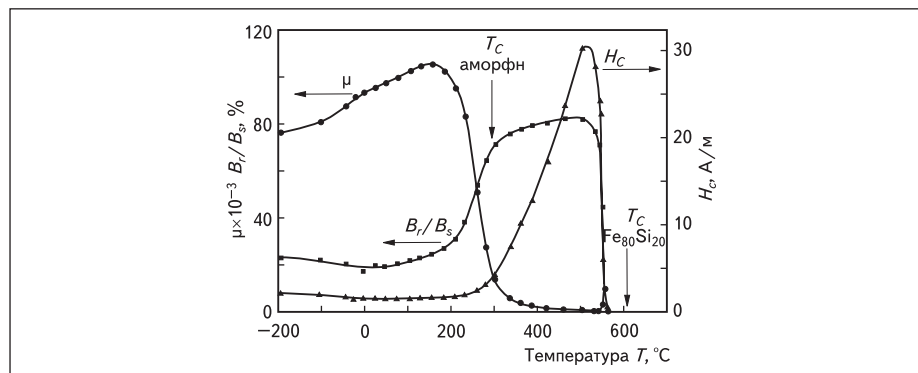
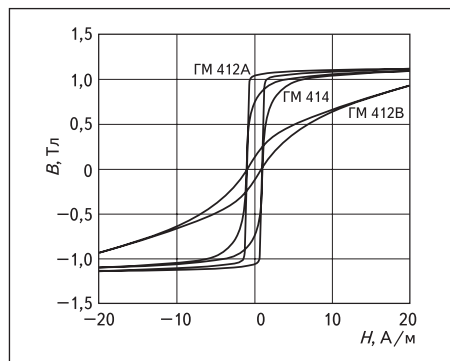


Рис. 5. Температурная зависимость начальной магнитной проницаемости  $\mu_n$ , коэрцитивной силы  $H_c$  и коэффициента прямоугольности петли магнитного гистерезиса  $B_r/B_s$

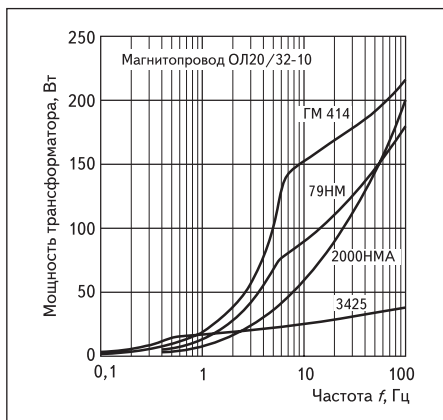


**Рис. 6.** Статические петли магнитного гистерезиса в нанокристаллическом сплаве после термической обработки в продольном (ГМ 412А) и поперечном (ГМ 412В) магнитном поле, а также без магнитного поля (ГМ 414)

рядом патентов на нанокристаллические сплавы и изделия из них на территории России [4]. В таблице следует обратить внимание на низкую магнитострикцию сплава и сильную зависимость магнитных потерь от типа петли магнитного гистерезиса и, в конечном счете, от характера процесса перемагничивания. Магнитные свойства, приведенные в таблице, соответствуют свойствам магнитного материала, поэтому в электротехнических расчетах необходимо учитывать коэффициент заполнения магнитопровода магнитным материалом, номинальное значение которого равно 0,7 для ленты толщиной 25 мкм.

Низкая магнитострикция насыщения в нанокристаллических сплавах способствует получению высоких магнитных свойств также в магнитопроводах, которые упрочняются за счет пропитки различными клеями. Некоторое ухудшение свойств в этом способе производится компенсируется значительным расширением выбора типоразмеров магнитопроводов. Можно считать, что после пропитки магнитопровод представляет композиционный материал, а его магнитные свойства соответствуют параметрам, усредненным по объему и поперечному сечению магнитопровода. Именно усредненные магнитные свойства композиционных магнитопроводов ГАММАМЕТ представлены в таблице 2. В электротехнических расчетах композиционных магнитопроводов коэффициент заполнения принимается равным 1, как у ферритов и магнитодиэлектриков.

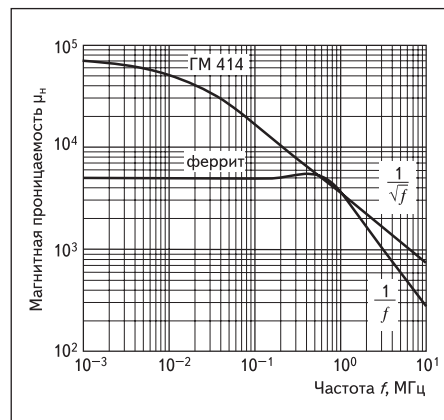
Хорошая механическая обрабатываемость нанокристаллического сплава позволяет придавать ленточным магнитопроводам различ-



**Рис. 7.** Частотная зависимость мощности трансформатора при температуре перегрева не более 20 °С. Магнитопровод трансформатора имеет типоразмер ОЛ20/32–10 и изготовлен из разных магнитомягких материалов: нанокристаллический сплав ГМ 414, пермаллой 79НМ (0,02 мм), феррит 2000НМА и электротехническая сталь 3425 (0,08 мм)

ную форму. Это разрезные ПЛ- и ШЛ-образные магнитопроводы ГМ 24ДС, магнитопроводы ГМ 54ДС с фиксированным воздушным зазором и различным уровнем относительной магнитной проницаемости от 30 до 1000 — аналоги магнитопроводов из порошкообразного пермаллоя, а также стержневые магнитопроводы [4].

Широкий спектр магнитопроводов, которые можно изготовить из нанокристаллических сплавов, определяет и широкие возможности их применения в качестве трансформаторов, реакторов различного назначения и других электромагнитных компонентов. Уровень магнитных потерь можно оценить, сравнивая силовые трансформаторы, идентичные по своим электрическим и габаритным параметрам, но изготовленные из разных магнитных материалов [5]. На рис. 7 приведены частотные зависимости мощности трансформаторов, изготовленных на магнитопроводе ОЛ20/32-10 с гарантированной температурой перегрева не более 20 °С, плотностью тока в обмотках  $J = 3 \times 10^6$  А/м<sup>2</sup> и коэффициентом заполнения окна магнитопровода проводом первичной и вторичной обмоток  $k_M = 0,2$ . Из рисунка следует, что практически до 100 кГц мощность трансформатора с магнитопроводом ГМ 414 выше, чем при использовании других магнитных материалов. Исключение составляет электротехническая сталь 3425 при частоте менее 800 Гц, которая может работать в этой области при высокой рабочей индукции, обеспечивая заданный уровень тем-



**Рис. 8.** Частичная зависимость магнитной проницаемости в нанокристаллическом сплаве ГМ 414 и в феррите

пературы перегрева. Магнитопроводы ГМ 414 имеют наиболее значительное преимущество в частотном диапазоне 5–40 кГц.

Из сравнения частотных зависимостей магнитной проницаемости следует, что в широкой частотной области нанокристаллические сплавы имеют более высокую магнитную проницаемость, чем в ферритах (рис. 8). При частоте более 1 МГц преимущество определяется более слабым наклоном кривой, определяемым скин-эффектом, который обратно пропорционален корню квадратному из частоты ( $1/\sqrt{f}$ ). В то же время в ферритах более крутой наклон  $1/f$  связан с затуханием колебания доменных границ в материале [3].

Из приведенных выше данных можно сделать вывод, что нанокристаллические сплавы на основе железа представляют наиболее универсальный магнитомягкий материал, который можно использовать в широкой области частоты и температуры. ■

## Литература

1. Yoshizawa Y., Oguma S., Yamauchi K. New Fe-based magnetic alloys composed of ultrafine grain structure // J. Appl. Phys. 1988. V. 64, N 10.
2. Herzer G. Nanocrystalline soft magnetic alloys // Handbook of magnetic materials. V. 10 / Ed. by K. H. J. Bushow. Amsterdam: Elsevier Science. 1997.
3. Стародубцев Ю. Н., Белозеров В. Я. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов. Екатеринбург: Издательство Уральского университета. 2002.
4. [www.gammamet.ru](http://www.gammamet.ru)
5. Стародубцев Ю. Н. Теория и расчет трансформаторов малой мощности. М.: РадиоСофт. 2005.

**Таблица 1.** Типичные магнитные свойства магнитопроводов ГАММАМЕТ, изготовленных из нанокристаллического сплава

Марка	$B_r$ , Тл	$B_r/B_s$	$H_c$ , А/м	$\mu$ ( $H_m = 0,08$ А/м)	$\mu_{max}$	$P$ , Вт/кг ( $B_m = 0,2$ Тл, 20 кГц)	$\lambda_s \times 10^{-4}$	$T_c$ , °С
ГМ 414	1,17	0,60	1,0	60 000	30 000	4,5	1,5	600
ГМ 412А	1,17	0,90	1,2	10 000	60 000	10	< 1	610
ГМ 412В		0,05	1,2	30 000	45 000	2,5		

**Таблица 2.** Типичные магнитные свойства кольцевых композиционных магнитопроводов ГАММАМЕТ, изготовленных из нанокристаллического сплава

Марка	$B_r$ , Тл	$B_r/B_s$	$H_c$ , А/м	$\mu$ ( $H_m = 0,08$ А/м)	$\mu_{max}$	$P$ , мВт/см <sup>3</sup> ( $B_m = 0,2$ Тл, 20 кГц)	$\lambda_s \times 10^{-4}$	$T_c$ , °С
ГМ 14ДС	0,8	0,50	2,0	20 000	50 000	70	1,5	600
ГМ 32ДС	0,8	0,88	2,0	7000	200 000	130	< 1	610
ГМ 42ДС		0,1		20 000	25 000	80		