

**МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

*А.А.ПРЕОБРАЖЕНСКИИ*

# МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Д о п у щ е н о  
Министерством высшего и среднего  
специального образования СССР  
в качестве учебного пособия  
для студентов электротехнических  
и радиотехнических специальностей вузов



ИЗДАТЕЛЬСТВО „ВЫСШАЯ ШКОЛА“  
Москва — 1965

В книге кратко изложены основные представления о физических процессах, происходящих в ферромагнитных металлах, сплавах и ферритах. Рассмотрены требования, предъявляемые к различным группам магнитных материалов, и их свойства. Описаны технологические операции, выполняемые на заводах-потребителях магнитных материалов. Даны некоторые сведения об измерении свойств магнитных материалов.

Книга предназначена в качестве учебного пособия по магнитным материалам для студентов электротехнических и радиотехнических специальностей, а также может быть полезна инженерам-электрикам и радистам, занимающимся вопросами использования магнитных материалов.

Рецензенты:

кафедра «Электрические материалы и кабели» Московского энергетического института  
доцент Московского института стали и сплавов  
*И. И. Кифер*

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ

**В** настоящее время курс «Магнитные материалы» читается для студентов небольшого числа специальностей электротехнических вузов. В Ленинградском электротехническом институте им. В. И. Ульянова (Ленина) он включен в учебный план специальности 0604 «Диэлектрики и полупроводники». Студенты остальных специальностей знакомятся с магнитными материалами лишь в общем курсе электротехнических материалов, а также при рассмотрении отдельных вопросов в специальных курсах («Электромагнитные элементы автоматики», «Магнитные измерения» и др.).

Между тем, в связи с ростом значения магнитных материалов в технике, студентам во многих случаях приходится сталкиваться с выбором магнитных материалов, их свойствами, измерениями параметров и другими подобными вопросами. Существующие монографии, как правило, имеют большой объем, посвящены только отдельным группам материалов, имеют в большинстве случаев металловедческий уклон.

Настоящая книга является попыткой создания учебного пособия, знакомящего со всеми группами современных магнитных материалов.

В книге рассмотрены требования, предъявляемые к магнитным материалам, и их свойства; технологические операции, выполняемые на электротехнических заводах-потребителях магнитных материалов (например, отжиг пермаллоя; стабилизация свойств и намагничивание постоянных магнитов и т. п.); некоторые вопросы магнитных измерений\*.

---

\* При рассмотрении магнитных измерений предполагалось, что общие сведения в этой области студенту известны, например, в объеме книги «Электрические измерения». Общий курс. Под ред. А. В. Фремке. Госэнергоиздат, 1963.

Физика ферромагнетизма, специальная химия, металлургические вопросы рассмотрены в объеме, необходимом для понимания основного содержания книги.

При составлении книги возникли большие трудности. В учебном пособии необходимо использовать установившуюся классификацию, терминологию и основные понятия. Между тем в области магнитных материалов многие из этих вопросов еще не решены. Например, неясно, как лучше и правильнее рассматривать ферриты: в отдельном разделе как «полупроводниковые ферромагнетики» или в каждой из основных групп материалов (магнитномягких, магнитотвердых, магнитоstrictionных и т. п.); как поступить с единицами измерений—с одной стороны, необходимо пользоваться системой СИ, с другой — большинство действующих нормативных материалов на магнитные материалы составлено в СГСМ. Подобные вопросы возникали и в области терминологии, основных определений и т. п.

Формулы и единицы измерения в некоторых случаях даны в двух системах — СИ и СГСМ, или же использованы единицы, являющиеся для данных материалов наиболее принятыми и соответствующие стандартам.

В составлении учебного пособия приняли участие Е. П. Балашов, написавший § 27 и 34, и Д. Г. Райцин, написавший § 28 и 35. Автор выражает им свою признательность.

Автор выражает благодарность рецензентам проф. Н. Г. Дроздову и доц. И. И. Киферу за ряд полезных замечаний, сделанных ими при просмотре рукописи, а также проф. В. С. Меськину и канд. физ.-мат. наук Н. Н. Шольц за ценные советы.

Особую признательность автор выражает проф. В. В. Пасынкову, проявившему большое внимание к настоящей работе.

*Автор*

---

## ВВЕДЕНИЕ

### § 1. ВЕЛИЧИНЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ПОВЕДЕНИЕ ТЕЛ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ, И ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ

**М**агнитное поле возникает при изменении электрического поля, в частности, в результате движения электрических зарядов. Движение электрона в атоме можно формально рассматривать как элементарный ток  $i$ , создающий магнитное поле, свойства которого однозначно характеризует магнитный момент тока:

$$\Delta \bar{M} = i \bar{S}, \quad (1)$$

где  $\bar{S}$  — векторная величина площади, охватываемой током.

Результирующий магнитный момент  $\bar{M}$  некоторого объема вещества равен геометрической сумме магнитных моментов элементарных токов, т. е.

$$\bar{M} = \Sigma \Delta \bar{M}. \quad (2)$$

Величина магнитного момента может быть непосредственно измерена магнетометром.

Для характеристики степени намагничивания тела пользуются понятием намагниченности (интенсивности намагничивания)  $\bar{J}$ , которая определяется как магнитный момент, отнесенный к единице объема  $V$ . В общем случае

$$\bar{J} = \frac{d\bar{M}}{dV}. \quad (3)$$

Для однородно намагниченного тела

$$\bar{J} = \frac{\bar{M}}{V}. \quad (4)$$

Для характеристики внешнего поля в данной точке пространства вводится понятие напряженности магнитного поля  $\bar{H}$ . Напряженность поля представляет собой меру механических сил, проявляющихся в магнитном поле. В частности, напряженность

поля характеризует силу, с которой притягиваются или отталкиваются проводники с протекающими по ним электрическими токами.

Единицами напряженности поля являются: в системе СИ — ампер на метр ( $a/m$ ), в системе СГСМ — эрстед ( $\text{э}$ )<sup>\*</sup>.

Отметим, что здесь и в дальнейшем будем иметь в виду, что уравнения электромагнитного поля в системе СИ применяют в рационализованной форме, а в системе СГСМ — в нерационализованной.

Напряженность поля в кольцевом образце, имеющем средний радиус  $R_{\text{ср}}$ , с равномерно наложенной на нем обмоткой с числом витков  $\omega$ , по которой протекает ток  $I$ , определяется по формулам

в системе СИ

$$H = \frac{\omega I}{2\pi R_{\text{ср}}} [a/m], \quad (5)$$

в системе СГСМ

$$H = \frac{0,4\pi\omega I}{2\pi R_{\text{ср}}} [\text{э}]. \quad (5')$$

Из уравнений (5) и (5') следует, что  $1 \text{ э} = 79,6 a/m$ <sup>\*\*</sup>.

Если поместить намагничиваемое тело во внешнее поле, то соотношение между  $\vec{H}$  и  $\vec{J}$  можно представить

в системе СИ

$$\vec{J} = k_m \vec{H}, \quad (6)$$

в системе СГСМ

$$\vec{J} = \kappa \vec{H}. \quad (6')$$

При этом справедливо следующее соотношение:

$$k_m = 4\pi\kappa, \quad (7)$$

где  $\kappa$  ( $k_m$ ) — магнитная восприимчивость.

В зависимости от величины  $\kappa$  и характера ее изменения от напряженности поля и температуры различают следующие виды веществ: диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики (и ферримагнетики). Для диамагнетиков  $\kappa \approx -10^{-6}$ , т. е. меньше нуля и мала; для парамагнетиков  $\kappa > 0$  и величина ее, как правило, заключена в пределах от  $10^{-3}$  до  $10^{-6}$ ; для ферромагнетиков  $\kappa \gg 0$ . При этом для диа- и парамагнетиков  $\kappa$  для данной температуры практически не зависит от величины напряженности поля и является константой, а с изменением температуры меняется мало. Для ферромагнетиков характерна большая зависимость магнитной восприимчивости от магнитного поля и температуры.

<sup>\*</sup> Единицы системы СГСМ в области магнитных явлений совпадают с единицами системы СГС (системы Гаусса).

<sup>\*\*</sup> В дальнейшем при пересчетах примем, что  $1 \text{ э} = 80 a/m$ .

В общем случае магнитное поле можно рассматривать как сумму двух составляющих «внешней»  $\overline{B}_e = \overline{H}$ , обусловленной макроскопическими токами, и «внутренней»  $\overline{B}_i = \overline{J}$ , созданной намагниченной средой. Для удобства рассмотрения результирующего поля вводят понятие о векторе магнитной индукции  $\overline{B}$ . В общем виде

$$\overline{B} = \overline{B}_e + \overline{B}_i = \overline{H} + \overline{J}. \quad (8)$$

В зависимости от выбранной системы единиц и формы написания уравнений выражение (8) конкретизируется.

Для системы СИ

$$\overline{B} = \mu_0 (\overline{H} + \overline{J}), \quad (9)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная, или проницаемость вакуума, а практически и воздуха ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  гн/м).

Для системы СГСМ

$$\overline{B} = \overline{H} + 4\pi\overline{J}. \quad (9')$$

В этом случае магнитная проницаемость вакуума равна единице и является безразмерной величиной.

Единица магнитной индукции в системе СИ — тесла (тл), в системе СГСМ — гаусс (гс); 1 тл =  $10^4$  гс.

Из уравнений (6) и (9), а также (6') и (9') соответственно получим:

$$\overline{B} = \mu_0 (1 + k_m) \overline{H} = \mu_{\text{abs}} \overline{H} \quad (10)$$

и

$$\overline{B} = (1 + 4\pi\kappa) \overline{H} = \mu'_{\text{abs}} \overline{H}, \quad (10')$$

где  $\mu_{\text{abs}} \left[ \frac{\text{тл}}{\text{а/м}} \right]$  и  $\mu'_{\text{abs}} \left[ \frac{\text{гс}}{\text{э}} \right]$  — абсолютные магнитные проницаемости соответственно в системах СИ и СГСМ.

Удобно пользоваться понятием относительной магнитной проницаемости  $\mu^*$ , под которой понимают отношение абсолютной проницаемости к проницаемости вакуума. Относительная проницаемость является отвлекающей величиной и одинакова для систем СИ и СГСМ. В системе СГСМ абсолютная и относительная проницаемости совпадают.

Пользуясь понятием относительной проницаемости, уравнения (10) и (10') можно представить в следующем виде:

$$\overline{B} = \mu_0 \mu \overline{H} \quad (11)$$

и

$$\overline{B} = \mu \overline{H}. \quad (11')$$

При рассмотрении магнитного поля пользуются понятиями магнитного потока  $\Phi$  и намагничивающей (магнитодвижущей) силы  $F$ .

\* Обычно говорят «магнитная проницаемость».

Поток вектора магнитной индукции  $\Phi$  равен интегралу вектора магнитной индукции по некоторой поверхности:

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S}. \quad (12)$$

Магнитный поток является скалярной величиной. В однородном поле для сечения  $S$ , перпендикулярного направлению вектора  $\vec{B}$ , поток определяется по формуле

$$\Phi = BS. \quad (13)$$

Единицами магнитного потока являются: в системе СИ — вебер ( $вб$ ), в системе СГСМ — максвелл ( $мкс$ );  $1 вб = 10^8 мкс$ .

Намагничивающая (магнитодвижущая) сила  $F$  определяется как линейный интеграл вектора напряженности поля  $\vec{H}$  по пути интегрирования:

$$F = \int_l \vec{H} d\vec{l}. \quad (14)$$

Намагничивающая сила является скалярной величиной. В однородном поле для пути  $l$ , совпадающем по направлению с  $\vec{H}$ , имеем

$$F = Hl. \quad (15)$$

В системе СИ единицей намагничивающей силы является ампер ( $a$ )\*, в системе СГСМ — гильберт ( $гб$ );  $1 a = 0,4 \pi гб$ .

В дальнейшем там, где это не имеет принципиального значения,  $\vec{M}$ ,  $\vec{J}$ ,  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$  будем писать без векторного обозначения.

## § 2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕОРИИ ФЕРРОМАГНЕТИЗМА\*\*

Магнитные свойства намагничиваемых тел зависят от магнитных свойств элементарных носителей магнетизма — двигающихся внутри атома электронов\*\*\*, а также от совместного действия этих электронов в макрообъеме вещества. Последняя причина определяется формой кристаллической решетки, наличием внутренних и внешних механических напряжений и т. п.

В соответствии с этим теорию ферромагнетизма можно рассматривать состоящей из двух частей: теории элементарных носителей магнетизма или намагничивания в микрообъеме и теории намагничивания в макрообъеме.

Электрон в атоме совершает сложное движение, которое приводит к образованию магнитного момента. Электрон, двигаясь по

\* Часто пользуются понятием «ампервиток».

\*\* Подробнее см. в [Л. 11—15 и др.].

\*\*\* Магнитным моментом, создаваемым ядром атома, практически можно пренебречь.

орбите, создает орбитальный магнитный момент, а вращаясь во-круг своей оси, — спиновый магнитный момент. Опыты показали, что орбитальные моменты практически не принимают участия в явлениях намагничивания. Элементарными носителями магнетизма являются спиновые магнитные моменты.

Если вещество поместить во внешнее магнитное поле  $H$ , то магнитное поле атомов вступит с ним во взаимодействие. В результате этого взаимодействия на основании теоремы Лармора [Л. 16] возникнет дополнительный магнитный момент, действующий против направления поля. Это явление называется *диамагнетизмом* («антимагнетизмом»).

Диамагнетизм возникает во всех веществах, независимо от структуры их атомов и форм связи, т. е. в жидком, твердом и газообразном состояниях. По величине диамагнитный эффект очень мал. Как уже указывалось в § 1, для диамагнетиков магнитная восприимчивость  $\kappa \approx -10^{-6}$ , поэтому «в чистом виде» диамагнетизм проявляет себя только в тех веществах, в которых имеет место полная взаимная компенсация как орбитальных, так и спиновых магнитных моментов. К таким веществам относятся, например, углерод, сурьма, висмут и множество других. Внешне диамагнетики проявляют себя тем, что выталкиваются из неоднородного магнитного поля.

Для тех веществ, в которых собственный суммарный магнитный момент атомов не равен нулю, на диамагнетизм накладывается значительно больший его по величине нескомпенсированный момент электронов. В этом случае для большинства веществ наблюдается явление, названное *парамагнетизмом*, а для некоторых наблюдается *ферромагнетизм*.

В парамагнетиках («слабomagнитных» веществах) при обычных температурах под действием теплового движения молекул магнитные моменты располагаются статически равновероятно к любому направлению, в результате чего суммарный магнитный момент равен нулю. Под действием внешнего поля создается преимущественное направление расположения элементарных магнитных моментов, т. е. тело оказывается намагниченным. Парамагнитный эффект при обычных полях и температурах весьма мал. Для намагничивания парамагнетиков до такого состояния, когда все элементарные магнитные моменты станут параллельными внешнему полю, требуется при комнатных температурах поле, равное  $10^9$  э (такие поля пока еще получить не удалось), а при температуре  $1^\circ \text{K}$  ( $-272^\circ \text{C}$ ) — поле, равное  $3000$  э.

К ферромагнетикам («подобным железу») относятся железо, никель, кобальт, гадолиний, диспрозий и их сплавы, а также некоторые сплавы марганца, серебра, алюминия и др. Все ферромагнетики характеризуются:

- 1) кристаллическим строением;
- 2) большими положительными значениями магнитной воспри-

имчивости (магнитной проницаемости), а также существенной ее зависимостью от напряженности поля и температуры;

3) способностью намагничиваться до насыщения при обычных температурах уже в слабых полях;

4) гистерезисом — зависимостью магнитных свойств от предшествующего магнитного состояния («магнитной историей»);

5) точкой Кюри, т. е. температурой, выше которой материал теряет ферромагнитные свойства.

Ферромагнетики образуются переходными элементами, у которых не все внутренние оболочки полностью заполнены. Эти элементы обладают нескомпенсированными спинами\*. Указанная особенность необходима, но недостаточна для существования ферромагнетизма, так как дезориентирующее тепловое движение потребовало бы для намагничивания до насыщения чрезвычайно больших полей (см. парамагнетизм).

Русский ученый Б. Л. Розинг в 1892 г. высказал предположение о существовании внутренних сил, помогающих намагничиванию ферромагнетиков. В дальнейшем эта идея получила широкое развитие, прежде всего в работах Вейсса, а потом и других ученых.

Вейсс считал, что в ферромагнетиках, благодаря особенностям их структуры, всегда действуют мощные внутримолекулярные поля, ориентирующие нескомпенсированные спины параллельно друг другу, образуя намагниченные до насыщения микрообласти. Эти области самопроизвольного (спонтанного) намагничивания называются *доменами* или *областями Вейсса*. Домены имеют линейные размеры от тысячных до десятых долей миллиметра и магнитный момент приблизительно в  $10^{15}$  раз больше магнитного момента отдельного атома. В дальнейшем Н. С. Акуловым (и независимо от него Биттером) был разработан метод, позволивший непосредственно наблюдать домены. Метод состоит в том, что отполированную электрическим способом\*\* поверхность размагниченого ферромагнитного образца покрывают коллоидным раствором тонкого порошка железа и наблюдают под микроскопом образующиеся при этом фигуры (фигуры Акулова — Биттера), являющиеся границами доменов. Концентрация частиц железа на границах объясняется тем, что они притягиваются образующимися в этих местах потоками рассеивания.

Вейсс считал, что ориентирующие внутримолекулярные поля имеют магнитную природу. Однако последующие расчеты показали, что это не так. Для образования доменов требуется поле, оцениваемое приблизительно десятками миллионов эрстед, а

\* Здесь и далее под спинами понимают спиновые магнитные моменты.

\*\* Обычная полировка не позволяет выявить домены из-за наличия в образце наклепа.

внутриатомные поля в ферромагнетиках достигают величины не более десятка тысяч эрстед.

Советские ученые Я. И. Френкель и Я. Г. Дорфман, а также В. Гейзенберг в 1928 г. показали, что молекулярное поле имеет электрический характер. Энергия этого поля может быть определена на основе квантовомеханических расчетов. При этом используют один из методов квантовой механики, предполагающий «обмен» электронами между соседними атомами. Поэтому эта энергия называется обменной энергией.

На рис. 1 показана зависимость интеграла обменной энергии  $Z$  от отношения  $V$  междуатомного расстояния  $a$  к радиусу неза-

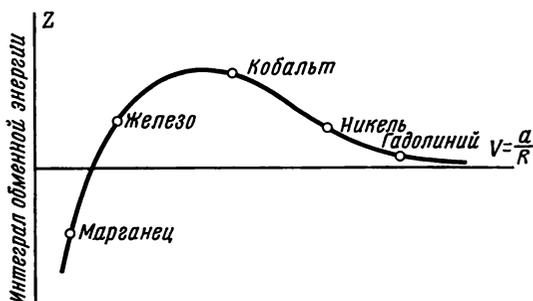


Рис. 1. Зависимость интеграла обменной энергии  $Z$  от отношения  $V$  междуатомного расстояния  $a$  к радиусу незаполненной оболочки  $R$

полненной электронами оболочки  $R$ . Рассмотрение этой зависимости показывает, что ферромагнетики имеют положительное значение интеграла обменной энергии при параллельности спинов, достаточно большое для образования доменов. Зависимость  $Z = f(V)$  позволила также выявить возникновение ферромагнитных свойств некоторых сплавов с неферромагнитными компонентами (например, марганца с висмутом, сурьмой, серой и др.). В сплавах с марганцем причина возникновения этих свойств состоит в том, что введение в решетку марганца атомов некоторых других элементов вызывает изменение межатомного расстояния  $a$  и, следовательно,  $V$  и  $Z$  до условий, необходимых для образования доменов.

Энергетически наиболее выгодным является такое расположение отдельных доменов, при котором они образуют замкнутую магнитную цепь, что соответствует минимуму полей рассеивания. Непосредственное соприкосновение доменов с большой разностью магнитной ориентации является невыгодным в отношении обменного взаимодействия. Поэтому между такими областями имеются граничные слои, называемые иногда стенками Блоха,

внутри которых происходит непрерывный поворот векторов намагничивания (рис. 2). Толщина переходного слоя для железа составляет от  $0,25 \cdot 10^{-5}$  до  $0,35 \cdot 10^{-5}$  см.

Итак, ферромагнетик в ненамагниченном состоянии состоит из доменов, намагниченных под действием обменных сил почти до насыщения, разделенных граничными слоями и расположенных по отношению друг к другу таким образом, что результирующий магнитный момент тела равен нулю.

Перейдем к рассмотрению процесса намагничивания макроробъекта ферромагнетика. При помещении ферромагнитного тела

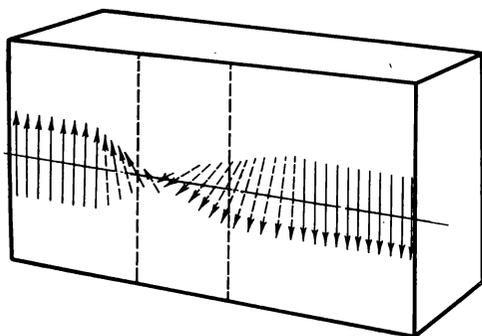


Рис. 2. Структура переходного слоя между соседними доменами

в магнитное поле в нем происходит перераспределение магнитных моментов доменов, в результате чего появляется преимущественная намагниченность в направлении действия внешнего поля  $H$ . Степень «легкости намагничивания» определяется величиной сил, препятствующих повороту магнитных моментов доменов по направлению поля  $H$ . Н. С. Акулов

показал, что эти силы в первую очередь зависят от магнитного взаимодействия между атомами в решетке (электростатическое взаимодействие приводит лишь к образованию доменов). Это положение позволило теоретически обосновать тот экспериментально установленный факт, что кристаллы имеют направления легкого и трудного намагничивания.

Рассмотрим кратко некоторые вопросы, относящиеся к кристаллической структуре ферромагнетиков. Простейшей формой решетки является кубическая. Для обозначения различных плоскостей этого куба пользуются системой индексов, представляющих собой обратные значения отрезков, отсекаемых данной плоскостью на осях  $x$ ,  $y$  и  $z$ . Например, если плоскость параллельна осям  $x$  и  $y$ , то два первых отрезка равны бесконечности, а обратные их значения — нулю; отрезок на оси  $z$  равен ребру куба, следовательно, третий индекс равен единице. В итоге данная плоскость получает обозначение  $\{001\}$ . На рис. 3 представлены наиболее важные плоскости.

Ферромагнетики имеют в основном три типа решеток (рис. 4): кубическую гранецентрированную (а), кубическую объемноцентрированную (б) и гексагональную (в). Тип решетки может изменяться в зависимости от температуры. Например, железо

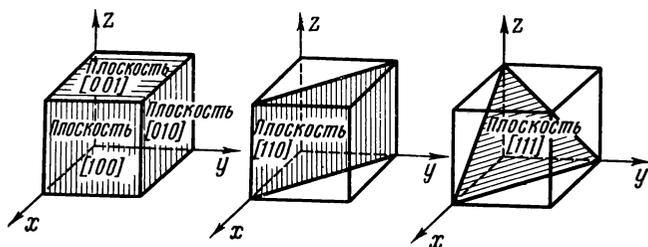


Рис. 3. Обозначения различных плоскостей кубической решетки

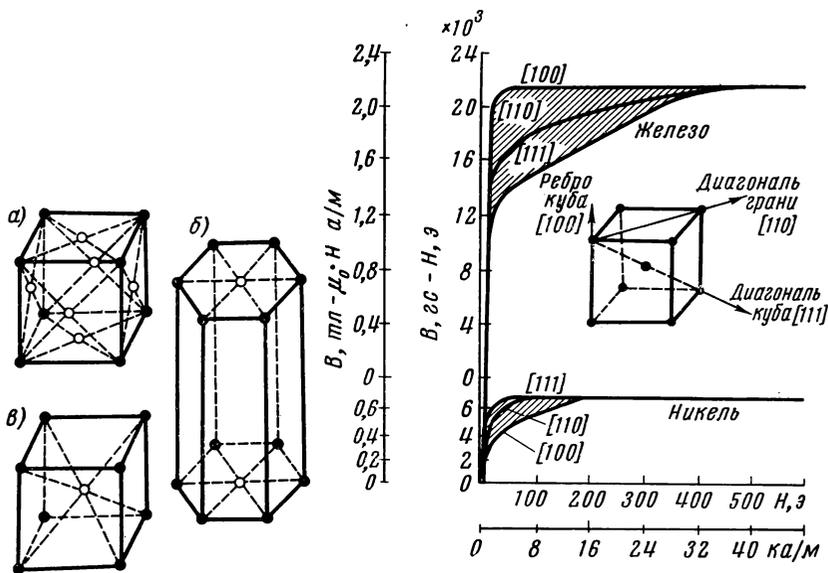


Рис. 4. Кристаллические решетки ферромагнетиков:  
 а — кубическая гранецентрированная ( $\gamma$ -Fe, Ni;  $\beta$ -Co);  
 б — кубическая объемноцентрированная ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\delta$ -Fe); г — гексагональная ( $\alpha$ -Co).

Рис. 5. Кривые намагничивания в разных направлениях монокристаллов железа и никеля

при температуре до  $900^{\circ}\text{C}$  ( $\alpha$ - и  $\beta$ -фазы) имеет объемноцентрированную решетку; от  $900$  до  $1401^{\circ}\text{C}$  ( $\gamma$ -фаза) — гранецентрированную и свыше  $1401^{\circ}\text{C}$  ( $\delta$ -фаза) — опять объемноцентрированную. Кобальт при температуре до  $480^{\circ}\text{C}$  ( $\alpha$ -фаза) имеет гексагональную решетку, а в интервале от  $480$  до  $1490^{\circ}\text{C}$  — гранецентрированную. Никель, независимо от температуры, образует гранецентрированную решетку. Для сплавов тип решетки зависит от расположения атомов компонент.

На рис. 5 представлены кривые намагничивания в разных направлениях монокристаллов железа и никеля. Кривые показывают, что кристаллы являются магнитноанизотропными и что направлениями самого легкого намагничивания для монокристалла железа являются ребра куба, а для монокристалла никеля — пространственные диагонали; самому трудному намагничиванию соответствуют для железа — пространственные диагонали, для никеля — ребра куба. При отсутствии внешнего поля всегда имеет место намагничивание в легком направлении.

Разница между легким и трудным намагничиванием, выраженная площадью между соответствующими кривыми (заштрихованные площади на рис. 5), позволяет вычислить величину энергии, которую необходимо затратить для изменения направления векторов спонтанного намагничивания от легкого до трудного направлений.

Эта энергия называется энергией кристаллографической магнитной анизотропии и характеризуется константой магнитной анизотропии  $K$ . Для железа при комнатной температуре  $K \approx 4,2 \cdot 10^5 \text{ эрг/см}^3$ . Чем больше  $K$ , тем значительнее внутрикристаллические силы ориентации.

До сих пор мы предполагали, что кристалл свободен от упругих деформаций, т. е. рассматривали естественную магнитную анизотропию. При наличии механических напряжений на кристаллографическую анизотропию накладывается магнитоупругая анизотропия, вызванная дополнительным магнитным взаимодействием атомов, в результате искажения решетки при деформации. Механические напряжения могут возникнуть в результате деформации решетки, вследствие изменения направления намагничивания доменов вдоль поля (магнитострикция), а также, например, при сжатии или растяжении образца.

Магнитная анизотропия в значительной степени определяет характер намагничивания ферромагнетика в макрообъеме или, как говорят, техническую кривую намагничивания. Для технических магнитных материалов магнитная анизотропия представляет собой очень сложное явление, так как она зависит от многих причин, например, от наличия внутренних включений и их формы (химического состава, степени дисперсности), температуры, предварительной термической обработки и др. Теория этого вопроса пока еще разработана не полностью.

Однако даже предварительные выводы этой теории позволили научно обосновать получение некоторых материалов с заданными магнитными свойствами и объяснить неясные ранее вопросы.

Например, Н. С. Акулов показал, что причиной легкого намагничивания пермаллоев (см. § 11) является выполнение условия одновременного минимума кристаллографической анизотропии и магнитострикции.

Перейдем к рассмотрению хода кривой намагничивания, т. е. зависимости  $B = f(H)$ \* макрообъема ферромагнетика, состоящего из совокупности отдельных кристаллитов с произвольной ориентацией. Схематический ход такой кривой показан на рис. 6. На этом рисунке упрощенно показано также (в прямоугольниках справа) распределение отдельных кристаллитов и направления намагничивания в них доменов при различных значениях намагничивающего поля.

Исходное состояние соответствует размагниченному образцу ( $H = 0$ ;  $B = 0$ ), т. е. равновероятному расположению доменов, намагниченных в легком направлении (на рис. 6 по ребрам куба).

В слабых полях, создающих участок обратимого смещения границ, происходит увеличение объема доменов, магнитные векторы которых образуют наименьший угол с направлением внешнего поля за счет соседних доменов. Этот процесс практически является обратимым, т. е. после удаления внешнего поля образец возвращается в исходное состояние.

На участке необратимого смещения границ происходят повороты доменов на  $90^\circ$  и  $180^\circ$ , что соответствует крутому участку кривой намагничивания. Изменение намагниченности на этом участке происходит скачкообразно (эффект Баркгаузена).

Наконец, в области сильных полей на участке вращения на-

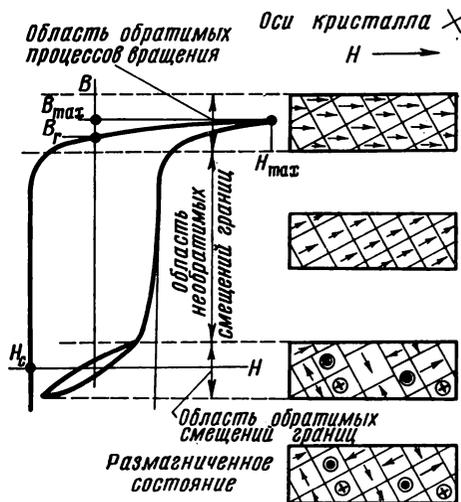


Рис. 6. Схематический ход кривой намагничивания ферромагнетика

\* Или зависимости  $J = f(H)$ .

правление легкого намагничивания доменов постепенно переходит в более трудное направление, параллельное полю  $H$ .

Когда все домены расположатся параллельно внешнему полю, наступает техническое насыщение ( $J = J_S$ ), т. е. дальнейшее увеличение  $H$  практически не вызывает увеличения  $J_S$ , а  $B$  увеличивается лишь постольку, поскольку растет  $H$  (см. формулу 8).

Отметим, что в действительности увеличение  $H$  сопровождается очень незначительным возрастанием намагниченности  $J_S$  (парапроцесс), которая в пределе приближается к «истинному насыщению»  $J_0$ . Однако этот факт, имеющий очень важное значение для физики ферромагнетизма, пока еще не имеет технического применения.

Если для точки с координатами  $H_{\max}$  и  $B_{\max}$  удалить внешнее поле ( $H = 0$ ), то  $B = B_r$ , т. е. будет иметь место гистерезис. Индукция  $B_r$ , которая остается в предварительно намагниченном материале после снятия внешнего поля, называется *остаточной индукцией*.

Для того, чтобы привести образец в состояние  $B = 0$ , на него надо воздействовать полем обратного направления (размагничивающим полем). Значение размагничивающего поля, которое должно быть приложено к предварительно намагниченному образцу для того, чтобы индукция в нем стала равной нулю, называется *коэрцитивной силой*  $H_c$ .

Отметим, что рассмотрение хода технической кривой намагничивания было проведено упрощенно. В действительности процесс идет значительно сложнее, в частности, явления смещения границ и вращения доменов частично перекрывают друг друга.

Влияние некоторых факторов на ход кривых намагничивания рассмотрено в § 5.

### § 3. ФЕРРИМАГНЕТИЗМ И МАТЕРИАЛЫ ТИПА ФЕРРИТОВ

В § 2 было указано, что для ферромагнетиков характерно параллельное расположение спинов и положительное значение обменного интеграла. Советский ученый Л. Д. Ландау теоретически предсказал\* существование веществ, для которых энергетически более выгодным является антипараллельная ориентация спинов, чему соответствует отрицательное значение интеграла обменной энергии. Это явление было названо *антиферромагнетизмом*. В дальнейшем антиферромагнетизм был подтвержден опытом\*\*.

Различают скомпенсированные и нескомпенсированные антиферромагнетики. Первые являются собственно антиферромагне-

\* Ландау Л. Д. Sow. Phys. 4,675 (1933).

\*\* Shul C. and Smart J., Phys. Rev. 76, 1256 (1949).

тиками и имеют суммарный магнитный момент, равный нулю, у вторых этот момент отличен от нуля. Нескомпенсированный антиферромагнетизм называют *ферримагнетизмом*. Многие свойства ферримагнетиков, например зависимости  $J = f(H)$ , качественно аналогичны свойствам ферромагнетиков. Однако между этими двумя группами веществ имеются и принципиальные различия.

Для иллюстрации этого положения обратимся, например, к рассмотрению зависимости намагниченности насыщения ферро- и ферримагнетиков от температуры. Для ферромагнетиков в этом отношении наиболее характерным является существование точки Кюри, т. е. температуры, выше которой вещество становится парамагнитным. Для некоторых ферримагнетиков при повышении температуры интенсивность насыщения постепенно уменьшается, переходит через нуль, начинает возрастать и далее снова падает до нуля. При дальнейшем нагреве ферримагнетик остается немагнитным, т. е. температура второго обращения интенсивности насыщения в нуль является точкой Кюри. Температура первого перехода через нуль называется *точкой компенсации* \*. Объяснить появление точки компенсации и ряда других явлений, возникающих в ферримагнетиках, с позиций ферромагнетизма невозможно. Потребовалось создание теории ферримагнетизма.

Теория ферримагнетизма пока еще полностью не разработана. В настоящее время наибольшее признание в этой области имеет теория, созданная французским ученым Неелем.

Чтобы понять основные положения теории Нееля, рассмотрим некоторые особенности кристаллической структуры и свойств ферритов, широко применяемых в технике группы ферримагнетиков.

Ферриты представляют собой двойные окислы, образуемые окисью железа  $Fe_2O_3$  с окислами двухвалентных металлов\*\*, и имеют химическую формулу  $MeO \cdot Fe_2O_3$ , где  $Me$  — двухвалентный металл (железо, никель, марганец, цинк, кобальт, медь, кадмий, магний). Это так называемые простые, или однокомпонентные ферриты (моноферриты). Некоторые из них, например никелевый  $NiO \cdot Fe_2O_3$  или марганцевый  $MnO \cdot Fe_2O_3$ , являются магнитными; другие, такие, как  $Zn \cdot Fe_2O_3$  и  $CdO \cdot Fe_2O_3$ , — немагнитными. Широкое применение имеют в технике также смешанные ферриты, представляющие собой твердые растворы двух или нескольких простых ферритов.

Ферромагнитные свойства ферритов были открыты еще в 1878 г. В 1909 г. немецкий ученый Хильперт получил патент на

\* Эту точку иногда называют точкой Нееля.

\*\* Известны также и другие ферриты, например феррит одновалентного металла лития.

их изготовление. Одновременно с ним в России исследованиями ферритов как магнитного материала занимался В. П. Вологдин. Однако в то время ферриты не получили практического применения. Начиная с 1935 г., крупные работы в этой области проводила голландская фирма «Филипс». В дальнейшем, особенно в послевоенные годы, проблема ферритов получила широкое развитие.

Свойства ферритов в значительной степени определяются их кристаллической структурой. В настоящее время находят применение ферриты, имеющие кристаллическую структуру, подобную структуре природных минералов, — шпинели, магнетоплумбита, граната, а также некоторые другие. Наиболее изученным является феррит со структурой шпинели.

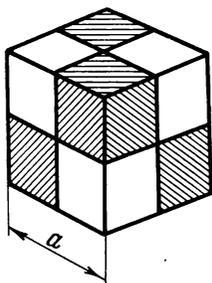


Рис. 7. Схематическое изображение элементарной ячейки шпинельной структуры

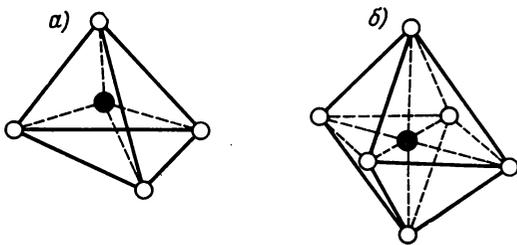


Рис. 8. Схематическое изображение тетраэдрического (а) и октаэдрического (б) узлов (светлыми кружками обозначены ионы кислорода, черными — ионы металлов)

Элементарная ячейка шпинели представляет собой куб с ребром  $a \approx 8,5 \text{ \AA}$ . Для удобства рассмотрения этот куб можно разделить на восемь более мелких кубиков с ребрами  $a/2$ , называемых октантами (рис. 7). Структура заштрихованных и оставленных светлыми на рис. 7 октантов различна.

Всего элементарная ячейка шпинели содержит восемь «молекул»  $\text{MeFe}_2\text{O}_4$ , т. е. 32 иона кислорода, 16 ионов железа и 8 ионов двухвалентного металла  $\text{Me}$ . Ионы кислорода образуют гранецентрированную кубическую решетку. В промежутках между ионами кислорода находятся ионы металлов, причем эти ионы окружены четырьмя или шестью ионами кислорода так, как это показано на рис. 8, а и б. Первое расположение называется тетраэдрическим, второе — октаэдрическим.

Неель рассматривал кристаллическую решетку шпинели, состоящую из двух подрешеток: одна состоит из магнитных ионов металлов, находящихся в тетраэдрических промежутках (подрешетка А), и другая — из ионов в октаэдрических промежутках (подрешетка В).

В элементарной ячейке шпинели имеется всего 64 тетраэдрических и 32 октаэдрических места (пустот). Из них заняты 8 тетраэдрических ( $A$ -узлы) и 16 октаэдрических ( $B$ -узлы) мест; 72 места остаются свободными. Отметим также, что ближайшие соседи какого-либо иона в подрешетке  $A$  принадлежат к подрешетке  $B$ .

Неель распространил теорию молекулярного поля Вейсса на кристаллическую решетку шпинели. При этом он предположил, что между магнитными ионами подрешеток  $A$  и  $B$  имеет место сильное отрицательное взаимодействие типа  $AB$ , приводящее к антипараллельному расположению спинов (магнитных моментов) подрешеток. Взаимодействие типов  $AA$  и  $BB$  по сравнению с  $AB$  мало. При равенстве магнитных моментов подрешеток  $A$  и  $B$  имеет место антиферромагнетизм. Если магнитные моменты  $A$  и  $B$  не равны между собой, существует ферримагнетизм.

Ионы двухвалентного металла  $Me^{++}$  и трехвалентного железа  $Fe^{+++}$  в решетке ферритов  $MeO \cdot Fe_2O_3$  могут быть расположены различным образом, образуя при этом один из двух типов шпинели: прямую (нормальную) или обращенную.

В прямой шпинели  $Me^{++}$  занимает тетраэдрические пустоты  $A$ , а  $Fe^{+++}$  — октаэдрические пустоты  $B$ . В форме прямой шпинели кристаллизуются ферриты цинка и кадмия. Прямые шпинели неферромагнитны.

В обращенной шпинели в тетраэдрических промежутках находится половина ионов  $Fe^{+++}$ , в октаэдрических — вторая половина ионов  $Fe^{+++}$  и ионы  $Me^{++}$ . В форме обращенной шпинели кристаллизуются ферриты никеля, марганца, магния, меди, кобальта и некоторых других элементов. Обращенные шпинели ферромагнитны.

Условно два указанных типа шпинелей обозначают следующим образом:  $Me^{++}[Fe_2^{+++}]O_4$  — прямая шпинель,  $Fe^{+++}[Me^{++}Fe^{+++}]O_4$  — обращенная шпинель. Ионы, занимающие тетраэдрические узлы, написаны перед квадратными скобками, а ионы, занимающие октаэдрические узлы, — в скобках.

Расчеты, проведенные в соответствии с теорией Нееля, объясняют многие, неясные ранее положения, встречающиеся на практике. Покажем это на примере.

По данным Вейсса магнитный момент  $M$  молекулы феррита железа  $FeO \cdot Fe_2O_3$  (магнетита), определенный опытным путем, равен  $4,08 \mu_B$  \*. Если бы все нескомпенсированные моменты молекулы магнетита были расположены параллельно друг другу, то  $M$  должен был бы равняться  $14 \mu_B$ , так как  $M_{Fe^{+++}} = 5 \mu_B$ , а  $M_{Fe^{++}} = 4 \mu_B$ . Магнетит кристаллизуется в форме обращенной шпинели, т. е. его структурная формула имеет вид:



\* Единица магнитного момента (магнетон Бора), численно равная магнитному моменту спина электрона ( $0,927 \cdot 10^{-20}$  СГСМ).

а суммарный момент определится так:

$$M = M_{\text{окт}} - M_{\text{тетр}} = (4\mu_B + 5\mu_B) - 5\mu_B = 4\mu_B,$$

что хорошо согласуется с данными опыта.

Становится понятным также аномальный характер зависимости  $J_S = f(T)$  и наличие точки компенсации для некоторых ферритов, о чем было упомянуто в начале настоящего параграфа. На рис. 9 дано схематическое изображение температуры зависимости намагниченности насыщения для подрешеток  $A$ ,  $B$  и результирующая кривая для феррита с точкой компенсации, представляющая разность (алгебраическую сумму) двух первых кривых. Точка  $T_K$  является точкой компенсации, а  $\Theta$  — точкой Кюри.

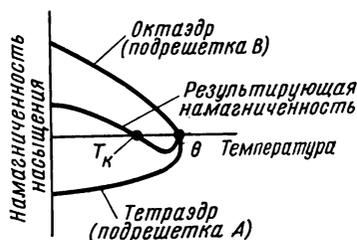


Рис. 9. Схематическое изображение зависимости  $J_S = f(T)$  подрешеток  $A$ ,  $B$  и результирующая кривая для феррита с точкой компенсации

которых «возбуждаются» и принимают участие в «сверхобмене»; не учитывалось взаимодействие типов  $AA$  и  $BB$  и т. д. Теория Нееля не отвечает пока еще требованиям научной строгости и завершенности и встречает по этим причинам возражения со стороны некоторых ученых\*. Однако ее данные хорошо согласуются с опытом, и поэтому можно ожидать, что в дальнейшем она получит углубленное развитие.

Мы рассмотрели только простые ферриты со структурой шпинели. Аналогичным образом можно подойти и к исследованию ферритов с другой структурой.

В электрическом отношении ферриты относятся к классу полупроводников и имеют удельное электрическое сопротивление, в миллиарды раз превышающее сопротивление металлических ферромагнетиков. Это практически исключает возникновение в ферритах вихревых токов при воздействии на них переменных магнитных полей, что позволяет расширить область применения фер-

\* См., например, [Л. 13, стр. 231].

ритов как магнитного материала до сотен мегагерц вместо нескольких десятков килогерц для металлических материалов.

Применение ферритов в радиоэлектронике по своему значению сравнивают с введением волноводной техники, т. е. оценивают как принципиальный, крупный скачок вперед.

Простые ферриты во многих отношениях уступают смешанным ферритам. Например, в настоящее время большое применение имеют никельцинковые ферриты, представляющие собой твердый раствор магнитного никелевого и немагнитного цинкового ферритов. На рис.

10 представлена тройная диаграмма такого смешанного феррита, показывающая зависимость начальной проницаемости  $\mu_a$  от состава. Весьма широко применяемыми и перспективными являются многокомпонентные ферриты.

В настоящее время получили широкое применение магнитномягкие и магнитотвердые ферриты, ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса, ферриты для устройств СВЧ, ферриты с высокой магнитострикцией.

Области и объем применения ферритов непрерывно расширяются.

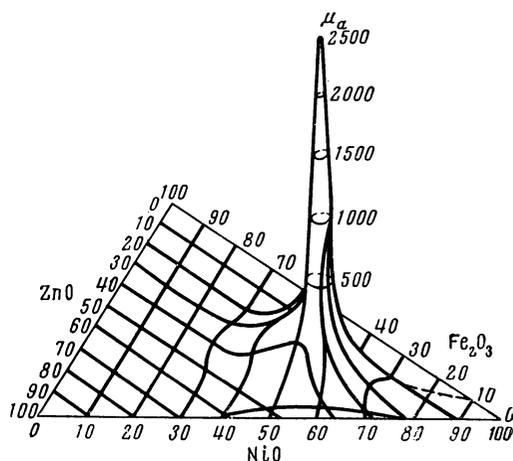


Рис. 10. Зависимость начальной проницаемости никельцинкового феррита от состава

#### § 4. КРИВЫЕ НАМАГНИЧИВАНИЯ. ПЕТЛЯ ГИСТЕРЕЗИСА

Магнитные свойства материалов часто характеризуют зависимостями магнитной индукции  $B$  (или намагнитченности  $J$ ) от напряженности поля  $H$  и потерь на перемагничивание  $P$  от индукции и частоты.

Зависимость вида  $B = f(H)$  обычно изображают в виде кривых намагничивания. Выше было отмечено, что магнитные свойства зависят не только от таких параметров, как напряженность поля, температура, наличие или отсутствие механических напряжений и др., но также и от предшествующего магнитного состояния.

Во многих случаях получения кривых намагничивания в качестве исходного состояния используют размагниченное состояние образца, при котором в отсутствии внешнего поля индукция равна нулю и нет преимущественного направления намагничивания доменов, т. е. они расположены статистически равномерно.

Наилучшее размагничивание может быть достигнуто нагреванием материала выше точки Кюри. Однако в технике этот способ применяют мало из-за неудобств, возникающих при его практическом осуществлении. Чаще всего размагничивание осуществляется помещением образца в переменное поле с убывающей до нуля амплитудой, используя для этого специальные устройства или измерительную схему.

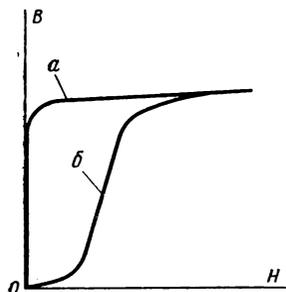


Рис. 11. Кривые намагничивания предварительно размагниченного образца:

а — безгистерезисная; б — основная

Максимальная напряженность размагничивающего поля, необходимая для достижения практически полного размагничивания, различна для разных групп материалов и должна в несколько раз превышать значение коэрцитивной силы. Требуется также, чтобы частота поля не была большой, в противном случае размагничиванию будет препятствовать экранирующее действие вихревых токов. Лучше всего применять поле с частотой 5—10 гц и скоростью убывания не больше 1—2% при каждом цикле. Практически часто используют поле с частотой 50 гц или непрерывно коммутируют и уменьшают постоянное поле.

При намагничивании предварительно размагниченного образца различают следующие типы зависимости  $B = f(H)$ :

1) нулевая (первоначальная) кривая намагничивания, которая получается при монотонном увеличении  $H$ ;

2) безгистерезисная (идеальная) кривая намагничивания, получаемая при одновременном действии постоянного поля и переменного с убывающей до нуля амплитудой (рис. 11, кривая а);

3) основная (коммутационная) кривая намагничивания, представляющая собой геометрическое место вершин кривых (вершин гистерезисных циклов), получающихся при циклическом перемагничивании (рис. 11, кривая б).

Нулевая кривая близко совпадает с основной.

Нулевая кривая определяется случайными причинами, например она зависит от механических сотрясений, колебаний температуры, характера изменения намагничивающего поля и др. Для этой кривой особенно сильно проявляется эффект Баркгаузена — нерегулярный, ступенчатый характер намагничивания.

Поэтому нулевая кривая не отвечает требованию хорошей воспроизводимости, вследствие чего не может быть использована для сравнительной оценки свойств различных материалов. Нулевая кривая, представляя интерес для физиков, в инженерной практике не используется.

Безгистерезисная кривая характеризуется быстрым возрастанием индукции до значения индукции насыщения уже в слабых постоянных полях, независимо от видов магнитного материала. Намагничивание по этой кривой имеет место в некоторых случаях.

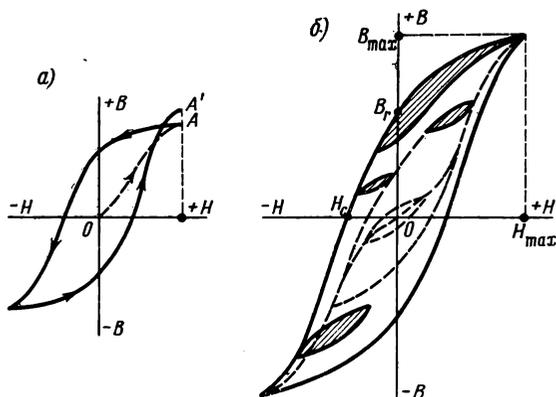


Рис. 12. Петли гистерезиса:  
а — незамкнутая; б — установившаяся

Основная кривая намагничивания является важнейшей характеристикой магнитных материалов. Она отвечает требованиям хорошей воспроизводимости и широко используется для характеристики намагничивания материалов в постоянных полях.

На основной кривой намагничивания принято различать три участка — начальный, соответствующий нижнему колену кривой; участок быстрого возрастания индукции (намагниченности); участок насыщения (выше верхнего колена кривой).

При циклическом перемагничивании кривая намагничивания образует гистерезисную петлю (рис. 12).

Если намагничивание происходит так, как показано стрелками на рис. 12, а, то при однократном прохождении петли точки  $A$  и  $A'$ , соответствующие одному и тому же полю  $H$ , не совпадают, что объясняется различной для этих точек магнитной историей.

Для получения более определенной симметричной\* (установившейся) петли (рис. 12, б) при измерениях в цепях постоян-

\* В дальнейшем симметричную петлю будем называть петлей гистерезиса.

ного тока производят так называемую магнитную подготовку, которая состоит в многократном (5—10 раз) коммутировании тока в намагничивающей обмотке после установки его величины.

Форма петли для данного материала зависит от значения поля  $H_{\max}$ . Для слабых полей она имеет вид эллипсов, с увеличением поля у нее начинают вытягиваться «носики», соответствующие точкам  $A$  и  $A'$  (рис. 12,  $a$ ).

Гистерезисная петля, полученная для условий насыщения, называется *предельной петлей*. В справочниках обычно приводятся симметричные предельные гистерезисные петли.

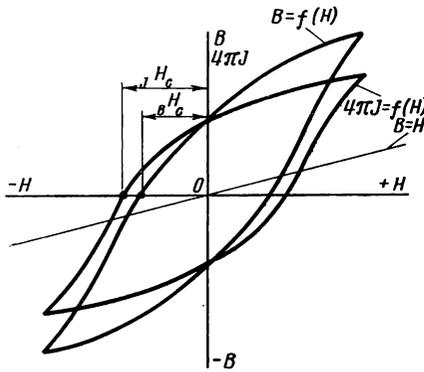


Рис. 13. Изображение петли гистерезиса в координатах  $B = f(H)$  и  $4\pi J = f(H)$

Основными характеристиками петли гистерезиса являются остаточная индукция  $B_r$ , коэрцитивная сила  $H_c$  и площадь петли, характеризующая потери на гистерезис  $P_h$  за один цикл перемагничивания,

$$P_h = \frac{\oint H dB}{4\pi} \quad [\text{эрг/см}^3] \quad (16)$$

или

$$P_h = \frac{\oint H dB}{4\pi\gamma} \cdot 10^{-4} \quad [\text{вт/кг}], * \quad (17)$$

где  $\oint H dB$  — произведение площади петли ( $\text{см}^2$ ) на масштабы  $B$  ( $\text{гс/см}$ ) и  $H$  ( $\text{э/см}$ ) графика;

$\gamma$  — плотность материала,  $\text{г/см}^3$ .

Приближенно потери можно вычислить, заменив петлю гистерезиса прямоугольником с основанием  $2H_c$  и высотой  $2B_{\max}$ . Тогда

$$P_h \approx \frac{H_c B_{\max}}{\pi\gamma} \cdot 10^{-4} \quad [\text{вт/кг}]. \quad (18)$$

Для определения  $P_h$  пользуются и другими приближенными формулами.

Большое значение для материалов, применяемых в постоянных магнитах, имеет *размагничивающий участок петли гистерезиса* — ее часть, расположенная во втором квадранте.

При изображении петли гистерезиса в координатах  $4\pi J = f(H)$  (рис. 13) остаточная индукция сохраняет то же значение, что и в координатах  $B = f(H)$ , а коэрцитивная сила по намагниченности  $JH_c \neq BH_c(H_c)$ . Для материалов, намагничивающихся только в сильных полях (магнитнотвердых),  $JH_c$  может

\* Потери, отнесенные к 1 кг массы, называются удельными потерями.

существенно отличаться от коэрцитивной силы по магнитной индукции  $H_c$ . Например, для сплава силманал (см. § 25)  $H_c = 480$  э,  $jH_c = 6000$  э. Однако для большинства применяемых в технике материалов разница между этими величинами незначительна.

Кроме петли гистерезиса, вершины которой соответствуют основной кривой намагничивания, во многих случаях рассматривают так называемые *частные гистерезисные циклы*, у которых вершины не лежат на основной кривой. Примеры частных циклов приведены на рис. 12, б (для удобства рассмотрения они заштрихованы). Особое значение имеют *частные циклы возврата*, получающиеся при уменьшении размагничивающего поля.

В § 1 было указано, что отношение  $\mu = \frac{B}{H}$  называется магнитной проницаемостью. Подставляя в это отношение конкретные значения  $B$  и  $H$ , получают различные виды магнитной проницаемости, которые в настоящее время применяют в технике (выше нескольких десятков).

Для статических характеристик наиболее часто пользуются понятием *нормальной магнитной проницаемости*  $\mu^*$ , *дифференциальными проницаемостями возрастания*  $\mu_d$  и *убывания*  $\mu'_d$ , *начальной*  $\mu_a$ , *максимальной*  $\mu_{\max}$  и *обратимой*  $\mu_r$ .

Для точки  $A$  (рис. 14) магнитная проницаемость  $\mu$  определяется как тангенс угла наклона секущей  $OA$  к оси абсцисс, т. е.

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha = \frac{B_A}{H_A}, \quad (19)$$

дифференциальная проницаемость возрастания

$$\mu_d = \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (\text{при } \Delta H \rightarrow 0), \quad (20)$$

дифференциальная проницаемость убывания

$$\mu'_d = \frac{-\Delta B}{-\Delta H} \quad (\text{при } \Delta H \rightarrow 0). \quad (21)$$

Начальная и максимальная проницаемости представляют частные случаи нормальной проницаемости.

Начальная проницаемость

$$\mu_a = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H} = \operatorname{tg} \alpha_a, \quad (22)$$

максимальная проницаемость

$$\mu_{\max} = \operatorname{tg} \alpha_{\max} = \frac{B_{\mu_{\max}}}{H_{\mu_{\max}}}, \quad (23)$$

\* Слово «нормальная» принято опускать.

т. е. наклон касательной на начальном участке кривой  $B = f(H)$  характеризует начальную проницаемость, а наклон касательной, проведенной из начала координат в точку верхнего перегиба кривой, соответствует максимальной проницаемости.

На рис. 15 представлены зависимости нормальной и дифференциальных проницаемостей от напряженности поля.

Обратимой магнитной проницаемостью  $\mu_r$  называется отношение циклического изменения магнитной индукции к соответствующему изменению напряженности магнитного поля, когда эти изменения настолько малы, что процесс намагничивания протекает обратимо.

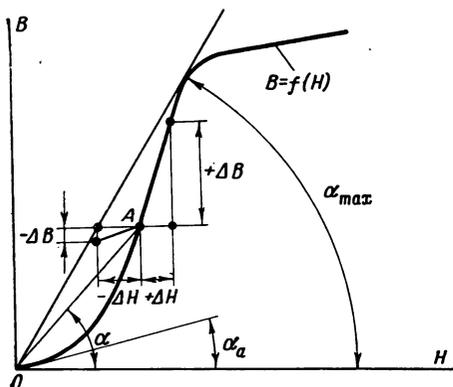


Рис. 14. К объяснению различных понятий магнитной проницаемости

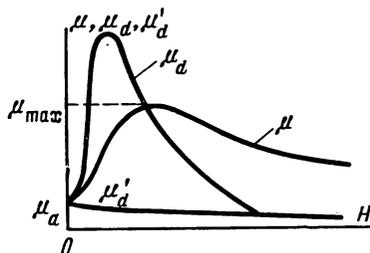


Рис. 15. Зависимости магнитной проницаемости  $\mu$ , дифференциальных проницаемостей  $\mu'_d$  возрастания  $\mu'_d$  и убывания  $\mu'_d$  от напряженности поля  $H$

Выше рассмотрены статические характеристики, т. е. они относятся к квазипостоянным магнитным полям.

При намагничивании магнитного материала переменным полем петля гистерезиса, характеризующая затраты энергии за один цикл перемагничивания, расширяется (увеличивает свою площадь) за счет возникновения потерь на вихревые токи и потерь на последствие. Такая петля называется *динамической*.

Потери на вихревые токи  $P_f$ , отнесенные к 1 кг перемагничиваемого материала (удельные потери), можно вычислить по формуле

$$P_f = \frac{4B_{\max}^2 f^2 d^2 k_f^2}{3\gamma\rho} \cdot 10^{-11} [\text{вт/кг}], \quad (24)$$

где  $B_{\max}$  — амплитуда магнитной индукции, гс;  
 $f$  — частота переменного тока, гц;

- $d$  — толщина листа, мм;  
 $k_f$  — коэффициент формы кривой напряжения;  
 $\gamma$  — плотность, г/см<sup>3</sup>;  
 $\rho$  — удельное электросопротивление, ом · мм<sup>2</sup>/м.

Потери на последствие  $P_{\Pi}$  аналитическому расчету не поддаются и их определяют обычно как разность между общими потерями  $P$  и суммой потерь на гистерезис и вихревые токи, т. е.

$$P_{\Pi} = P - (P_h + P_f). \quad (25)$$

Потери на гистерезис при частоте перемагничивания  $f$  в формуле (25) определяют как произведение потерь на один цикл (формула 17) на частоту.

Формулы (17) и (24) показывают, что потери на гистерезис пропорциональны первой степени частоты, а потери на вихревые токи — квадрату частоты.

Соответственно определению понятия основной кривой намагничивания (см. выше) геометрическое место вершин динамических петель называется *динамической кривой намагничивания*, а отношение индукции к напряженности поля на этой кривой — *динамической магнитной проницаемостью*  $\mu \sim$ .

При изменении во времени величин  $B$  и  $H$  необходимо учитывать два явления: искажение формы кривой и сдвиг по фазе между магнитной индукцией и напряженностью поля.

Зависимость между  $B$  и  $H$  определяется формой динамической петли, а поэтому при синусоидальном изменении одной из рассматриваемых величин в общем случае вторая будет изменяться несинусоидально (в кривой появятся высшие гармоники). Одновременное синусоидальное изменение  $B$  и  $H$  имеет место лишь в случае эллипсоидальной петли.

При заданном значении  $B_{\max}$  в зависимости от того, меняется ли по синусоидальному закону магнитная индукция или напряженность поля, форма и площадь динамической петли будут различными. При синусоидальной индукции петля будет уже (потери меньше), чем при синусоидальной напряженности поля. Это объясняется тем, что потери на вихревые токи возрастают очень быстро при наличии высших гармонических составляющих в кривой магнитной индукции (см. формулу 24). Чем большее сопротивление включено последовательно с намагничивающей обмоткой магнитного элемента, тем ближе к синусоидальной форме кривая напряженности поля (сильнее искажена кривая индукции) и наоборот\*.

Отставание по фазе кривой индукции от кривой напряженности поля объясняется действием вихревых токов, препятствующих в соответствии с законом Ленца изменению индукции, магнитной вязкостью, а также инерцией частиц, приходящих в дви-

\* Подробно этот вопрос рассмотрен, например, в [Л. 6].

жение при изменении намагниченности. Угол отставания  $\delta$  называется *углом потерь*.

Математическое решение вопроса учета явлений искажения формы кривой и наличия сдвига по фазе в зависимости  $B = f(H)$  при намагничивании переменным полем было предложено В. К. Аркадьевым [Л. 10] и нашло широкое применение.

В. К. Аркадьев предложил заменить реальную динамическую петлю эквивалентным эллипсом, уравнения которого в координатах  $h$  и  $b$  имеют вид:

$$h = H_m \sin \omega t; \quad (26)$$

$$b = B_m \sin (\omega t - \delta). \quad (27)$$

Отметим, что введение в рассмотрение эквивалентного эллипса не только позволило в инженерной точке зрения решить сложную задачу, но во многих случаях приближается к реальным условиям намагничивания, так как в слабых полях и на высоких частотах динамическая петля практически имеет форму эллипса.

Если ввести в рассмотрение составляющую индукции  $B_{m_1} = B_m \cos \delta$ , совпадающую по фазе с направлением  $H$ , и составляющую  $B_{m_2} = B_m \sin \delta$ , отстающую на  $90^\circ$  от направления  $H$ , то можно показать, что  $B_{m_1}$  связана с обратимыми процессами превращения энергии при перемагничивании, а  $B_{m_2}$  — с необратимыми [Л.6].

Соответственно значениям  $H_m$ ,  $B_m$ ,  $B_{m_1}$ ,  $B_{m_2}$  и углу потерь  $\delta$  для характеристики магнитных свойств материалов, работающих в цепях переменного тока, вводятся следующие виды магнитной проницаемости: *амплитудная (полная)*  $\mu_n$ ; *упругая (консервативная)*  $\mu_1$ ; *проницаемость потерь (вязкая)*  $\mu_2$ ; *комплексная*  $\mu$ . Приведем определение каждой из них.

Амплитудная проницаемость

$$\mu_n = \frac{B_m}{H_m}. \quad (28)$$

Этот вид проницаемости не определяет фазового сдвига, и поэтому должен быть пополнен другими понятиями.

Упругая проницаемость

$$\mu_1 = \frac{B_{m_1}}{H}. \quad (29)$$

Проницаемость потерь

$$\mu_2 = \frac{B_{m_2}}{H}. \quad (30)$$

Комплексная проницаемость

$$\mu = \frac{\dot{B}}{\dot{H}} = \frac{B_m e^{j(\omega t - \delta)}}{H_m e^{j\omega t}} = \mu_n e^{-j\delta} = \mu_1 - j\mu_2. \quad (31)$$

Очевидно, что последний вид проницаемости описывает процессы намагничивания в переменных полях наиболее полно.

При магнитных измерениях в переменных полях для получения указанных выше величин чаще всего используют зависимости  $B_m = f(H_m)$  при одновременном измерении угла сдвига фаз  $\delta$  между кривыми. Пользуются и другими зависимостями, например,  $B_{m_1} = f(H_{m_1})$ , где  $B_{m_1}$  и  $H_{m_1}$  — амплитудные значения первых гармоник. Вопросы методики магнитных измерений рассмотрены в гл. IV.

При исследовании работы магнитных материалов в специальных режимах намагничивания (например, импульсном, при одновременном действии переменного и постоянного толей) измеряются, рассматриваются и применяются в расчетах самые разнообразные кривые намагничивания. Некоторые из них рассмотрены далее (см., например, § 27). Подробно эти вопросы рассмотрены, например, в [Л. 4; 9; 22 и др.].

В заключение отметим, что все рассмотренные выше магнитные характеристики в значительной степени являются условными. Они в некоторой мере могут характеризовать свойства магнитных материалов, но не реальных устройств. Особенно это относится к характеристикам на переменном токе. В этом случае магнитные свойства самым тесным образом связаны с вихревыми токами, возникающими в толще материала при его перемагничивании, и некоторыми другими явлениями. Вихревые токи определяются удельной электропроводностью материала, частотой перемагничивания, формой и размерами изделия. Поэтому при одинаковых условиях намагничивания для разных изделий из одного и того же магнитного материала магнитные свойства будут различными.

Вопрос разработки магнитных характеристик, наилучшим образом отражающих магнитные свойства материалов, в настоящее время усиленно дебатруется\* и находится в стадии разрешения.

## § 5. ВЛИЯНИЕ НЕКОТОРЫХ ФАКТОРОВ НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

В табл. 1 схематически показана зависимость магнитных свойств от различных факторов: случайных примесей, упругих и остаточных деформаций, направленной кристаллизации, температуры и воздушного зазора [Л. 8].

Из таблицы видно, что наиболее характерной для магнитного материала величиной, не зависящей от внешних факторов, является точка Кюри  $\Theta$ . Измеряя ее, можно судить о химическом составе материала. Точка Кюри для железа  $770^\circ \text{C}$ , для

\* См. по этому вопросу в журнале «Заводская лаборатория», 1963.

Таблица 1

Схематическое изображение зависимости магнитных свойств от различных факторов [Л.8]

Действующий фактор	Магнитная величина					
	$\theta$	$J_s$	$\mu_a$	$\mu_{\max}$	$B_r$	$H_c$
Случайные примеси (< 1%)	→	→	↘	↘	↘↗	↗
Упругие деформации: а) растяжение, б) сжатие	→	→	↘	↗	↗	↗
	→	→	↘	↘	↘	↘
Пластические деформации: а) растяжение б) сжатие	→	→	↘	↗	↗	↗
	→	→	↘	↘	↘	↘
Направленная кристаллизация	→	→	↗	↗	↗	↘
Температура	→	↘	↗	↘	↘	↘
Воздушный зазор	→	→	↘	↘	↘	→

Примечание:  
 величина возрастает ↗; величина уменьшается ↘; величина остается неизменной →

кобальта 1115° С, для никеля 358° С [Л. 2]. Все примеси понижают точку Кюри. В технике находят применение магнитные материалы с самыми различными значениями  $\theta$ . Например, для немагнитных сталей и чугунов значения  $\theta$  лежат ниже рабочих температур.

Второй мало изменяющейся от внешних условий величиной является намагниченность насыщения  $J_s$  (или индукция насыщения  $B_s$ ). Она зависит от температуры\*. При температурах, не очень близких к точке Кюри и к абсолютному нулю, эта зависимость для чистых железа, никеля и кобальта выражается соотношением:

$$\frac{J_s}{J_0} = th \left( \frac{\theta}{T} \frac{J_s}{J_0} \right), \quad (32)$$

где  $J_0$  — намагниченность насыщения при 0° К;

$T$  — абсолютная температура.

Графическое изображение этой зависимости, а также экспериментальные данные для железа и никеля представлены на

\* Строго говоря, намагниченность насыщения  $J_s$  зависит и от величины поля.

рис. 16. При температурах, значительно ниже  $\Theta$ , уменьшение  $J_S$  происходит практически по линейному закону. В небольшом диапазоне изменения рабочих температур намагниченность насыщения с некоторым приближением можно считать постоянной, например для железа  $4\pi J_S \approx 21\,500$  гс. Однако достижение насыщения для материалов разной степени чистоты и с разной величиной внутренних напряжений происходит в разных полях.

Иногда  $\Theta$  и  $J_S$  называют первичными магнитными свойствами.

Вторичные магнитные свойства (начальная и максимальная проницаемости, остаточная индукция, коэрцитивная сила и др.) сложным образом зависят от внешних условий и могут для некоторых материалов изменяться в широких пределах.

Вопросы стабильности свойств магнитных материалов имеют в настоящее время очень важное значение, например в связи с проблемой надежности. Они рассмотрены в последующих главах применительно к конкретным материалам. В настоящем параграфе будут сделаны только некоторые общие замечания относительно влияния примесей и воздушного зазора.

**Влияние примесей.** Примесями называют случайные включения, попавшие в магнитный материал в процессе его изготовления и ухудшающие его свойства. Обычно примеси не превышают 1% и практически не влияют на величины  $\Theta$  и  $J_S$ , зато они могут очень сильно изменить вид кривой намагничивания и петли гистерезиса. Для большинства металлических материалов особенно вредными являются неметаллические примеси, такие, как углерод, азот и сера. Степень влияния примесей зависит не только от их процентного содержания, но также и от формы включений (степени измельчения и структуры примеси).

Примеси нарушают кристаллическую структуру материала и препятствуют свободному перемещению граничного слоя, т. е. уменьшают величину проницаемости, в первую очередь начальной. Примеси могут также являться причиной резкого ухудшения свойств важнейших материалов для постоянных магнитов — сплавов дисперсионного твердения (§ 21), нарушая ход процесса твердения и уменьшая  $H_c$ .

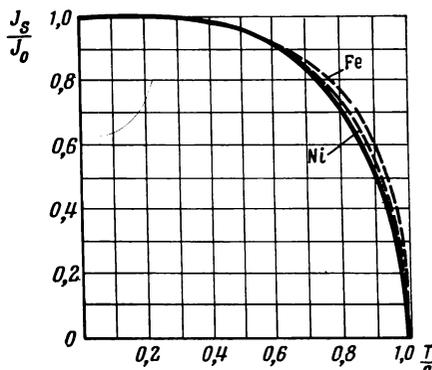


Рис. 16. Температурная зависимость ферромагнитных металлов (сплошная кривая получена расчетом по формуле (32); пунктирные — по данным опыта)

Во многих случаях вредными являются уже сотые доли процента примесей. Поэтому производство большинства магнитных материалов является особо точным (прецизионным). К чистоте исходных материалов предъявляются высокие требования. Очистка от примесей осуществляется различными технологическими приемами (переплавкой в вакууме, отжигом при высокой температуре в вакууме или в атмосфере чистейшего водорода и др.).

**Влияние воздушного зазора.** Все сказанное выше о магнитных свойствах материалов относилось к замкнутой магнитной цепи, например, к кольцевым (тороидальным) образцам, витым сердечникам трансформаторов и дросселей и т. п. Однако на практике в большинстве случаев магнитная цепь является разомкнутой, т. е. содержит воздушный зазор, представляющий, как правило, большое магнитное сопротивление по сравнению с остальной частью цепи. Наличие зазора может существенно изменить ход кривых намагничивания, значения проницаемости, стабильность и другие свойства.

В теле с воздушным зазором при его намагничивании возникают свободные полюса, создающие размагничивающее поле  $H_o$ , направленное навстречу внешнему намагничивающему полю  $H_e$ . Магнитные свойства такого тела определяются внутренним полем

$$H_i = H_e - H_o. \quad (33)$$

Размагничивающее поле приближенно можно считать пропорциональным намагниченности. Коэффициент пропорциональности между ними называется *коэффициентом размагничивания*, т. е. можно написать, что

$$H_o = NJ = \frac{N}{4\pi} (B - H_i)^*. \quad (34)$$

Точное значение  $N$  имеет только для однородно намагничиваемых тел, к которым относятся эллипсоиды вращения. Например, для шара  $N = \frac{4}{3} \pi$ , для бесконечно длинного цилиндра, продольная ось которого перпендикулярна внешнему полю,  $N = 2\pi$  и изменится, если цилиндр расположить относительно линий поля по-другому и т. д.

На практике в большинстве случаев имеем неоднородно намагниченные тела, для которых  $J$ , а следовательно, и  $N$  в разных точках будут различны. В этих случаях пользуются некоторыми усредненными значениями  $N$ , определяемыми по приближенным формулам или справочным таблицам для тел заданной формы и размеров.

\* При нерационализованном виде уравнений в системе СГСМ.

Например, коэффициент размагничивания для магнитной цепи в виде кольца с относительно малым радиальным воздушным зазором может быть подсчитан по формуле

$$\frac{N}{4\pi} = k \frac{S}{ld}, \quad (35)$$

где  $S$  — площадь сечения кольца;  
 $l$  — средняя длина кольцевого магнитопровода;  
 $d$  — длина воздушного зазора;  
 $k$  — некоторая постоянная.

Чаще всего понятие коэффициента размагничивания пользуются в графоаналитических методах расчета магнитных цепей. Поэтому изобразим  $H_e$ ,  $H_o$ ,  $H_i$ ,  $N$  и  $B$  на графике, для чего выполним построение, приведенное на рис. 17.

Зависимость  $B = f(H_i)$ , полученная для замкнутой магнитной цепи ( $N = 0$ ), называется *кривой намагничивания вещества*. Если из произвольной точки  $A$  этой кривой провести до пересечения с осью абсцисс луч  $AC$  так, чтобы  $\operatorname{tg} \Theta = \frac{N^*}{4\pi}$ , то отрезки  $OD = H_i$  и

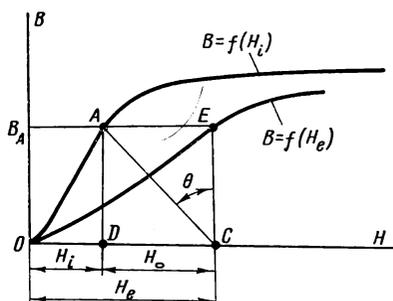


Рис. 17. Геометрическое изображение коэффициента размагничивания

$$OC = OD + DC = H_i + CE \operatorname{tg} \Theta = H_i + B_A \frac{N}{4\pi} = H_i + H_o = H_e.$$

Луч  $AC$  называют иногда линией коэффициента размагничивания (линией среза). Так как  $AD = CE = B_A$ , то точка  $E$  соответствует значению магнитной индукции в теле, помещенном во внешнее поле  $H_e$ . Выполнив построение для других точек кривой  $H_i = f(B)$ , получим точки, аналогичные точке  $E$ . Кривая  $B = f(H_e)$ , проведенная через эти точки, называется *кривой намагничивания тела*.

Сравнивая кривые намагничивания вещества и тела, можно сделать следующие замечания.

Чем больше коэффициент размагничивания, т. е. чем короче и толще образец, тем более пологий вид принимает кривая намагничивания тела. Отсюда следует, что при больших воздушных зазорах ход кривой намагничивания определяется в основ-

\* При определении значения угла  $\Theta$  необходимо учесть масштабы графика, если  $m$  — масштаб по оси ординат ( $гс/см$ ),  $n$  — масштаб по оси абсцисс ( $э/см$ ), то  $\Theta = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{m}{n} \cdot \frac{N}{4\pi}$ .

ном не магнитными свойствами материала, а конструкцией цепи. Поэтому в таких цепях применение легко намагничивающихся материалов, как правило, дорогих и дефицитных (например, пермаллоев) нецелесообразно, за исключением некоторых случаев\*.

Например, для получения индукции  $B=5000$  гс в замкнутом магнитопроводе из пермаллоя марки 79НМ и из электротехнической стали марки Э11 требуются намагничивающие поля, равные соответственно 0,05 или 1,8 э. Преимущество пермаллоя очевидно. При разомкнутой цепи в виде тороида с отношением длины воздушного зазора к средней длине магнитной линии, проходящей по материалу, равным 0,1%, для получения той же индукции требуется поле, соответственно равное 4,0 или 5,0 э. Пермаллой практически не имеет преимущества перед сталью.

Отметим, что в данном примере зазор был взят очень маленьким (для тороида со средней длиной окружности, равной 100 мм, длина зазора составляет всего 0,1 мм), увеличение зазора окончательно сведет на нет достоинство пермаллоя.

Следующее замечание относится к магнитным проницаемостям вещества и тела. В. К. Аркадьев, кроме известного понятия магнитной проницаемости вещества  $\mu = B/H_i$ , ввел понятие *магнитной проницаемости тела*  $\mu_{\infty} = B/H_e$ , которое учитывает как свойства материала, так и конструкцию магнитной цепи.

Если известны  $N$  и  $\mu$ , то  $\mu_{\infty}$  в системе СГСМ можно вычислить по формуле

$$\mu_{\infty} = \frac{1}{\frac{1}{\mu} + \frac{N}{4\pi}}. \quad (36)$$

Из формулы (36) следует, что чем больше проницаемость вещества  $\mu$  (меньше  $1/\mu$ ), тем сильнее магнитная проницаемость тела определяется конструкцией цепи, в пределе приближаясь к проницаемости формы:

$$\mu_{\infty} = \frac{4\pi}{N}. \quad (37)$$

Проницаемость тела всегда меньше проницаемости вещества и меньше зависит от напряженности намагничивающего поля, а также от изменений, вызванных внешними причинами (температурой, механическими напряжениями и т. п.). Другими словами, стабильность свойств разомкнутой магнитной цепи выше стабильности замкнутой цепи из того же материала. Этой особенностью пользуются на практике.

---

\* Например, в электромагнитных приборах пермаллой для сердечников подвижной части применяют прежде всего вследствие малой величины  $H_c$ , а не из-за легкости намагничивания.

Например, для повышения стабильности ферритовых магнитопроводов в них иногда специально вводят воздушные зазоры, при этом проигрывают в проницаемости (см. § 13).

Графическое построение рис. 17 можно применить и к петле гистерезиса. Это важно прежде всего для цепей с постоянными магнитами, в которых наличие воздушного зазора является обязательным. Этот вопрос рассмотрен в гл. II.

## § 6. ОБЩАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Общепринято выделение двух основных групп магнитных материалов — *магнитномягких* и *магнитнотвердых*, в третью группу можно включить материалы специального назначения, имеющие сравнительно узкие области применения.

Характерными свойствами магнитномягких материалов является их способность намагничиваться до насыщения уже в слабых полях (высокая магнитная проницаемость) и малые потери на перемагничивание.

Магнитнотвердые материалы (материалы для постоянных магнитов) должны обладать возможно большей удельной энергией в полезном воздушном зазоре. Эта энергия тем больше, чем больше остаточная индукция  $B_r$  и коэрцитивная сила  $H_c$  материала (см. § 18). Потери для магнитнотвердых материалов не играют никакой роли, поскольку они намагничиваются лишь один раз (за исключением устройств, в которых постоянный магнит работает в динамическом режиме, например, гистерезисных двигателей).

Процессы намагничивания материалов обеих групп протекают аналогично, но количественное соотношение процессов смещения границ и вращения различно. Процессы смещения границ требуют меньших затрат энергии, чем процесс вращения. В магнитномягких материалах намагничивание происходит в основном за счет смещения границ, а в магнитнотвердых — за счет вращения.

Сравнивая петли гистерезиса, характерные для обеих групп материалов, можно отметить, что форма петли, индукция насыщения и остаточная индукция примерно одинаковы, а разница в коэрцитивной силе достигает очень большой величины. Для применяемых в настоящее время промышленных магнитномягких материалов наименьшая  $H_c \approx 0,005$  э, а для магнитнотвердых наибольшая  $H_c \approx 4000$  э, т. е. она отличается в  $8 \cdot 10^5$  раз. Другими словами, магнитномягкие материалы имеют узкую петлю гистерезиса с небольшой коэрцитивной силой, а магнитнотвердые — широкую петлю с большой коэрцитивной силой.

Сравнивая основные кривые намагничивания, можно заметить, что для магнитномягких материалов характерен крутой

подъем кривой, а для магнитотвердых — пологий ход, т. е. в первом случае имеют место высокие проницаемости в слабых полях, а во втором — низкие.

Отметим, что начальная проницаемость  $\mu_a$  приблизительно обратно пропорциональна коэрцитивной силе, так что произведение  $\mu_a H_c$  в среднем равно 1000. Точнее говоря, оно уменьшается в 2—3 раза по сравнению с 1000 для материалов с большими значениями коэрцитивной силы и увеличивается во столько же раз для материалов с малой  $H_c$ .

Границы значений  $H_c$  (или  $\mu_a$ ), по которым материал можно отнести к группе магнитномягких или магнитотвердых, являются условными. Ориентировочно можно считать, что для современных магнитномягких материалов  $H_c < 2\text{э}$ , а для магнитотвердых  $H_c > 300\text{э}$ . Внутри этой области практически лежат только устаревшие или сугубо специальные материалы. По мере прогресса техники граничная область расширяется в обе стороны.

Важнейшими магнитномягкими материалами являются технически чистое железо, электротехнические стали, пермаллой, магнитномягкие ферриты, магнитодиэлектрики. Основные магнитотвердые материалы — сплавы на основе Fe — Ni — Al — (Co), магниты из порошков, в том числе магнитотвердые ферриты, мартенситные стали; пластически деформируемые магнитотвердые сплавы.

Термины «магнитномягкий» и «магнитотвердый» не относятся к характеристике механических свойств материала. Существуют механически мягкие, но магнитотвердые материалы и наоборот.

К группе магнитных материалов специального назначения можно отнести материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ), ферриты для сверхвысоких частот (СВЧ), магнитоstrictionные материалы, термомагнитные сплавы, немагнитные стали и чугуны \* и некоторые другие.

---

\* Немагнитные стали и чугуны не рассматриваются.

## МАГНИТНОМЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ

### § 7. КЛАССИФИКАЦИЯ МАГНИТНОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ

**М**агнитномягкие материалы принято классифицировать по их основному химическому составу, который в значительной степени определяет технологию производства, свойства и области применения материала.

В соответствии с этим различают следующие группы магнитномягких материалов.

**1. Технически чистое железо.** Под названием «технически чистое железо» понимают железо промышленной степени чистоты с ограниченным количеством примесей. К этой группе относятся низкоуглеродистая электротехническая сталь, электролитическое и карбонильное железо.

Технически чистое железо является дешевым и технологичным материалом, оно хорошо штампуются и обрабатывается на всех металлорежущих станках. Железо обладает высокими магнитными свойствами в постоянных полях. Основной недостаток железа состоит в малом значении удельного электрического сопротивления, что ограничивает область его применения как магнитного материала постоянными магнитными полями. В переменных полях железо применять нецелесообразно ввиду больших потерь на вихревые токи.

Технически чистое железо имеет очень большое значение как шихтовый материал для получения почти всех ферромагнитных сплавов.

**2. Электротехнические (кремнистые) стали,** представляющие собой твердый раствор кремния в железе.

К достоинствам электротехнических сталей относятся большие значения удельного электрического сопротивления и высокие магнитные свойства. К основным недостаткам следует отнести повышенную твердость и хрупкость, а также пониженные по сравнению с железом значения индукции насыщения. Электро-

технические стали изготавливаются горячекатаные с изотропными магнитными свойствами и холоднокатаные — малотекстурованные и текстурованные с анизотропией магнитных свойств.

Электротехнические стали по объему применения занимают первое место среди всех других ферромагнитных материалов и находят самое широкое применение в качестве магнитопроводов электрических машин, трансформаторов, дросселей и других устройств при их работе в полях промышленной частоты и до 400—500 гц в области малых, средних и сильных полей. Иногда целесообразно также их применение в постоянных полях и при повышенных частотах (до 10 кгц).

3. **Пермаллои**, представляющие собой сплавы железа с никелем, обычно легированные молибденом, хромом и некоторыми другими элементами.

Основное достоинство пермаллоев — очень высокие значения магнитной проницаемости в слабых полях и малая величина коэрцитивной силы. Недостатками пермаллоев являются большая чувствительность магнитных свойств к механическим напряжениям, пониженные значения индукции насыщения и сравнительно высокая стоимость. Необходимо также учитывать, что высокие магнитные свойства у пермаллоев могут быть получены лишь в результате отжига готовых изделий в водороде или вакууме, что усложняет их применение.

Пермаллои находят широкое применение в магнитных элементах измерительных, автоматических и радиотехнических устройств при их работе в слабых постоянных и переменных полях с частотой до нескольких десятков килогерц, а для микронного потока и до более высоких частот.

4. **Магнитномягкие ферриты**, представляющие собой твердый раствор ферромагнитного и неферромагнитного ферритов. Наибольшее применение имеют марганеццинковые (низкочастотные) и никельцинковые (высокочастотные) ферриты.

Удельное сопротивление ферритов в  $10^6$ — $10^{13}$  раз больше удельного сопротивления металлических материалов и, следовательно, потери на вихревые токи соответственно меньше. Это позволяет использовать ферриты в областях звуковых и радиочастот. К недостаткам ферритов следует отнести низкие значения индукции насыщения, сравнительно малые величины магнитной проницаемости, большую зависимость магнитных свойств от температуры, значительные хрупкость и твердость. Применение магнитномягких ферритов в постоянных полях или в полях промышленной частоты нецелесообразно.

5. **Магнитодиэлектрики**, представляющие собой конгломерат из измельченного ферромагнетика, частицы которого разделены между собой в электрическом отношении изолирующими пленками из немагнитного материала, являющегося одновременно механической связкой.

Таблица 2

## Некоторые свойства различных групп промышленных магнитных материалов

Название группы материалов	Начальная проницаемость $\mu_a$	Максимальная проницаемость $\mu_{\text{max}}$	Коэффициентная сила $H_c, \text{э}$	Индукция $B_s$ в поле $H_s$	Удельное сопротивление $\rho, \text{Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$	Ориентированная стоимость 100 кг материала*, руб.
Технически чистое железо	250	3500—4500	0,5—1,25	21 800 зс в поле $H_s = 500 \text{ а/см}$	0,1	1
Электротехническая сталь	200—600	3000—8000	0,12—0,8	19 500—20 000 зс в поле $H_s = 300 \text{ а/см}$	0,60—0,25	1,35—2,5
Пермаллои: а) низконикелевые (~40—50% Ni) б) высоконикелевые (~79% Ni)	2000—4000 15 000—35 000	15 000—60 000 70 000—200 000	0,07—0,40 0,01—0,05	13 000—16 000 зс 7000—7500 зс	0,45—0,9 0,5—0,65	25 50
Ферриты: а) никельцинковые б) марганеццинковые	10—2000** 1000—5000**	15—3500 3000—10 000	12—0,1 0,35—0,15	1300—3800 зс в поле $H_s = 10 \text{ э}$ 3500—4000 зс в поле $H_s = 10 \text{ э}$	$10^{12}$ — $10^7$ $10^6$ — $0,5 \cdot 10^6$	400 2000
Магнитодиэлектрики: а) альсифер б) карбонильное железо	20—65 5—15	— —	— —	— —	— —	1350 700

\* Для ферритов и магнитодиэлектриков — стоимость 100 кг изделий средней степени сложности.

\*\* При  $f = 100 \text{ кГц}$ .

Магнитодиэлектрики так же, как и ферриты, обладают большим удельным электрическим сопротивлением и являются высокочастотными магнитномягкими материалами. Их достоинства по сравнению с ферритами заключаются в более высокой стабильности свойств и в хорошей воспроизводимости характеристик, а недостатком является более низкое значение магнитной проницаемости. Появление ферритов значительно ограничило применение магнитодиэлектриков.

**6. Прочие магнитномягкие материалы.** Кроме указанных основных групп магнитномягких материалов, в некоторых случаях возникает необходимость в применении материалов с особыми свойствами, например с очень высоким значением индукции насыщения (пермендюр).

В табл. 2 приведены некоторые свойства различных групп магнитномягких материалов. Данные таблицы являются ориентировочными и могут служить лишь для общей сравнительной оценки отдельных групп материалов. Свойства внутри каждой группы могут меняться в очень широких пределах.

## § 8. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К МАГНИТНОМЯГКИМ МАТЕРИАЛАМ

Магнитномягкие материалы имеют чрезвычайно разнообразное и широкое применение. Их используют в магнитных цепях электрических машин и трансформаторов, измерительных устройств, магнитных усилителей, реле, в качестве магнитных экранов, сердечников катушек индуктивностей и т. п.

В зависимости от конкретных условий применения материала возникают и различные требования к нему. Например, материал для магнитных экранов должен иметь высокие начальную и максимальную проницаемости, для импульсных трансформаторов существенной является скорость нарастания магнитной индукции и форма импульса и т. п.

Однако можно сформулировать и некоторые общие требования, из которых отметим следующие:

1. Магнитномягкий материал должен легко намагничиваться и размагничиваться, т. е. гистерезисная петля для таких материалов должна быть узкой, чему соответствует малое значение коэрцитивной силы и большое значение магнитной проницаемости, в первую очередь начальной и максимальной. Выполнение этого условия определяет, например, величину тока холостого хода в трансформаторах. По этим параметрам самыми лучшими материалами являются пермаллои.

2. Материал должен обладать большой индукцией насыщения, т. е. обеспечивать прохождение максимальной величины магнитного потока через заданную площадь поперечного сечения магнитопровода. Выполнение этого требования соответствует

получению наименьших габаритов и веса устройства. Поэтому рабочая точка часто выбирается значительно выше той, которой соответствует максимальная проницаемость. Например, для электротехнических сталей максимум проницаемости имеет место при 6000—8000 *гс*, а рабочая индукция составляет обычно для трансформаторов малой мощности 12 000 *гс*, для более мощных — 15 000 *гс*. Наибольшей индукцией насыщения обладают железо и электротехнические стали

3. При работе в переменных полях материал должен иметь возможно меньшие полные потери.

Величина потерь может быть весьма велика. Например, в линии передачи мощностью 100 *Мва* с трансформаторами на концах они достигают 600 *квт*, что составляет ежегодную потерю 5 млн. *квт·ч*.

Потери определяют рабочую температуру магнитопровода, которая не должна превышать допустимой величины.

Снижение потерь повышает энергетический к. п. д., а также позволяет при заданной температуре перегрева повысить рабочую индукцию, в результате чего уменьшится вес и габариты устройства.

Выше было указано, что полные потери состоят из потерь на гистерезис, вихревые токи и дополнительные потери.

Потери на гистерезис пропорциональны площади петли гистерезиса и частоте перемагничивания. Так как для различных материалов  $H_c$  меняется в десятки и сотни раз, а  $B_r$  и  $B_S$  только в несколько раз, то в первом приближении потери на гистерезис, отнесенные к одному циклу перемагничивания, пропорциональны коэрцитивной силе, которая должна быть минимальной.

Потери на вихревые токи зависят от электрического сопротивления магнитопровода, максимальной индукции и частоты перемагничивания (см. формулу 24). Для уменьшения этих потерь увеличивают электрическое сопротивление магнитопровода, применяя материалы с большим удельным сопротивлением, а также шихтованные сердечники в виде пакета из тонких электрически изолированных друг от друга пластин.

В последнее время широкое применение получили ленточные сердечники, навиваемые из тонкой ленты с междувитковой электрической изоляцией.

Природа дополнительных потерь является сложной. С ними приходится считаться только на высоких частотах, т. е. для таких материалов, как ферриты и магнитодиэлектрики.

Определение составляющих потерь позволяет найти пути уменьшения полных потерь. Например, с повышением частоты повышается доля потерь на вихревые токи и, казалось бы, для уменьшения полных потерь надо применять более тонкие пластины. Однако известно, что уменьшение толщины проката сверх некоторого критического значения вызывает резкое увеличение по-

ть на гистерезис. Следовательно, применение очень тонких листов может вызвать не уменьшение, а даже увеличение полных потерь. Количественная оценка составляющих потерь в каждом случае позволяет найти оптимальное решение.

Кроме перечисленных основных требований, можно указать и некоторые другие требования, предъявляемые к магнитномягким материалам.

От листовых и ленточных металлических материалов требуется высокая пластичность, обеспечивающая хорошее качество штамповок и длительность работы штампов, хорошее качество поверхности (отсутствие ржавчины, отслаивающейся окислы, бугорков, вмятин и т. п.), отсутствие разнотолщинности; для листовых материалов также минимальные волнистость и коробоватость. Выполнение этих требований позволяет повысить коэффициент заполнения, что приводит к уменьшению габаритов устройства.

Прокат желательно иметь не в виде листов, а в виде рулонов, так как это позволяет автоматизировать как производство материалов, так и изготовление сердечников.

Желательно, чтобы магнитные свойства материала мало зависели от механических напряжений. Чем меньше эта зависимость, тем больше материал можно обжать при сборке сердечника, т. е. тем выше будет коэффициент заполнения. К сожалению, зависимость свойств от механических напряжений характерна для большинства магнитномягких материалов. Особенно сильно меняются при этом начальная и максимальная проницаемости и коэрцитивная сила. Проницаемость в сильных полях и индукция насыщения от механических напряжений зависят мало. Наиболее существенно механические напряжения влияют на свойства пермаллоев.

Магнитные свойства после механической обработки восстанавливаются в результате применения термообработки (отжига).

В отдельных случаях существенными являются стабильность свойств от времени и температуры, линейность кривой намагничивания (на определенном участке), прямоугольность петли и др. Необходимо также учитывать стоимость и дефицитность материала.

## § 9. ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОЕ ЖЕЛЕЗО

Термин «железо» является условным, строго говоря, это название химического элемента. В промышленном же применении железо всегда содержит примеси, т. е. представляет собой сплав, в котором обязательно присутствует углерод. Поэтому, например, в стандартах на магнитные материалы (ГОСТ 3836—47) термин «железо» заменен названием «низкоуглеродистая электротехническая сталь». Однако такая терминология встречается воз-

ражения \*. Мы будем пользоваться обоими названиями, считая, что технически чистое железо содержит менее 0,1% углерода и минимальное количество серы, фосфора, марганца и других примесей.

Железо является основным компонентом почти всех современных магнитных материалов и его качество как составляющей шихты во многом определяет их свойства. Кроме того, железо применяется и как самостоятельный магнитномягкий, а в последнее время и как магнитотвердый материал (см. § 23). Вследствие низкого удельного электросопротивления железо применяется только в постоянных магнитных полях.

Магнитные свойства железа, в первую очередь значения магнитной проницаемости в слабых и в средних полях и коэрцитивная сила, могут меняться в очень широких пределах в зависимости от количества и состава примесей, величины зерна, характера термообработки и других причин.

Например, чистейшее железо, полученное П. Чиоффи в результате длительного отжига в водороде при 1480°С, обладало следующими свойствами:  $\mu_{\max} = 680\,000$ ,  $H_c = 0,80$  а/м = 0,010 э; современное промышленное железо соответственно имеет  $\mu_{\max} = 4500\text{—}3500$ ;  $H_c = 6,4\text{—}9,6$  а/м = 0,8—1,2 э, т. е. свойства лабораторного железа в 100—200 раз выше свойств технического.

Такая значительная разница объясняется большим влиянием примесей на свойства железа и трудностями их удаления. Так, для удаления 90% всей содержащейся в железе серы из листа толщиной 0,36 мм требуется выдержка в водороде при 1250°С в течение 30 ч [Л. 18].

Влияние примесей на свойства чистейшего железа приведено в табл. 3. Из данных таблицы можно сделать вывод о том, что самыми вредными примесями являются углерод, кислород и сера.

Таблица 3

**Влияние малых количеств вредных примесей (в %) на потери на гистерезис и коэрцитивную силу чистейшего железа [Л.3]**

Элемент	Потери на гистерезис $P_h$ , эрг/см <sup>3</sup>	Коэрцитивная сила $H_c$ , э	Пределы применяемости
С	50 000 · (% С)	20 · (% С)	0—0,008% С
O <sub>2</sub>	18 000 · (% O <sub>2</sub> )	6 · (% O <sub>2</sub> )	0—0,02% O <sub>2</sub>
H <sub>2</sub>	500 · (% H <sub>2</sub> )	0,17 · (% H <sub>2</sub> )	0—0,1% H <sub>2</sub>
S	18 000 · (% S)	6 · (% S)	0—0,06% S
P	13 000 · (% P)	4,3 · (% P)	0—0,015% P
Mn	1000 · (% Mn)	0,34 · (% Mn)	0—0,6% Mn

\* См., например, статью проф. Р. Януса «Электротехническое железо» или «сталь»? «Физика металлов и металловедение». Т. 6, вып. 2, 1958.

Кроме химического состава, большое влияние на магнитные свойства железа оказывает его структура, особенно величина зерна. На границах зерен происходит искажение кристаллической решетки и особенно легко выделяются содержащие углерод фазы, поэтому, чем меньше зерен приходится на единицу объема (чем крупнее зерна), тем выше магнитные свойства.

Влияние размера зерна на коэрцитивную силу можно оценить следующей эмпирической формулой:

$$H_c = \frac{A}{d} + D, \quad (38)$$

где  $H_c$  — коэрцитивная сила, э;

$d$  — средний диаметр зерна, см;

$A$  и  $D$  — постоянные, зависящие от содержания примесей.

Для чистейшего железа

$$H_c = \frac{0,002}{d}, \quad (39)$$

для низкоуглеродистой электротехнической стали

$$H_c = \frac{0,004}{d} + 0,55. \quad (40)$$

Следовательно, для получения железа с высокими магнитными свойствами необходимо стремиться не только к очистке его от примесей, но и к выращиванию крупного зерна, что достигается главным образом соответствующей термообработкой (отжигом).

Железо выплавляется в мартеновских или электрических печах. При этом листы одной плавки имеют магнитные свойства, соответствующие первому, второму, третьему сорту, а возможно и браку. Качество плавки оценивают по процентному соотношению сортов.

Улучшение свойств железа в процессе производства может быть достигнуто в результате многократных переплавок в вакууме, а также различных видов отжига: в водороде, вакууме и др.

При использовании железа в качестве магнитного материала необходимо учитывать эффект старения и влияние на магнитные свойства механических напряжений.

Под магнитным старением обычно понимают увеличение коэрцитивной силы железа со временем, что объясняется структурными превращениями, а именно образованием немагнитных включений определенной степени дисперсности. Типичные кривые магнитного старения низкоуглеродистой стали при различных температурах показаны на рис. 18. Коэрцитивная сила может возрасти более чем в 1,5—2 раза. Повышение температуры ускоряет процессы старения.

Уменьшение старения достигается легированием железа некоторыми элементами, например кремнием или алюминием, а также искусственным остариванием, которое заключается в выдерживании материала при  $100^{\circ}\text{C}$  в течение 100—150 ч.

Механические напряжения, возникающие при штамповке, резке и других видах обработки, а также при растяжении, сжатии или скручивании железа, могут вызвать значительное ухудшение магнитных свойств. Деформация на 0,5—1% вызывает снижение  $\mu_{\text{max}}$  на 25—30% и возрастание  $H_c$  на 15—20% [Л. 3].

Внутренние напряжения снимаются отжигом после обработки деталей.

Необходимо также иметь в виду, что магнитные свойства тонких листов железа (меньше 0,5—1 мм) обычно хуже, чем толстых листов.

Все это относится к магнитным свойствам железа в слабых и в средних полях. Проницаемость в сильных полях и индукция насыщения от указанных выше причин зависят мало.

В настоящее время наибольшее применение имеют низкоуглеродистая электротехническая тонколистовая и сортовая сталь, армо-железо\*, электролитическое и карбонильное железо.

Низкоуглеродистая электротехническая сталь и армо-железо по существу не имеют между собой различия. Формальная разница между ними заключается в том, что первая изготавливается как тонколистовая (ГОСТ 3836—47) и как сортовая (ЧМТУ 2900—56), а армо-железо используют обычно в виде поковок, полос, прутков и т. п., нормированных по размерам только местными условиями.

Иногда разделение этих сплавов на сталь и железо производят на основе технологических особенностей их изготовления. Однако такое разделение является условным.

В соответствии с ГОСТ 3836—47 сталь низкоуглеродистая электротехническая тонколистовая содержит не свыше 0,04% углерода и не свыше 0,6% других примесей.

Сталь выпускается трех марок (сортов по магнитным свойствам): Э (низший сорт), ЭА (средний сорт), ЭАА (высший сорт),

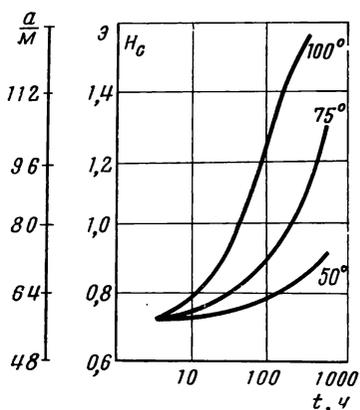


Рис. 18. Кривые магнитного старения низкоуглеродистой электротехнической стали при различных температурах [Л. 18]

\* Название складывается из первых букв названия фирмы «American Rolling Mill Company», впервые начавшей выпускать этот материал.

в виде листов тонкого проката, имеющих толщину  $d = 0,2—4,0$  мм. Листы поставляются потребителю в отожженном состоянии.

Магнитные свойства материала приведены в табл. 4, а типичная кривая намагничивания — на рис. 19.

Сортовая сталь выпускается согласно ЧМТУ 2900—56 марки Э в виде прутков круглого, квадратного и шестигранного сечения, а также полос. Из магнитных свойств нормируется только коэрцитивная сила ( $H_c \leq 1,25$  э).

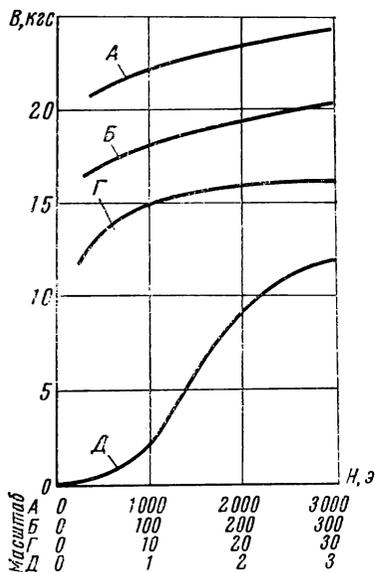


Рис. 19. Кривая намагничивания армо-железа [Л. 3]

Таблица 4

Магнитные свойства низкоуглеродистой электротехнической тонколистовой стали (ГОСТ 3836—47)

Марка стали	$H_c$ , э (не более)	$\mu_{max}$ , гс/э (не менее)
Э	1,2	3500
ЭА	1,0	4000
ЭАА	0,8	4500

После изготовления изделий из железа для получения высоких магнитных свойств необходимо провести окончательный (повторный) отжиг. Его можно исключить лишь в том случае, если для работы устройства существенными являются свойства в сильных полях, а значения коэрцитивной силы и проницаемостей в слабых и средних полях не играют роли.

ГОСТ 3836—47 рекомендует отжиг при температуре  $900^\circ\text{C}$  в течение 2 ч без доступа воздуха с медленным охлаждением до  $600^\circ\text{C}$ .

Применяя вместо отжига такого рода более сложные виды термической обработки, например повторные отжики или рафинирующие отжики в водороде, можно существенно улучшить магнитные свойства железа.

Электролитическое железо изготавливается путем электролиза. Осажденное железо после тщательной промывки измельчается в порошок в шаровых мельницах. Ввиду большого насыщения водородом магнитные свойства такого железа являются весьма низкими ( $H_c \approx 2—8$  э). Однако в результате переплавки в вакууме и многократных отжигов его свойства можно су-

шественно улучшить. Обработанное таким образом электролитическое железо характеризуется следующими средними магнитными свойствами:  $\mu_a = 500$ ;  $\mu_{\max} = 15\,000$ ;  $H_c = 0,36$  э, что в несколько раз лучше, чем у армко-железа.

Ввиду высокой стоимости электролитическое железо применяется мало.

Карбонильное железо получается посредством термического разложения пентакарбонила железа  $\text{Fe}(\text{CO})_5$ . При этом в зависимости от условий разложения можно получить железо различного вида: порошкообразное, губчатое и т. п. Для получения высоких магнитных свойств карбонильное железо должно быть подвергнуто термической обработке в водороде, после чего его можно охарактеризовать следующими свойствами:  $\mu_a = 2000\text{—}3000$ ;  $\mu_{\max} = 20\,000\text{—}21\,500$ ;  $H_c = 0,08$  э, что намного выше свойств армко-железа.

Карбонильное железо находит широкое применение в качестве ферромагнитной фазы магнитодиэлектриков (см. § 15). Оно изготавливается также в виде листов различной толщины.

В некоторых случаях вместо технически чистого железа в электропромышленности применяются углеродистые и легированные стали с содержанием 0,1—0,4% углерода. Магнитные свойства таких сталей ниже, чем у железа. Эти свойства можно улучшить отжигом деталей после их изготовления.

На рис. 20 приведены кривые намагничивания некоторых углеродистых и легированных сталей, имеющих применение в магнитопроводах машин и аппаратов.

## § 10. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СТАЛИ

Электротехнические стали представляют собой сплав железа с 0,5—5,0% кремния. Они известны уже более 60 лет и занимают по объему производства и разнообразию применения первое место среди магнитных материалов. Это объясняется их высокими электромагнитными свойствами, удовлетворительными и хорошими механическими качествами, а также отсутствием дефицитных компонент и малой стоимостью.

Среди работ, посвященных физическим процессам в кремнистых сталях, разработке технологии их производства и применения, большое значение имеют труды советских ученых.

Рассмотрим влияние кремния на свойства железа.

Кремний, образуя с железом твердый раствор, приводит к увеличению удельного сопротивления. Зависимость удельного сопротивления от процентного содержания кремния можно представить следующим эмпирическим уравнением:

$$\rho = 0,10 + 0,12 \cdot (\% \text{ Si}) \text{ [ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}]. \quad (41)$$

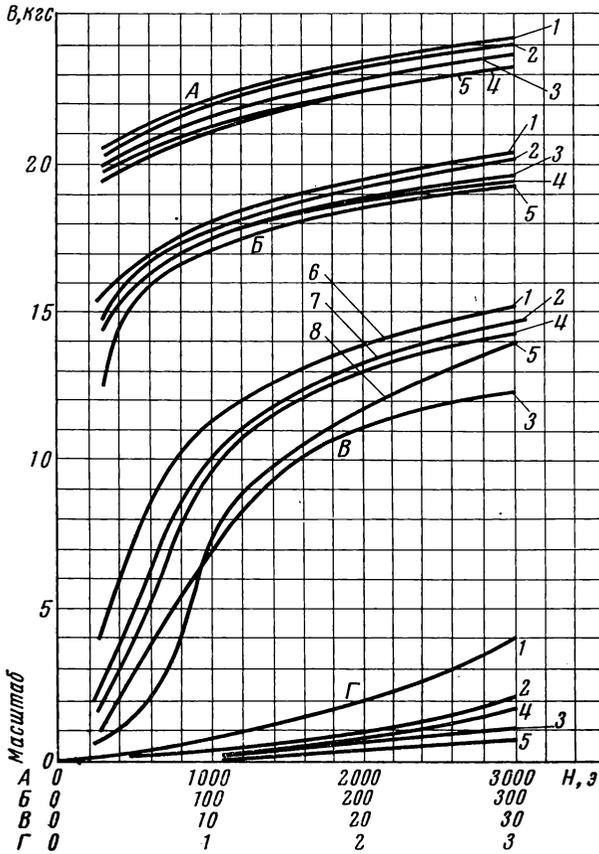


Рис. 20. Кривые намагничивания малоуглеродистых и низколегированных сталей после отжига при 750—900° С [Л. 3]:

1 — ст. 10, горячекатаная; 2 — ст. 20, горячекатаная; 3 — ст. 30, горячекатаная; 4 — сталь Сг—Сu—Si низколегированная, горячекатаная; 5 — сталь маломарганцевая, горячекатаная; 6 —  $H_c = 2,08$  э; 7 —  $H_c = 3,55$  э; 8 —  $H_c = 5,40$  э

Из формулы следует, что, например, при содержании 4,8% Si удельное сопротивление стали возрастает по сравнению с сопротивлением железа в 6,7 раз\*, соответственно уменьшаются потери на вихревые токи.

На магнитные свойства чистейшего железа кремний влияет отрицательно. Однако магнитные свойства технического железа при легировании его кремнием улучшаются. Возрастает начальная и максимальная проницаемости, уменьшаются коэрцитивная сила и потери на гистерезис, существенно улучшается стабильность свойств.

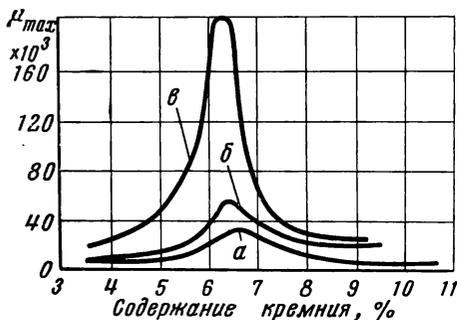


Рис. 21. Зависимость максимальной проницаемости от содержания кремния [Л. 17]:

а — отжиг при 1000° С без магнитного поля; б — отжиг при 1300° С в водороде без магнитного поля; в — отжиг при 1300° С в водороде с магнитным полем (по данным Герца)

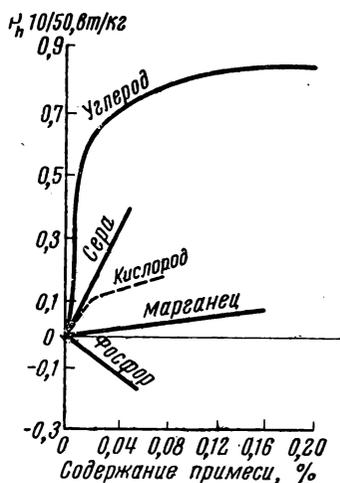


Рис. 22. Зависимость потерь на гистерезис при  $B=10$  кгс и  $f=50$  гц от содержания примесей в железокремнистом сплаве с Si=4% (по данным Иенсена)

Положительное действие кремния на магнитные свойства технического чистого железа объясняется рядом причин. Кремний переводит углерод из вредной для магнитных свойств формы цементита в графит. Он, действуя как раскислитель, связывает часть растворенных в металле газов, прежде всего кислород, а также способствует росту зерен и уменьшает константы магнитной анизотропии и магнитоstriction.

На рис. 21 приведена зависимость максимальной проницаемости от содержания кремния. Наибольшее значение максимальной проницаемости наблюдается при содержании 6,5—6,8% Si,

\* Для железа  $\rho=0,1$  ом · мм<sup>2</sup>/м.

чему соответствует близкое к нулю значение магнитострикции. М. Гертц\* в результате обработки в магнитном поле рамочного монокристалла из сплава с 6,8% Si получил максимальную проницаемость, равную 3 800 000. Однако в технике применяют сплавы с содержанием кремния не свыше 5,0%. Это объясняется тем, что кремний ухудшает механические свойства, повышая твердость и хрупкость. Уже при 4,0—5,0% Si материал выдерживает не более 1—2 перегибов на 90°.

Кремний снижает индукцию насыщения  $B_s$ , что является нежелательным. Снижение индукции можно оценить следующей эмпирической формулой:

$$B_s = 21\,580 - 480 \cdot (\% \text{ Si}) [z\text{c}]. \quad (42)$$

Кремний влияет также на плотность, теплоемкость и т. п.

Электротехническая сталь, кроме кремния, содержит углерод, серу, марганец, фосфор и др. На рис. 22 представлена зависимость потерь на гистерезис в сплаве с 4% Si от различных примесей. График приведен для чистейшего железа при наличии в нем только одной из примесей.

Как видно из рис. 22, наиболее вредной примесью является углерод. Его влияние на магнитные свойства определяется не только процентным содержанием, но и формой, в которой он находится (например, в виде цементита или в виде графита), а также дисперсностью включений.

Форма и дисперсность включений углерода зависят от многих причин, в том числе и от режима термообработки. В этом отношении нежелательным, например, является быстрое охлаждение стали с последующим ее старением для стабилизации свойств (нагревом до 120—150°С в течение 100—120 ч). Такой режим может вызвать увеличение коэрцитивной силы в два-три раза [Л. 17].

Углерод несколько снижает потери на вихревые токи, однако не настолько, чтобы уменьшить полные потери.

Влияние серы, кислорода и марганца на магнитные свойства электротехнической стали отрицательно. Фосфор уменьшает потери как на гистерезис, так и на вихревые токи и, следовательно, может использоваться для легирования стали, но он повышает хрупкость.

В технически чистом железе всегда имеется небольшое количество различных примесей, поэтому влияние каждой из них надо рассматривать в совокупности с действием других. Для этого случая зависимости, приведенные на рис. 22, являются несправедливыми.

Для улучшения свойств стали необходимо тщательно очищать ее от примесей, обезуглероживать и подвергать особой

\* Gertz M., Journ. Appl. Phys., v. 22, 1951, N. 7.

термообработке. Однако существенно улучшить указанными методами свойства электротехнических сталей, выпускаемых в промышленном масштабе, не удается.

Свойства значительно улучшаются в результате образования магнитной текстуры в стали при ее холодной прокатке и последующем отжиге.

Ранее отмечалось, что электротехнические стали, особенно с большим содержанием кремния, отличаются большой хрупкостью, поэтому долгое время при их изготовлении применяли горячую прокатку. Применение холодной прокатки считалось нерентабельным.

В 1935 г. Госс\* обнаружил высокие магнитные свойства холоднокатаной электротехнической стали вдоль направления прокатки. Во всех других направлениях свойства оказались хуже, т. е. такая сталь обладала магнитной текстурой и являлась магнитноанизотропной. Существенно улучшились и механические свойства: качество поверхности листа, волнистость и штампуемость. Все это привлекло большое внимание к опытам Госса и завершилось выпуском в промышленных масштабах холоднокатаных электротехнических сталей, оттеснивших на последнее место горячекатаные стали.

Высокие свойства холоднокатаных сталей и их магнитная анизотропия объясняются образованием в процессе прокатки и отжига кристаллографической текстуры.

Элементарная ячейка железокремнистого сплава представляет собой объемноцентрированный куб, для которого направления легкого намагничивания являются его ребра, а самому трудному намагничиванию соответствуют пространственные диагонали.

При отсутствии текстуры имеет место хаотическое расположение кристаллов. Вследствие этого материал приобретает изотропные свойства со статистически постоянной средней намагниченностью по любому направлению.

В результате холодной прокатки зерна в кристаллографическом отношении получают преимущественную ориентацию, которая называется **текстурой прокатки**\*\*. Степень текстуры зависит от температуры прокатки, степени обжатия и толщины листа.

Однако деформация в холодном состоянии приводит к появлению больших внутренних напряжений и, следовательно, к росту коэрцитивной силы. Эти напряжения можно снять отжигом.

При нагреве холоднокатаной стали до температуры свыше  $900^{\circ}\text{C}$  наблюдается рекристаллизация, сопровождающаяся бурным ростом зерен кристаллитов и одновременной ориентацией их вдоль направления легкого намагничивания. В результате ребра

\* Goss, Trans. Am. Soc. Met., 1935, N. 23, p. 511—544.

\*\* Незначительное упорядочение кристаллитов и связанная с этим анизотропия свойств наблюдается и при горячей прокатке.

кубов оказываются расположенными параллельно к направлению прокатки, а плоскости ромбических додекаэдров — параллельно плоскости прокатки (рис. 23). Такая текстура называется **ребровой текстурой рекристаллизации**. Ее интенсивность достигает 80—90%.

Технологический процесс производства стали с ребровой текстурой заключается в следующем:

- 1) горячая прокатка полосы до 2,5—2,8 мм;
- 2) холодная прокатка ленты 2,5—2,8 ÷ 1—0,9 мм;
- 3) промежуточный отжиг ленты при температуре 750—780° С;
- 4) холодная прокатка ленты 0,9—1,0 ÷ 0,35—0,50 мм;
- 5) окончательный отжиг ленты при температуре 1100—1150° С.

Усложнение технологического процесса приводит к тому, что текстурированная сталь дороже горячекатаной стали того же состава при одинаковой толщине ленты в 1,5—2 раза. Однако увеличение стоимости полностью окупается уменьшением потерь (приблизительно в 2 раза), высоким качеством поверхности листа и хорошей штампуемостью.

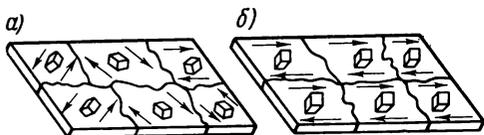


Рис. 23. Схематическое изображение расположения кристаллов относительно направления прокатки:

*а* — горячекатаная сталь; *б* — холоднокатаная сталь с ребровой текстурой рекристаллизации

Применение сталей, обладающих магнитной анизотропией, требует та-

кой конструкции магнитопровода, при которой магнитный поток проходит только в направлении наилучших магнитных свойств, т. е. в направлении прокатки. Самые плохие магнитные свойства наблюдаются под углом 55° к направлению прокатки.

Выполнение поставленного условия для сердечников трансформаторов возможно в результате применения ленточных сердечников (сплошных или разрезных), а также комбинированных магнитопроводов, у которых стержни изготовлены из текстурированных, а ярмо — из горячекатаных сталей. Схематическое изображение магнитопроводов различных типов представлено на рис. 24.

Применение текстурированных сталей позволяет для мощных трансформаторов уменьшить потери энергии на 20—30%, стоимость трансформатора — на 5%, вес — на 10%, расход стали — на 20%. Для трансформаторов малой мощности выигрыш в весе еще более значителен\*.

\* Проблемы производства и применения электротехнических сталей. Материалы совещания. Свердловск, 1960.

Для магнитопроводов электрических машин с круговой формой статора и ротора выполнить требование параллельности направлений намагничивания и прокатки значительно труднее. Наиболее рациональным решением в этом случае является применение малотекстурованных сталей, которые обладают несколько повышенными по сравнению с горячекатаными сталями магнитными свойствами и хорошими механическими качествами, присущими холоднокатаным сталям, что обеспечивает высокий коэффициент заполнения при незначительной магнитной анизотропии.

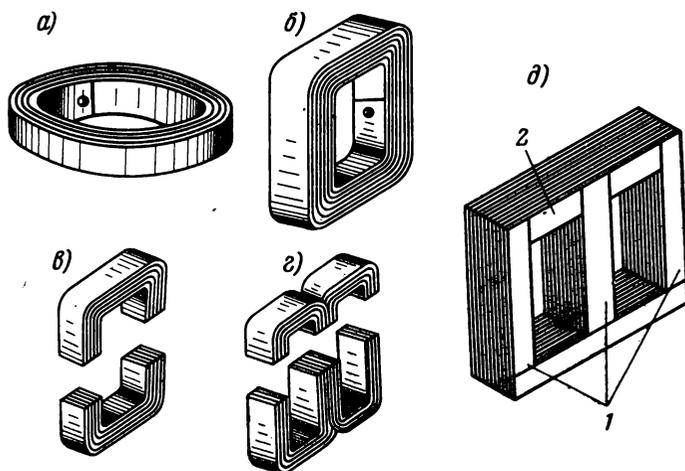


Рис. 24. Схематическое изображение магнитопроводов трансформаторов для текстурованных материалов:

а, б — сплошные ленточные сердечники; в, г — разрезные ленточные сердечники; д — сборный комбинированный магнитопровод (1 — стержни из текстурованного материала; 2 — ядро из горячекатаной изотропной стали)

Большой интерес представляют проводимые в последнее время работы по получению электротехнических сталей не с ребровой, а с кубической текстурой. Схематическое изображение расположения кристаллитов с двумя указанными видами текстур показано на рис. 25, из которого видно, что в случае кубической текстуры наилучшие магнитные свойства обеспечиваются при прохождении магнитного потока в двух направлениях: вдоль и поперек прокатки, а направление самого трудного намагничивания (по пространственным диагоналям) вообще исключается из плоскости намагничивания. Получение материалов с кубической текстурой будет являться крупным шагом вперед в вопросе улучшения свойств электротехнических сталей, уменьшения потерь энергии, а также веса и габаритов электромагнитных устройств.

В настоящее время электротехнические стали выпускают в соответствии с двумя стандартами: ГОСТ 802—58 «Сталь электротехническая тонколистовая» и ГОСТ 9925—61 «Лента холоднокатаная рулонная из электротехнической стали».

Марка стали обозначается буквой «Э» и следующими за ней цифрами.

Первая цифра после буквы обозначает степень легирования стали кремнием. Ориентировочно можно считать, что эта цифра соответствует среднему содержанию кремния в весовых процентах (1 — слаболегированная, 2 — среднелегированная, 3 — по-

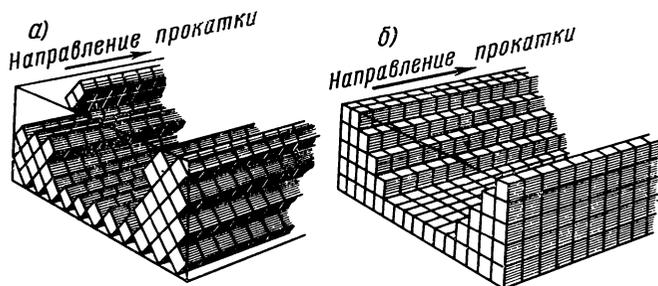


Рис. 25. Схематическое изображение расположения кристаллов относительно направления прокатки:  
а — для материала с ребровой текстурой; б — для материала с кубической текстурой

вышеннолегированная, 4 — высоколегированная). Часто первые две группы (Э1, Э2) называют динамными сталями, а третью и четвертую (Э3, Э4) — трансформаторными. Стандарт такую классификацию не предусматривает.

Вторая цифра (1—8) означает гарантированные электромагнитные свойства стали при ее работе в определенных условиях эксплуатации. Это деление определяет область применения той или иной марки стали.

По этому признаку различают три группы сталей.

1. Стали, предназначенные для работы в средних и сильных магнитных полях при частоте перемагничивания 50 *гц* (1 — нормальные, 2 — пониженные и 3 — низкие удельные потери).

2. Стали, предназначенные для работы в средних полях при частоте перемагничивания 400 *гц* (ГОСТ 802—58 цифра 4; ГОСТ 9925—61 цифры 4 — нормальные, 5 — пониженные, 6 — низкие удельные потери).

3. Стали, предназначенные для работы в малых или средних полях (ГОСТ 802—58 для работы в слабых полях цифры 5 — с нормальной и 6 — с повышенной магнитной проницаемостью; для работы в средних полях цифры 7 — с нормальной и 8 — с повышенной магнитной проницаемостью; ГОСТ 9925 — 61 цифры 7 и

8 — повышенные свойства соответственно в малых и в средних полях).

После второй цифры может стоять нуль (текстурованная сталь) или два нуля (малотекстурованная сталь). Для материалов с особо низкими удельными потерями в конце обозначения марки ставится буква «А», а для материалов повышенной точности проката и повышенной отделки поверхности дополнительно вводится буква «П».

Листы и рулоны должны поставляться заказчику в отожженном состоянии. По требованию заказчика допускается поставка листов и рулонов в нагартованном виде (без отжига), в этом случае к обозначению марки стали добавляется буква «Т».

Рассмотрим пример условных обозначений электротехнической стали.

**Пример.** Сталь Э310 П—0,35 × 750 × 1500 ГОСТ 802—58 читается так: сталь электротехническая с содержанием 3% Si, т. е. повышеннолегированная (трансформаторная) с гарантированными магнитными свойствами в средних и сильных полях при частоте намагничивания 50 гц, текстурованная, с повышенным качеством отделки поверхности, в виде листа толщиной 0,35 мм и с размерами 750 × 1500 мм, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 802—58.

Перейдем к рассмотрению свойств основных групп сталей.

**Свойства сталей, работающих в средних и сильных магнитных полях при частоте 50 гц.** Эта группа сталей является самой большой по количеству марок и объему применения. Она используется главным образом для энергетического оборудования — генераторов, двигателей, силовых трансформаторов. Стали этой группы выпускаются 20 марок\*, из них 4 марки текстурованных, 5 малотекстурованных и 11 горячекатаных. Четыре марки стали выпускаются в листах и в рулонах (Э310, Э320, Э330, Э330А), остальные — только в листах. Толщина проката от 1,0 до 0,2 мм.

Основными электромагнитными характеристиками этой группы сталей являются кривая намагничивания в области средних и сильных полей, удельные потери при частоте 50 гц и различных амплитудах магнитной индукции. Эти данные приведены в табл. 5.

По требованиям стандарта кривая намагничивания определяется коммутационным баллистическим методом, т. е. в постоянных полях. При работе на частоте 50 гц и выше значения индукции будут меньше указанных в табл. 5 [Л. 17], что иллюстрируется рис. 26, на котором представлены кривые намагничивания стали Э330, измеренные в постоянном поле и в переменном поле частоты  $f=50$  гц. В сильных полях кривые практически совпадают, а в слабых и в средних существенно различаются.

\* Всего ГОСТ 802—58 и ГОСТ 9925—61 предусматривает выпуск сталей 31 марки.

Таблица 5

**Электромагнитные свойства электротехнической стали, применяемой  
в энергетическом электромашиностроении**  
(по данным ГОСТ 802—58 и ГОСТ 9925—61)

Марки стали	Толщина листа, мм	Магнитная индукция в гауссах при напряженности магнитного поля, а/см					Удельные потери вт/кг		
		B10	B25	B50	B100	B300	P10/50	P15/50	P17/50
		не менее					не более		

*Горячекатаная сталь*

Э11	1,0	—	15 300	16 300	17 600	20 000	5,8	13,4	—
Э12	1,0	—	15 000	16 200	17 500	19 800	5,5	12,5	—
Э11	0,50	—	15 300	16 400	17 600	20 000	3,3	7,7	—
Э12	0,50	—	15 000	16 200	17 500	19 800	3,2	7,5	—
Э13	0,50	—	15 000	16 200	17 500	19 800	2,8	6,5	—
Э21	0,50	—	14 800	15 900	17 300	19 500	2,5	6,1	—
Э22	0,50	—	14 800	15 900	17 300	19 500	2,2	5,3	—
Э31	0,50	—	14 600	15 700	17 200	19 400	2,0	4,4	—
Э32	0,50	—	14 600	15 700	17 100	19 200	1,8	3,9	—
Э31	0,35	—	14 600	15 700	17 100	19 200	1,6	3,6	—
Э32	0,35	—	14 600	15 700	17 100	19 200	1,4	3,2	—
Э41	0,50	13 000	14 600	15 700	17 000	19 000	1,55	3,5	—
Э42	0,50	12 900	14 500	15 600	16 900	18 900	1,4	3,1	—
Э43	0,50	12 900	14 400	15 500	16 900	18 900	1,25	2,9	—
Э43А	0,50	12 900	14 400	15 500	16 900	18 900	1,15	2,7	—
Э41	0,35	13 000	14 600	15 700	17 000	19 000	1,35	3,0	—
Э42	0,35	12 900	14 500	15 600	16 900	18 900	1,2	2,8	—
Э43	0,35	12 900	14 400	15 500	16 900	18 900	1,05	2,5	—
Э43А	0,35	12 900	14 400	15 500	16 900	18 900	0,9	2,2	—

*Холоднокатаная малотекстурованная сталь*

Э1100	0,50	—	15 300	16 400	17 600	20 000	3,3	7,5	—
Э1200	0,50	—	15 300	16 400	17 600	20 000	2,8	6,5	—
Э1300	0,50	—	15 500	16 400	17 600	20 000	2,5	5,8	—
Э3100	0,50	—	15 000	16 000	17 300	19 600	1,7	3,7	—
Э3200	0,50	—	14 800	15 800	17 200	19 500	1,5	3,4	—

*Холоднокатаная текстурованная сталь*

Э310	0,50	16 000	17 500	18 300	19 100	19 800	1,1	2,45	3,2
Э320	0,50	16 500	18 000	18 700	19 200	20 000	0,95	2,1	2,8
Э330	0,50	17 000	18 500	19 000	19 500	20 000	0,8	1,75	2,5
Э310	0,35	16 000	17 500	18 300	19 100	19 800	0,8	1,75	2,5
Э320	0,35	16 500	18 000	18 700	19 200	20 000	0,7	1,5	2,2
Э330	0,35	17 000	18 500	19 000	19 500	20 000	0,6	1,3	1,9
Э330А	0,35	17 000	18 500	19 000	19 500	20 000	0,5	1,1	1,6

**Примечания:**

1. Свойства горячекатаной и малотекстурованной холоднокатаной стали указаны для проб, не подвергавшихся после нарезки отжигу. Свойства тексту-

рованной холоднокатаной стали указаны для проб, подвергнутых после нарезки отжигу для снятия наклепа.

При испытании проб текстурованной холоднокатаной стали без отжига полученные результаты по удельным потерям снижаются на 10% при сравнении с нормами табл. 5.

2. Для малотекстурованной холоднокатаной стали разница в значениях магнитной индукции В25 вдоль и поперек листа не должна превышать: для марок Э1100, Э1200, Э1300—1300 гс, для марок Э3100, Э3200—1600 гс.

3. Стали марок Э310, Э320, Э330, Э330А выпускаются также в рулонах (ГОСТ 9925—61).

На рис. 27 показаны кривые намагничивания, измеренные в широком диапазоне изменения напряженности поля, для трех наиболее характерных марок рассматриваемой группы. Рисунок наглядно иллюстрирует зависимость магнитных свойств от степени легирования и наличия текстуры.

Для текстурованных сталей представляет большой интерес зависимость свойств от угла между направлением магнитного потока и прокатки. Типичные кривые такого рода приведены на рис. 28. Для малотекстурованных сталей разница в свойствах при разных направлениях магнитного потока составляет всего 3—5%.

Выше отмечалось, что магнитные свойства зависят от толщины листа. На рис. 29 показана такая зависимость, из которой видно, что уменьшение толщины проката сверх определенной для каждого материала величины приводит к резкому возрастанию коэрцитивной силы, а следовательно, и потерь на гистерезис.

Для рассматриваемой группы сталей, применяемых в энергетическом электромашиностроении, большое значение имеют удельные потери.

Из рассмотрения данных табл. 5 следует, что удельные потери для индукции 10 кгс и частоты 50 гц составляют для малотекстурованных сталей 1,5—3,3 вт/кг и для текстурованных 0,5—1,1 вт/кг. Удельные потери зависят от марки стали, толщины листа, амплитуды индукции, частоты перемагничивания и микроструктуры стали (например, от режима термической обработки).

Чем выше магнитные свойства стали, тем меньше доля потерь на гистерезис в полных потерях. Для горячекатаных слаболегированных сталей (Э1, Э2) потери на гистерезис составляют 70—75% от общих потерь ( $f=50$  гц), для текстурованных (Э320, Э330) — 25—35%. Соотношение потерь мало зависит от амплитуды индукции при изменении ее в пределах рабочего диапазона.

Зависимость удельных потерь от магнитной индукции для различных марок сталей имеет приблизительно одинаковый характер. На рис. 30 показана такая зависимость для текстурованных сталей.

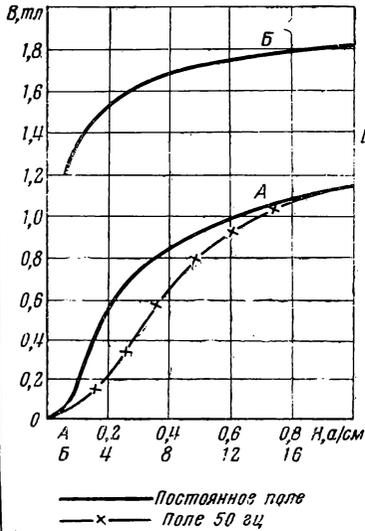


Рис. 26. Кривые намагничивания стали Э330 [Л. 17]

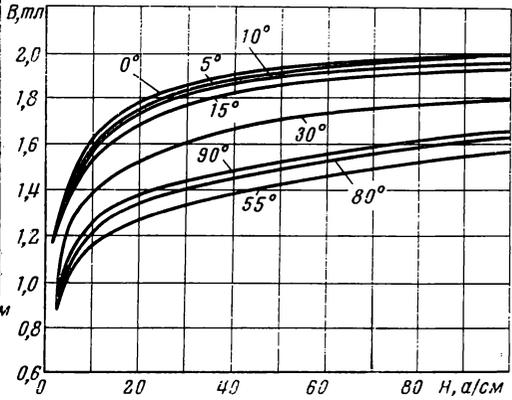


Рис. 28. Кривые намагничивания стали Э320, снятые на образцах, вырезанных под разными углами к направлению прокатки [Л. 17]

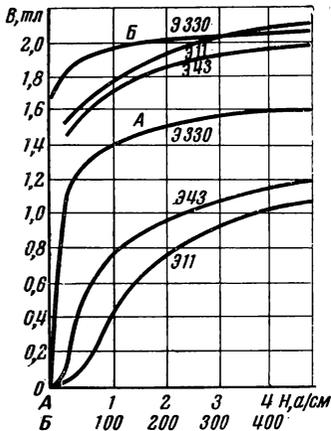


Рис. 27. Кривые намагничивания сталей Э11, Э43, Э330 [Л. 17]

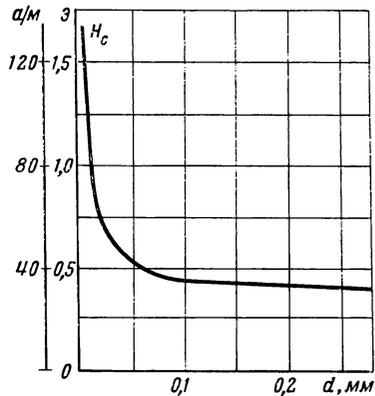


Рис. 29. Зависимость коэрцитивной силы от толщины трансформаторной стали при температуре  $t = 20^\circ \text{C}$  (по данным Шура и Зайковой)

При изменении угла между направлениями прокатки и магнитного потока величина удельных потерь возрастает, достигая максимума для  $55^\circ$ .

Зависимость удельных потерь от частоты определяется соотношением составляющих полных потерь. Потери на гистерезис пропорциональны частоте, потери на вихревые токи — квадрату частоты, дополнительные потери — частоте в степени, большей 1 и меньшей 2. Поэтому, чем больше доля потерь на гистерезис, тем закон изменения удельных потерь от частоты ближе к линейному, чем больше доля потерь на вихревые токи, тем ближе к квадратичному.

Например, при изменении частоты в четыре раза (от 15 до 60 *гц*) для горячекатаных слаболегированных сталей (Э1, Э2) удельные потери возрастают в 5 раз, для текстурованных — в 8 раз.

Во многих случаях применения рассматриваемой группы сталей значительный интерес представляют кривые намагничивания и удельные потери для сложных случаев действия полей — переменного при наличии постоянного поля, импульсных полей и т. п. [Л. 4, 22 и др.]. Ограниченный объем настоящей книги не позволяет уделить должного внимания этому вопросу.

#### Свойства сталей, предназна-

**ченных для работы в средних полях на повышенной частоте.** Эта группа сталей появилась недавно в связи с широким использованием в технике повышенной частоты. Возрастание частоты увеличивает влияние вихревых токов на процессы перемagnичивания. Для уменьшения вихревых токов применяют стали с большим удельным сопротивлением (повышенно- и высоколегированные марок Э3 и Э4), преимущественно толщиной проката 0,05; 0,8; 0,1; 0,15 *мм*.

Почти все марки сталей этой группы выпускаются как текстурованные в рулонах и только одна марка (Э44) выпускается как горячекатаная в листах.

Электромагнитные свойства сталей, предназначенных для работы в полях повышенной частоты, приведены в табл. 6.

Сравнение свойств сталей предыдущей и рассматриваемой групп (ср. табл. 5 и 6) показывает существенное увеличение потерь на частоте 400 *гц*. Например, для горячекатаной стали Э44

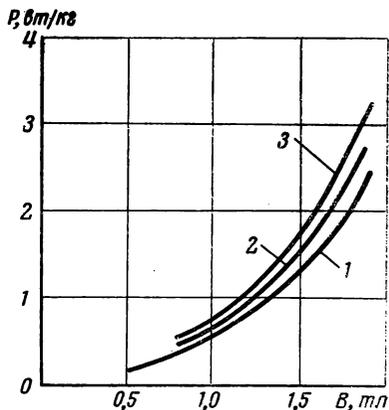


Рис. 30. Зависимость удельных потерь от магнитной индукции для текстурованных сталей:

1 — сталь Э330,  $d = 0,35$  мм, 2 — сталь Э320,  $d = 0,35$  мм; 3 — сталь Э310,  $d = 0,35$  мм [Л. 17]

Таблица 6

Электромагнитные свойства электротехнической стали, предназначенной для работы в средних полях повышенной частоты (400 гц)

а) По данным ГОСТ 802—58

Марки стали	Толщина листа, мм	Магнитная индукция в гауссах при напряженности поля, а/см			Удельные потери, вт/кг		Удельное электросопротивление, Ом·мм <sup>2</sup> /м
		В 5	В 10	В 25	Р 7,5/400	Р 10/400	
		не менее			не более		
Э44	0,35	12 100	13 000	14 400	10,7	19	0,57
Э44	0,20	12 000	12 900	14 200	7,2	12,5	0,57
Э44	0,10	11 900	12 800	14 000	6	10,5	0,57
Э340	0,20	15 000	16 000	17 000	7	12	0,47

б) По данным ГОСТ 9925—61

Марки стали	Толщина ленты, мм	Магнитная индукция в тл при напряженности магнитного поля, а/см						Коэффициентная сила $H_c'$ , а/см	Удельные потери, вт/кг		Удельное сопротивление, Ом·мм <sup>2</sup> /м
		В 0,4	В 0,8	В 2	В 4	В 10	В 25		Р 10/400	Р 15/400	
		не менее							не более		
Э340	0,05	0,40	0,75	1,10	1,25	1,45	1,70	0,36	10,0	21,0	0,5
Э350	0,05	0,55	0,90	1,25	1,35	1,55	1,75	0,36	8,5	19,0	0,5
Э360	0,05	0,80	1,05	1,40	1,50	1,65	1,82	0,32	7,5	16,0	0,5
Э340	0,08	0,40	0,75	1,10	1,25	1,45	1,70	0,36	10,0	22,0	0,5
Э350	0,08	0,55	0,90	1,25	1,35	1,55	1,75	0,32	8,5	19,0	0,5
Э360	0,08	0,80	1,05	1,40	1,50	1,65	1,82	0,28	7,5	17,0	0,5
Э340	0,10	0,45	0,75	1,10	1,25	1,45	1,70	0,36	10,0	22,0	0,5
Э350	0,10	0,60	0,90	1,25	1,35	1,55	1,75	0,32	8,5	19,5	0,5
Э360	0,10	0,80	1,05	1,40	1,50	1,65	1,82	0,28	7,5	17,0	0,5
Э340	0,15	0,50	0,80	1,10	1,30	1,45	1,70	0,34	10,0	23,0	0,5
Э350	0,15	0,60	0,95	1,25	1,40	1,55	1,75	0,32	9,0	20,0	0,5
Э360	0,15	0,80	1,10	1,40	1,55	1,65	1,82	0,26	8,0	19,0	0,5

при толщине листа 0,35 мм удельные потери Р 10/400 = 19 вт/кг, а для сталей того же химического состава (Э41, Э42, Э43, Э43А) и той же толщине листа Р 10/50 = 0,9—1,35 вт/кг. Для текстурованных сталей вместо Р 10/50 = 0,5—1,1 вт/кг имеем Р 10/400 = 7,5—10 вт/кг. Следовательно, удельные потери увеличились в 15—20 раз.

Магнитные свойства, измеренные в постоянных полях, несколько понизились.

Зависимости свойств сталей, предназначенных для работы при повышенных частотах (например, зависимость удельных потерь от амплитуды магнитной индукции и частоты или кривой намагничивания от частоты и др.), качественно имеют тот же характер, что и для сталей предыдущей группы.

Свойства сталей, предназначенных для работы в слабых (0,002—0,008 а/см) или в средних (0,03—10 а/см) полях. Для работы в слабых полях предназначены стали Э45 и Э46; для работы в средних полях — Э47, Э48, Э370, Э380. Толщина ленты в рулонах или листов — 0,20; 0,35 и 0,50 мм.

Электромагнитные свойства этих материалов приведены в табл. 7, а кривые намагничивания основных марок сталей — на рис. 31 и 32.

Таблица 7

Электромагнитные свойства электротехнической стали, предназначенной для работы в малых или средних полях

(по данным ГОСТ 802—58 и ГОСТ 9925—61)

а) Для работы в слабых полях

Марки стали	Толщина листа, мм	Магнитная индукция в гауссах при напряженности поля, а/см			Удельное электросопротивление, Ом·мм <sup>2</sup> /м
		В 0,002	В 0,004	В 0,008	
		не менее			
Э45	0,35	1,2	2,6	7,7	0,55
Э46	0,35	1,5	3,3	8,8	0,55
Э45	0,20	1,3	2,8	7,0	0,55
Э46	0,20	1,6	3,5	8,8	0,55

б) Для работы в средних полях

Марки стали	Толщина листа, мм	Магнитная индукция в гауссах при напряженности поля, а/см									Удельное электросопротивление, Ом·мм <sup>2</sup> /м	
		В 0,03	В 0,05	В 0,1	В 0,2	В 0,5	В 0,7	В 1	В 2	В 5		В 10
		не менее										
Э47	0,35	—	—	350	1400	4800	6100	7700	9200	12 100	13 000	0,55
Э48	0,35	—	—	450	1700	5700	7100	8700	10 200	12 500	13 000	0,55
Э47	0,20	—	—	300	1000	3800	5300	6600	9000	11 800	12 900	0,55
Э48	0,20	—	—	400	1400	4800	6200	7400	9200	12 000	12 900	0,55
Э370	0,50	140	400	2500	8000	12 000	13 000	14 500	15 500	16 500	17 000	0,47
Э380	0,50	200	550	4200	10 200	13 800	14 700	15 200	15 800	16 700	17 000	0,47
Э370	0,35	120	250	2000	7000	11 000	12 000	13 500	14 500	16 000	17 000	0,47
Э380	0,35	180	450	4000	10 000	13 500	14 500	15 000	15 500	16 500	17 000	0,47
Э370	0,20	100	200	1400	5000	9000	10 400	11 600	14 200	15 700	16 700	0,47
Э380	0,20	180	450	2000	7000	11 000	12 000	13 500	14 500	16 000	17 000	0,47

Примечания:

1. Свойства стали, приведенные в табл. 7, указаны для проб горячекатаной стали, не подвергающихся после нарезки отжигу, а для проб холоднокатаной стали — после дополнительного отжига для снятия наклепа от резки.

2. Сталь марок Э370 и Э380 выпускаются также и в рулонах (ГОСТ 9925—61).

Главное требование к этим материалам состоит в высоких значениях магнитной проницаемости в области слабых и средних полей. Удельные потери не имеют существенного значения, поэтому они не нормируются.

Высокие магнитные свойства в средних и особенно в слабых полях обеспечиваются в результате очистки металла от примесей и снятия внутренних напряжений, а для текстурованных сталей — дополнительно высокой степенью текстуровки.

Для материала, полученного от завода-изготовителя, дальнейшее улучшение свойств может быть достигнуто путем проведения дополнительного отжига после механической обработки деталей. Характер и режим отжига существенно влияют на магнитные свойства (см. § 12).

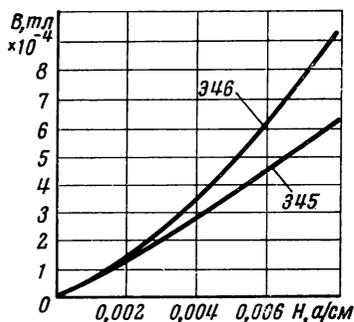


Рис. 31. Кривые намагничивания на постоянном токе сталей Э45 и Э46 [Л. 17]

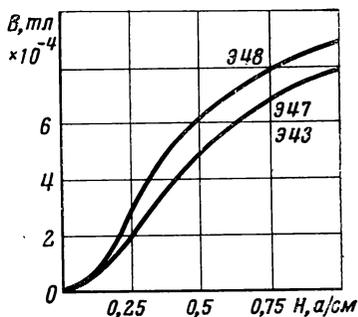


Рис. 32. Кривые намагничивания на постоянном токе сталей Э43, Э47, Э48 [Л. 17]

Для сталей этой группы свойственна большая степень анизотропии магнитной индукции. В горячекатаных сталях она достигает 30—40% в области слабых полей и 5—7% — в области средних. Для текстурованных сталей свойства вдоль и поперек направления прокатки могут отличаться в десятки раз.

В заключение рассмотрим вопрос стабильности свойств электротехнических сталей всех трех групп.

Магнитные свойства сталей с течением времени ухудшаются, что объясняется структурными изменениями в материале (старением стали). Для стабилизации свойств процессы старения искусственно ускоряют, подвергая сталь нагреву до 120—150° С в течение 120 ч.

Кремний повышает стабильность свойств во времени, поэтому изменение свойств в результате искусственного старения для высоколегированных сталей меньше (~3%), чем для слаболегированных (~7—9%).

Следует отметить, что быстрое охлаждение стали при повторном отжиге (сотни градусов в час) вызывает значительное усиление процессов старения.

Свойства сталей зависят также от температуры и механических напряжений.

При повышении температуры происходит значительное падение константы магнитной анизотропии и небольшое уменьшение магнитной индукции насыщения. Этому соответствует возрастание магнитной проницаемости в слабых полях и ее уменьшение в сильных.

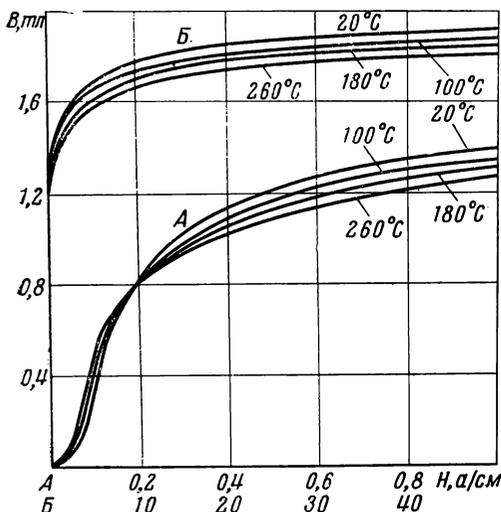


Рис. 33. Кривые намагничивания для стали Э330 вдоль направления прокатки при разных температурах (по данным О. Н. Альтгаузен)

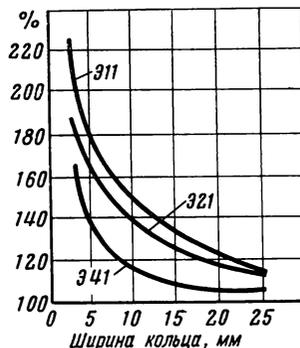


Рис. 34. Зависимость увеличения потерь на гистерезис при штамповке от ширины кольца [Л. 3]

Кривые, иллюстрирующие зависимость магнитных свойств стали от температуры, приведены на рис. 33.

Удельные потери при повышении температуры несколько снижаются, что объясняется возрастанием удельного электросопротивления.

Механические напряжения могут возникать в электротехнических сталях по разным причинам. Например, при остывании листа в процессе его производства края остывают быстрее, чем середина, в результате чего срединные части оказываются под действием растягивающих, а краевые — сжимающих напряжений. При изготовлении магнитопровода после штамповки или резки материала по его кромке возникают сжимающие напряже-

ния (наклеп). В процессе сборки сердечника пакет обжимается и стягивается, и поэтому сталь оказывается под воздействием механических напряжений и т. п.

Во всех случаях наличие механических напряжений приводит к ухудшению магнитной проницаемости, особенно в слабых полях. Удельные потери также увеличиваются.

Степень воздействия механических напряжений зависит от их величины, марки материала, отношения деформированной зоны к общей площади пластины и т. п.

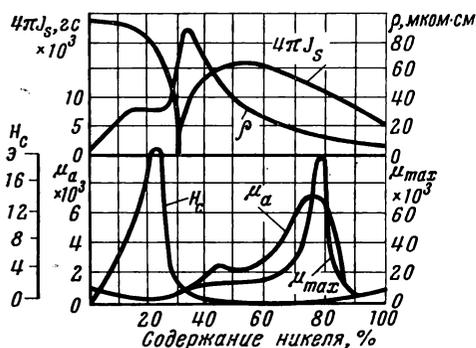


Рис. 35. Зависимость свойств сплавов железо—никель от содержания никеля [Л. 3]

В качестве примера воздействия механических напряжений на магнитные свойства на рис. 34 приведена зависимость увеличения потерь на гистерезис при штамповке от ширины кольца.

Магнитные свойства могут быть в значительной степени восстановлены путем проведения повторного отжига.

Некоторые технологические вопросы применения электротехнических сталей рассмотрены в § 12.

## § 11. ПЕРМАЛЛОИ

Развитие автоматики, радиосвязи, электрических измерений и других областей техники потребовало создания материалов с более высокими магнитными свойствами в слабых полях, чем у электротехнических сталей.

К таким материалам относятся прежде всего пермаллои — сплавы железа с никелем, обычно легированные хромом, медью, кремнием и некоторыми другими элементами.

Высокие магнитные свойства пермаллоев в слабых полях были известны еще в 1913 г. Однако широкое внедрение этих материалов в технику произошло в последние 15—20 лет, а первый стандарт\* на эти материалы в СССР введен только с 1/VII 1963 г.

На рис. 35 представлены зависимости физических свойств железоникелевых сплавов от содержания никеля. Из рассмотрения кривых видно, что наибольшими значениями  $\mu_a$  и  $\mu_{max}$  обла-

\* ГОСТ 10160—62. Сплавы железоникелевые с высокой магнитной проницаемостью. Срок введения 1/VII 1963 г.

дает сплав с содержанием 78,5% Ni, получивший название *классического пермаллоя*.

Для этого сплава константа кристаллографической анизотропии  $K$  и магнитострикция насыщения  $\lambda_S$  близки к нулю.

Как показали Н. С. Акулов и затем Е. И. Кондорский, одновременное равенство нулю  $K$  и  $\lambda_S$  и является причиной особенно легкой намагничиваемости пермаллоев, что объясняется следующим образом.

Уменьшение магнитной кристаллографической анизотропии или, другими словами, уменьшение внутрискристаллических сил ориентации приводит к тому, что разница в работе, которую надо совершить для намагничивания кристалла в «легком» или в «трудном» направлениях, становится меньше. Уменьшение магнитострикции приводит к снижению напряжений в кристаллической решетке, возникающих при изменении линейных размеров под действием намагничивающего поля, и, следовательно, облегчает процессы намагничивания.

Следует отметить, что при близких к нулю значениях  $K$  и  $\lambda_S$  магнитные свойства материала становятся чрезвычайно чувствительными к наличию внешних напряжений, что в большинстве случаев является нежелательным.

Магнитные свойства в очень большой степени зависят также от химического состава и чистоты сплава. При этом особенно сильное влияние оказывают примеси, такие, как углерод, сера и кислород, не входящие в твердый раствор.

Высокие магнитные свойства у пермаллоя с содержанием 78,5% Ni были получены в результате особого вида термической обработки, так называемой «пермаллоидной», которая состоит из двух этапов.

1. Нагрева до 900—950° С с выдержкой при этой температуре в течение часа и охлаждением со скоростью, не превосходящей 100° С в час.

2. Повторным нагревом до 600° С и охлаждением при комнатной температуре на медной плите со скоростью до 1500 град/мин («воздушная закалка»).

Сильная зависимость проницаемости от скорости охлаждения объясняется образованием сверхструктуры\* при медленном охлаждении, однако окончательно выясненным этот вопрос считать нельзя.

При очень большой скорости охлаждения магнитные свойства ухудшаются, что объясняется возникновением внутренних напряжений.

Дальнейшие исследования показали, что двойная обработка

---

\* Сверхструктура (упорядоченный твердый раствор) — твердый раствор замещения с закономерным расположением атомов входящих в раствор компонентов по узлам кристаллической решетки.

для классического пермаллоя может быть заменена одинарной, заключающейся в высокотемпературном отжиге при 1300° С в чистом сухом водороде и длительном отпуске при 400—500° С.

Из рис. 35 можно увидеть, что второй максимум для начальной проницаемости наблюдается для сплавов с содержанием 40—50% Ni. Эти сплавы обычно называют низконикелевыми, в отличие от высоконикелевых с содержанием 72—80% Ni.

В табл. 8 приведены некоторые свойства высоконикелевого (78,5% Ni) и низконикелевого (50% Ni) нелегированных пермаллоев в постоянных магнитных полях.

Таблица 8

Свойства нелегированных высоконикелевого (78,5% Ni) и низконикелевого (50% Ni) пермаллоев [Л. 3]

Содержание никеля, %	$\mu_a$	$\mu_{max}$	$H_c$	$B_s$	$\rho$ , ом·мм <sup>2</sup> /м	Термическая обработка
50	2000—3200	50 000—60 000	0,75 э (6 а/м)	15 500 гс (1,55 тл)	0,5	Отжиг 1000—1200° С Двойная (пермаллоевая)
78,5	7000—14 000	100 000—200 000	0,25 э (2 а/м)	10 500 гс (1,05 тл)	0,25	

На основании данных табл. 8 можно сделать следующие выводы.

Магнитная проницаемость у высоконикелевых пермаллоев в несколько раз выше, чем у низконикелевых, и в несколько десятков раз выше, чем у электротехнических сталей. Отметим, что без термической обработки проницаемость пермаллоев ниже, чем у технически чистого железа.

Индукция насыщения высоконикелевых пермаллоев приблизительно в 2 раза ниже, чем у электротехнических сталей и в 1,5 раза ниже, чем у низконикелевых.

Отсюда следует, что высоконикелевые пермаллои нецелесообразно применять в качестве материала для сердечников силовых трансформаторов и других устройств, для которых существенным является создание большого магнитного потока.

Удельное электросопротивление высоконикелевых пермаллоев в 2 раза меньше, чем у низконикелевых. Следовательно, при работе в переменных магнитных полях, особенно на повышенных частотах, предпочтение надо отдать низконикелевым пермаллоям.

Термическая обработка высоконикелевых пермаллоев сложнее, чем низконикелевых.

Следует также иметь в виду, что высоконикелевые пермаллои дороже низконикелевых из-за большого содержания никеля и что механические напряжения, а также чистота и состав сплава

значительно сильнее влияют на магнитные свойства высоконикелевых пермаллоев, чем низконикелевых.

Большой диапазон изменения магнитных свойств, указанных в табл. 8, объясняется плохой воспроизводимостью характеристик пермаллоя.

Для улучшения электромагнитных свойств обе группы пермаллоев обычно легируют различными элементами.

Легирование молибденом вызывает значительное увеличение удельного электросопротивления, оказывает положительное влияние на величину начальной проницаемости и позволяет двойную термообработку заменить сравнительно простым отжигом. Кроме того, наличие молибдена уменьшает чувствительность к деформации.

Отрицательное действие молибдена проявляется в уменьшении индукции насыщения.

Действие хрома в значительной степени аналогично действию молибдена.

Медь способствует увеличению постоянства магнитной проницаемости при изменении напряженности поля, улучшает температурную стабильность, а также повышает электросопротивление. Сплавы с медью хорошо поддаются механической обработке.

Для легирования пермаллоев применяются также и некоторые другие элементы.

Создание стандарта на промышленные марки пермаллоев связано с большими трудностями, что объясняется плохой воспроизводимостью характеристик. Стандарт можно создавать лишь при высокой культуре производства сплавов.

В настоящее время впервые в СССР принят ГОСТ 10160—62, «Сплавы железоникелевые с высокой магнитной проницаемостью» (срок введения 1/VII 1963 г.).

Стандарт распространяется на девять марок сплавов, разделенных на четыре группы.

I. 45Н, 50Н — нелегированные низконикелевые пермаллои с содержанием соответственно 45% Ni и 50% Ni.

II. 50НП, 65НП, 34НКМП — сплавы, обладающие кристаллографической или магнитной текстурой и прямоугольной петлей гистерезиса (свойства этих сплавов рассмотрены в § 27).

III. 50НХС — низконикелевый пермаллой с содержанием 50% Ni, легированный хромом и кремнием.

IV. 79НМ, 80НХС, 76НХД — высоконикелевые пермаллои (79% Ni, 80% Ni, 76% Ni), легированные соответственно молибденом (3,8—4,1%), хромом и кремнием, хромом и медью (4,80—5,20%).

Все сплавы содержат в небольших количествах марганец (0,30—0,60%) и кремний (0,15—0,30%).

Сплавы изготавливаются в виде холоднокатаных лент толщиной от 0,02 до 2,5 мм, горячекатаных листов, горячекатаных и кова-

ных прутков. Ширина лент зависит от толщины и составляет для самых тонких лент 30—100 мм, для самых толстых — 100—250 мм.

Листы, ленты и прутки поставляются в термически необработанном виде.

Режимы термической обработки, рекомендуемые стандартом, приведены в табл. 9.

Таблица 9

Режимы термической обработки железоникелевых сплавов (пермалоев), рекомендованные ГОСТ 10160—62

Марка сплава	Среда отжига	Температура, °С, и скорость нагрева	Время выдержки при температуре нагрева в зависимости от размера и веса садки, ч	Режим охлаждения
45Н	Вакуум	1100—1150 по 400—500 град/ч	3—6	Охлаждение до 600°С со скоростью 100—200°С в час; с 600 до 200°С плавное охлаждение со скоростью не более 400°С в час
50НХС	Вакуум	1100—1150 по 400—500 град/ч	3—6	Охлаждение до 400°С со скоростью 100°С в час, далее охлаждение образцов в воздухе
76НХД	Вакуум	1100—1150 по 400—500 град/ч	3—6	Охлаждение до 500°С со скоростью 50°С в час, далее до 300°С со скоростью 10°С в час, затем охлаждение со скоростью не более 400°С в час

Примечания:

1. Отожженные образцы и изделия должны быть светлыми, чистыми, свободными от окислов, темных пятен и цветов побежалости. Совершенно не допускается спекание пластин или витков друг с другом в процессе отжига.

2. Отожженные изделия, детали или ленточные сердечники не должны подвергаться в процессе сборки ударам, изгибам, рихтовке, шлифовке, а также чрезмерной затяжке или сдавливаемости обмоткой.

3. Отожженные изделия или образцы для магнитных измерений осторожно снимают с оправок, закладывают в защитные каркасы и направляют на сборку или магнитные испытания.

Статические магнитные свойства сплавов после конечной термической обработки должны соответствовать данным табл. 10.

Сплавы с улучшенными свойствами обозначаются дополнительно буквой «У».

Из рассмотрения данных табл. 10 можно следующим образом охарактеризовать различные марки сплавов.

Таблица 10

**Свойства железоникелевых сплавов (пермаллоев) после  
термической обработки  
(ГОСТ 10160—62)**

Марка сплава	Вид продукции	Толщина или диаметр, мм	Начальная проницае- мость		Максимальная проницае- мость		Коэрцитив- ная сила		Техническое насы- щение, тл	Удельное электросо- противление, Ом·мм <sup>2</sup> /м
			$T_L \cdot M / a \cdot 10^{-3}$	$ZC / \rho$	$T_L \cdot M / a \cdot 10^{-3}$	$ZC / \rho$	$a / M$	$\rho$		
			не менее				не более			
45Н	Холодно- катаные ленты	0,02—0,04	2,1	1700	20	16 000	32	0,40	1,5	0,45
		0,05—0,08	2,3	1800	23	18 000	24	0,30		
		0,10—0,18	2,5	2000	25	20 000	24	0,30		
0,20—0,30		3,1	2500	29	23 000	20	0,25			
0,35—2,50		3,5	2800	31	25 000	16	0,20			
	Горячека- таные листы	3—22	2,5	2000	23	18 000	24	0,30		
	Прутки	8—10	2,5	2000	23	18 000	24	0,30		
50Н	Холодно- катаные ленты	0,02—0,04	2,3	1800	25	20 000	24	0,30	1,5	0,45
		0,05—0,08	2,5	2000	25	20 000	20	0,25		
		0,10—0,18	2,9	2300	31	25 000	16	0,20		
0,20—0,30		3,3	2600	38	30 000	12	0,15			
0,35—0,50		3,8	3000	44	35 000	10	0,12			
0,55—1,0		3,8	3000	38	30 000	12	0,15			
	Горячека- таные листы	3—22	3,1	2500	25	20 000	24	0,30		
	Прутки	8—100	3,1	2500	25	20 000	24	0,30		
50Н-У	Холодно- катаные ленты	0,10—0,18	3,8	3000	38	30 000	14	0,18	1,5	0,45
		0,20—0,30	4,4	3500	44	35 000	12	0,15		
		0,35—0,50	5,0	4000	56	45 000	10	0,12		
		0,55—1,0	5,0	4000	50	40 000	10	0,12		
		1,1—2,5	3,8	3000	44	35 000	12	0,15		
50НХС	Холодно- катаные ленты	0,02—0,04	1,9	1500	19	15 000	20	0,25	1,0	0,90
		0,05—0,08	2,5	2000	25	20 000	16	0,20		
		0,10—0,18	3,1	2500	31	25 000	13	0,16		
		0,20—0,30	3,8	3000	35	28 000	10	0,12		
		0,35—0,50	4,0	3200	38	30 000	8	0,10		
		0,55—1,0	3,8	3000	25	20 000	10	0,12		

Продолжение табл. 10

Марка сплава	Вид продукции	Толщина или диаметр, мм	Начальная проницае- мость		Максимальная проницаемость		Коэффи- циентная си- ла		Техническое насы- щение, т/л	Удельное электро- сопротивление, Ом·мм <sup>2</sup> /м
			тл·мм/а·10 <sup>-3</sup>	гс/э	тл·мм/а·10 <sup>-3</sup>	гс/э	а/м	э		
79НМ	Холод- нокатаные ленты	0,02—0,04	20	16 000	88	70 000	4,0	0,05	0,75	0,55
		0,05—0,08	20	16 000	1100	90 000	3,2	0,04		
		0,10—0,18	25	20 000	150	120 000	2,4	0,03		
0,20—0,30		28	22 000	160	130 000	1,6	0,02			
0,35—1,0		31	25 000	190	150 000	1,6	0,02			
1,1—2,5		28	22 000	160	130 000	1,6	0,02			
	Горяче- катаные листы	3—22	25	20 000	100	80 000	3,2	0,04		
	Прутки	8—10	25	20 000	100	80 000	3,2	0,04		
79НМ-У	Холод- нокатаные ленты	0,02—0,04	25	20 000	130	100 000	2,4	0,03	0,73	0,55
		0,05—0,08	25	20 000	150	120 000	1,6	0,02		
		0,10—0,18	28	22 000	190	150 000	1,2	0,015		
		0,20—0,30	31	25 000	230	180 000	1,2	0,015		
		0,35—1,0	38	30 000	280	220 000	1,0	0,012		
		1,1—2,5	31	25 000	230	180 000	1,2	0,015		
80НХС	Холод- нокатаные ленты	0,02—0,04	23	18 000	88	70 000	4,0	0,05	0,65	0,62
		0,05—0,08	25	20 000	110	90 000	3,2	0,04		
		0,10—0,18	28	22 000	150	120 000	2,4	0,03		
		0,20—0,30	35	28 000	160	130 000	1,6	0,02		
		0,35—0,50	44	35 000	190	150 000	1,2	0,015		
		0,55—1,0	38	30 000	210	170 000	1,0	0,012		
1,1—2,5	31	25 000	190	150 000	1,2	0,015				
	Горяче- катаные листы	3—22	25	20 000	88	70 000	3,2	0,04		
	Прутки	8—100	25	20 000	88	70 000	3,2	0,04		
76НХД	Холодно- катаные ленты	0,02—0,04	13	10 000	65	50 000	5,2	0,065	0,75	0,57
		0,05—0,08	16	13 000	130	100 000	2,4	0,03		
		0,10—0,18	19	15 000	150	120 000	2,0	0,025		
		0,20—0,30	23	18 000	190	150 000	1,6	0,02		

Примечание. Свойства сплавов марок 50НП, 65НП, НКМП приведены в § 27.

**Сплав 45Н** обладает повышенной магнитной проницаемостью и наивысшим значением индукции насыщения из всей группы железоникелевых сплавов (15 000 гс).

Стандарт рекомендует применять этот сплав для сердечников междуламповых и малогабаритных силовых трансформаторов, дросселей, реле и деталей магнитных цепей, работающих при повышенных индукциях без подмагничивания или с небольшим подмагничиванием.

**Сплав 50Н** отличается от сплава 45Н повышенными магнитными свойствами и несколько большей стоимостью.

**Сплав 50НХС** обладает повышенной магнитной проницаемостью и высоким удельным электросопротивлением. Он рекомендуется для сердечников импульсных трансформаторов и аппаратуры связи звуковых и высоких частот, работающих без подмагничивания или с небольшим подмагничиванием.

**Сплавы 79НМ, 80НХС, 76НХД** имеют высокую проницаемость в слабых полях. Сплав марки 76НХД обладает повышенной температурной стабильностью в интервале от  $-60$  до  $+60^\circ\text{C}$ .

Сплавы этой группы рекомендуются для сердечников малогабаритных трансформаторов, реле и магнитных экранов; при толщине 0,02 мм — для сердечников импульсных трансформаторов, магнитных усилителей и бесконтактных реле.

Кроме рассмотренных марок пермаллоев, в технике находят применение и некоторые другие железоникелевые сплавы.

Большой интерес представляет так называемый супермаллой, который имеет следующий состав: около 79% Ni, 5% Mo, 15% Fe и 0,5% Mn.

Супермаллой в процессе производства тщательно очищается от примесей, плавка ведется в индукционной печи в вакууме, а разливка производится в атмосфере азота или гелия. Термообработка состоит из отжига при  $1300^\circ\text{C}$  в атмосфере чистого водорода и охлаждения с определенной скоростью, которая обеспечивает получение наилучших магнитных свойств.

Отношение значений проницаемостей супермаллоя и пермаллоя 79НМ составляет 5—10 в полях до 4000—5000 гс. При индукции 7000—8000 гс проницаемость супермаллоя резко понижается и становится меньше, чем проницаемость молибденового пермаллоя или железа. Магнитные свойства супермаллоя можно охарактеризовать следующими средними данными:  $\mu_a = 100\,000$ ;  $\mu_{\max} = 600\,000$ — $1\,500\,000$ ;  $H_c = 0,004$  э;  $B_s = 7900$  гс.

На рис. 36 приведены кривые намагничивания и магнитной проницаемости некоторых марок пермаллоя, а на рис. 37 — кривая проницаемости листового супермаллоя (для сравнения на этом же графике приведена кривая проницаемости пермаллоя 79НМ).

Рассмотренные выше магнитные свойства пермаллоев относятся к постоянным магнитным полям.

Во многих случаях пермаллои применяются и при намагничивании переменным полем, а также в сложных случаях намагничивания: импульсного, одновременного действия постоянного и переменного полей и т. п.

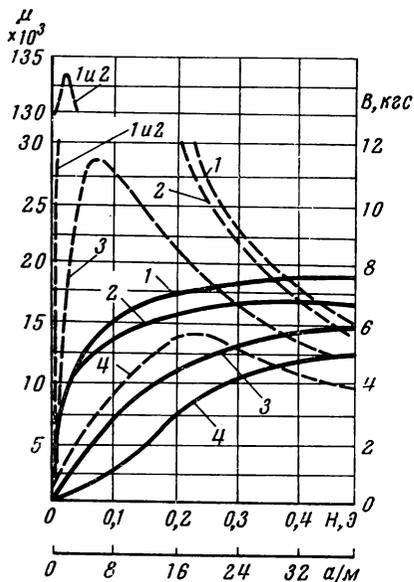


Рис. 36. Кривые намагничивания (сплошные линии) и магнитной проницаемости (пунктирные линии) в слабых полях для промышленных железоникелевых сплавов в листах различной толщины:

1 — сплав 79НМ, толщина листа 0,35—0,1 мм; 2 — сплав 80НХС, толщина листа 0,35—0,1 мм; 3 — сплав 50НХС, толщина листа 0,35—0,1 мм; 4 — сплав 50 НХС, толщина листа 0,05 мм

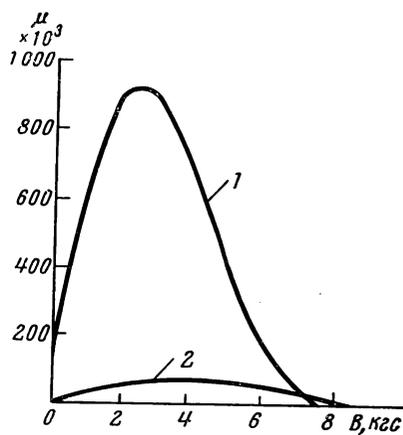


Рис. 37. Кривые проницаемости листового супермаллоя, толщина 0,35 мм. Для сравнения приведена кривая намагничивания пермаллоя 79НМ [Л. 2]: 1 — супермаллой; 2 — пермаллой 79НМ

Электромагнитные свойства для этих случаев существенно зависят от толщины пластин, удельного электросопротивления, частоты, однородности материала и других причин.

В задачу настоящей книги не входит рассмотрение этих вопросов. Отметим только, что с увеличением частоты магнитная проницаемость падает и тем скорее, чем выше было ее значение в постоянном поле.

При изменении частоты от 0 до 15000 гц при толщине листа 0,35 мм начальная проницаемость высоконикелевого (78% Ni) нелегированного пермаллоя падает в 40 раз, а низконикелевого

марки 45Н — всего в 6 раз \*. Для супермаллоя переход от постоянного поля к переменному полю частоты 50 гц связан со снижением начальной проницаемости на 25%, а максимальной почти на 70% (для ленты толщиной 0,15 мм).

Чем выше частота, тем более целесообразно применение низконикелевых пермаллоев тонкого проката.

Технологические вопросы применения пермаллоев рассмотрены в § 12.

Недостатками пермаллоев являются их относительно высокая стоимость (см. табл. 2), дефицитность отдельных компонентов, прежде всего никеля, необходимость проведения сложного отжига после механической обработки, а также большая зависимость магнитных свойств от механических воздействий.

Попытки найти заменители пермаллоев, свободные от указанных недостатков, привели к исследованию сплавов железо — алюминий без третьего или с третьим компонентом.

Примером тройного сплава такого рода является альсифер — сплав алюминия, кремния и железа. Альсифер получают как литой материал. Он нековок, обладает высокими твердостью и хрупкостью.

Сплав оптимального состава (9,6% Si и 5,4% Al) имеет следующие свойства:  $\mu_a = 35\,400$ ;  $\mu_{\max} = 117\,000$ ;  $H_c = 0,022$  э, т. е. не уступает пермаллоям [Л. 3].

Однако максимум магнитных свойств соответствует очень точному соблюдению состава, что может быть обеспечено только для лабораторных образцов. Промышленный альсифер имеет средние значения начальной проницаемости  $\mu_a = 6000—7000$  (после отжига), т. е. значительно более низкие, чем оптимальное.

Вследствие хрупкости альсифера толщина стенок должна быть не менее 1—2 мм, что ввиду малого электрического сопротивления изделия полностью исключает возможность применения отливок из альсифера в цепях переменного тока даже с частотой 50 гц.

Альсифер благодаря хорошей размольности применяют главным образом в качестве ферромагнитной фазы магнитодиэлектриков (см. § 15).

К двойным сплавам алюминий — железо относятся, например, алфенол (16% Al) и терменол (16% Al, 3% Mo). По магнитным свойствам они не уступают низконикелевым пермаллоям и даже в некоторых отношениях превосходят их, но высокое содержание алюминия обуславливает значительные технологические трудности из-за хрупкости сплавов.

Все же алфенол удается изготавливать в виде лент толщиной

---

\* Селицкий Я. П. и Матвеев Г. А. Магнитная проницаемость некоторых материалов в слабых полях звуковой и надзвуковой частоты. «Электричество». 1948, № 9.

до 0,1 мм, что позволяет использовать его, например, в магнитных головках для звукозаписи, где весьма важным требованием является высокая устойчивость материала к истиранию.

Из отечественных материалов этой группы можно указать сплав марки 16ЮХ, который отличается от алфенола тем, что содержит хром, улучшающий пластичность. Для 16ЮХ  $\mu_a = 15\,000$ ,  $\mu_{\max} = 140\,000$ , удельное сопротивление в три раза больше, чем у молибденового пермаллоя.

## § 12. НЕКОТОРЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ, СВЯЗАННЫЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ И ПЕРМАЛЛОЕВ

Основными технологическими операциями, выполняемыми при изготовлении магнитопроводов из лент или листов являются: резка ленты или штамповка пластин, электроизоляция витков или пластин между собой, навивка сердечников или сборка пакетов.

Во всех случаях применения пермаллоев обязательным является отжиг после механической обработки. Для электротехнических сталей отжиг также желателен, особенно если требуется получить высокие значения проницаемости в слабых и в средних полях.

Рассмотрим основные вопросы технологии производства ленточных и шихтованных сборных сердечников.

Ленточные сердечники изготовляют из ленты толщиной 0,02—0,35 мм, нарезанной из рулона пермаллоя или текстурованной электротехнической стали.

Лента навивается в спираль, при этом витки ее изолируются между собой тонким слоем изоляционного покрытия — нитроцеллюлозной эмали, окиси магния, окиси алюминия (алунда) и др.

Далее производится термическая обработка и укладка сердечников в защитные каркасы, на которые накладываются обмотки. Защитный каркас предохраняет сердечник от воздействия на него механических нагрузок, возникающих при наложении обмоток, ударах, тряске, вибрациях и т. п. Отсутствие каркаса могло бы вызвать существенное снижение магнитных свойств. На рис. 24 были показаны различные типы ленточных сердечников.

Неразрезные сердечники (сплошные) обладают более высокими магнитными свойствами и дешевле, чем разрезные. При самой тщательной шлифовке торцов индукция в разрезных сердечниках на 20—30% ниже, чем в сплошных. Зато выполнение обмоток значительно сложнее и дороже для сплошных сердечников.

Разрезные сердечники изготовляют или из сплошных, разрезая их, или методом гибки и прессования. Последний метод состоит в том, что из ленты нарезают пластины различной длины,

которые подвергают далее гибке и опрессовке по форме сердечника. Первый метод применяют чаще.

В настоящее время для навивки ленточных сердечников используют специальные установки. Неотожженная лента из пермаллоя (обычно толщиной от 0,02 до 0,35 мм) предварительно разрезается прецизионными роликовыми ножницами на необходимую ширину (высоту сердечника). Установка для навивки выполняет следующие операции: снимает заусенцы с краев ленты, обезжиривает и протирает ленту, наносит изоляционное покрытие и навивает сердечник необходимых размеров. Концы ленты закрепляются, например, точечной сваркой.

Одним из важных вопросов процесса изготовления витых сердечников является выбор необходимого натяга ленты в процессе навивки.

Оптимальная величина натяжения  $P$  ленты зависит от ее ширины  $b$  и толщины  $d$  и может быть определена с помощью номограммы, изображенной на рис. 38. Чрезмерное увеличение натяга вызывает ухудшение магнитных свойств и уменьшение электрического сопротивления. Слабый натяг не обеспечивает высокий коэффициент заполнения и снижает механическую прочность сердечника.

После навивки сердечники поступают на отжиг.

В настоящее время применяют в основном три вида отжига: в защитных ящиках (контейнерах), в водороде и в вакууме.

**Отжиг в контейнерах** является технологически наиболее простым. При таком отжиге изделия загружают в ящик, сваренный из листов жароупорной стали толщиной в 4—6 мм. Свободное пространство заполняется чистым кварцевым песком или тонко размолотым асбестом.

Ящик имеет две крышки, промежуток между которыми заполняется чугунной стружкой или стружкой из технически чистого железа для предотвращения окисления деталей. Ящик герметизируется жароупорной глиной.

Режим отжига зависит от марки материала и формы изделий и каждый раз должен подбираться опытным путем.

Для электротехнических сталей ориентировочно можно рекомендовать следующий режим: нагрев до 720—780° С, выдержку при этой температуре в течение 1—1,5 ч, охлаждение до 200—

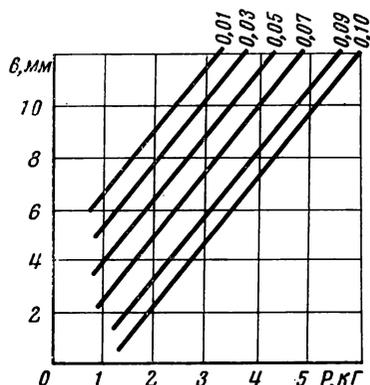


Рис. 38. Номограмма для определения усилия натяжения ленты при навивке ленточных сердечников [Л. 19]

250° С со скоростью около 50° С в час. После этого изделия могут быть вынуты из ящика.

Регулируя величину заполнения свободного пространства в ящике, получают изделия с различной толщиной оксидной пленки, которую можно использовать в качестве электрической изоляции между пластинами.

Для пермаллоев отжиг в контейнере не может обеспечить высокие магнитные свойства.

**Отжиг в атмосфере водорода.** Технологически этот вид отжига является наиболее дорогим и сложным. Он требует специальной печи и установки для очистки и осушки технического водорода. Известно также, что водород является взрывоопасным. По этим причинам он применяется сравнительно редко.

**Отжиг в вакууме.** Этот вид отжига проще, чем отжиг в водороде, и находит широкое применение. Он производится в контейнерах при вакууме  $10^{-2}$ — $10^{-4}$  мм рт. ст.

До настоящего времени вопрос о том, какой вид отжига (водородный или вакуумный) обеспечивает получение наиболее высоких магнитных свойств, не является вполне ясным.

Некоторые исследователи считают, что отжиг в водороде, особенно для пермаллоев, малоэффективен [Л. 25].

Теоретическое объяснение этого положения заключается в следующем. В процессе плавки материал насыщается водородом, кислородом и другими газами, часть которых остается в металле после его затвердевания.

Отжиг в водороде не обеспечивает полного удаления газовой составляющей из сплава.

При вакуумном же отжиге происходит дегазация металла и повышение его магнитных свойств.

Качество материала зависит от степени разряжения при отжиге. Например, содержание водорода в сплаве 79НМ после отжига при температуре 1100° С с повышением степени вакуумирования от  $10^{-2}$  до  $10^{-3}$  мм рт. ст. уменьшается более чем в три раза.

Характер подъема температуры существенного влияния на качество отжига не оказывает.

Необходимые значения максимальной температуры и времени отжига устанавливают экспериментально, в зависимости от марки сплава, размеров и формы изделий.

Повышение температуры сверх определенной величины \* хотя и способствует дальнейшей дегазации, но приводит к ухудшению магнитных свойств. Предполагают, что это происходит вследствие изменения химического состава за счет улетучивания никеля.

Время выдержки при максимальной температуре имеет опти-

---

\* Например, для сплавов 79НМ и 80НХС выше 1100° С [Л. 25].

мальное значение, отклонение от которого вызывает ухудшение магнитных свойств.

Скорость охлаждения существенно влияет на магнитные свойства. Каждый раз ее необходимо устанавливать экспериментально. Для регулирования скорости охлаждения применяют охлаждение с печью, в контейнере на воздухе, в контейнере в воде и другие методы.

В некоторых случаях магнитные свойства повышаются в результате применения при отжиге активных покрытий, способствующих удалению из материала углерода, серы и т. п. Наибольший эффект при этом дает углекислый барий.

Результаты отжига улучшаются также за счет припудривания изделий неактивными покрытиями ( $MgO$ ,  $Al_2O_3$  и др.), которые облегчают удаление газообразных продуктов рафинировки.

В качестве примеров, применяемых в технике режимов отжига различных марок пермаллоев, приведем следующие данные [Л. 25].

Отжиг вакуумный с разряжением  $10^{-3}$ — $10^{-4}$  мм рт. ст.

Для сердечников из сплава 79 НМ: нагрев до  $950$ — $1000^\circ C$ , выдержка при этой температуре в течение 3—4 ч, охлаждение до  $400^\circ C$  со скоростью  $100^\circ C$  в час и последующее охлаждение изделий в контейнере в воде.

Для сердечников из текстурованной электротехнической стали: нагрев отожженной на заводе ленты до  $1150^\circ C$ , выдержка в течение 4 ч, охлаждение до  $300^\circ C$  со скоростью  $50^\circ C$  в час и дальнейшее охлаждение на воздухе.

После термической обработки сердечник 1 укладывают в защитный каркас 2 из пластмассы, дюралюминия, пресспорошков и т. п. (рис. 39). Пространство между сердечником и стенками каркаса заполняется маслом или эластичными смазками, например смазкой типа ЦИАТИМ-201.

Шихтованные сердечники изготовляют обычно из изотропных магнитных материалов — горячекатаных или малотекстурованных сталей, а также из пермаллоев.

Штамповка пластин осуществляется на прессах. При этом происходит значительное ухудшение магнитных свойств на расстоянии  $0,5$ — $4,0$  мм от контура пластины. Степень ухудшения свойств зависит от многих причин: марки материала, толщины листа, зазора между матрицей и пуансоном и т. п. Чем меньше по размерам и ажурнее пластина, тем значительнее потеря магнитных свойств и, следовательно, тем более необходим отжиг для снятия напряжений.

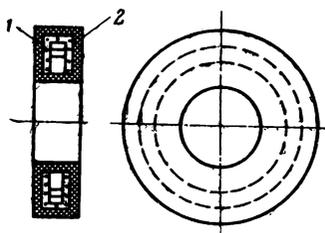


Рис. 39. Ленточный сердечник в защитном каркасе

При вырубке пластины возможно образование заусенцев, которые снимают абразивным кругом.

Качество сердечника в значительной степени определяется величиной коэффициента заполнения.

Рассмотрим, как изменятся напряженность намагничивающего поля  $H$  и полные потери  $P$  для заданных значений магнитной индукции  $B$  при неизменном объеме сердечника из стали Э31 в результате уменьшения коэффициента заполнения от 0,95 до 0,85\*. Данные подсчетов сведены в табл. 11.

Анализ табл. 11 показывает, что при уменьшении коэффициента заполнения напряженность поля увеличивается на 10; 53; 290 и 300% для получения соответствующих индукций, причем потери возрастают на 12%.

Таблица 11

Свойства сердечника из стали Э31 для двух значений коэффициента заполнения [Л. 3]

Коэффициент заполнения							
0,95				0,85			
$B$		$H, \text{ а/см}$	$P^* \text{ вт/кг}$	$B$		$H, \text{ а/см}$	$P^*_{0,85/0,95} \text{ вт/кг}$
$гс$	$тл$			$гс$	$тл$		
5000	0,5	0,72	0,5	5600	0,56	0,8	0,57
10 000	1,0	2,1	2,0	11 000	1,1	3,2	2,55
15 000	1,5	18,4	4,2	16 000	1,68	72	4,75
20 000	2,0	320	8,0	22 400	2,24	1280	9,0

\* При подсчетах было принято, что полные потери пропорциональны квадрату индукции.

Практически коэффициент заполнения изменяется от 0,8 до 0,97. Он будет тем выше, чем ровнее поверхность пластин, меньше их изогнутость, тоньше слой изоляции и больше сжатие пакета.

Для уменьшения изогнутости пластины после штамповки и снятия заусенцев часто подвергают рихтовке, после чего они поступают на отжиг.

Если отжиг производится в закрытых контейнерах, а не в вакууме или в атмосфере водорода и сопровождается образованием пленки окиси, то при пониженных требованиях к сопротивлению изоляции дополнительное покрытие поверхности пластины изоляционным слоем не требуется. В противном случае на пластины наносится слой изоляции химическим способом, например фос-

\* Пример заимствован из [Л. 3].

фатная пленка, или путем покрытия поверхности нитролаком. Толщина пленки обычно не превышает 5—15 мк.

Далее пластины поступают на сборку. Собранный пакет должен обеспечить наивысший коэффициент заполнения без нарушения изоляции и снижения магнитных свойств.

Оптимальные условия лучше всего выбирать экспериментально, измеряя сопротивление изоляции между пластинами, коэффициент заполнения и потери в сердечниках в функции от сжатия пакета.

### § 13. МАГНИТНОМЯГКИЕ ФЕРРИТЫ

К магнитномягким ферритам относятся в первую очередь никельцинковые и марганеццинковые. В табл. 2 были приведены ориентировочные характеристики этих групп ферритов. Находят также применение, особенно в области высоких частот, литийцинковые, свинцовоникелевые и некоторые другие типы ферритов.

Магнитномягкие ферриты в настоящее время применяют в качестве сердечников различного рода трансформаторов, катушек индуктивности фильтров, контуров, магнитных антенн; статоров и роторов высокочастотных моторчиков, деталей отклоняющих систем телевизионной аппаратуры и т. п. Все эти области применения относятся к высокочастотной и импульсной технике. В постоянных полях и в полях промышленной частоты магнитномягкие ферриты не применяют.

Стандарт на ферриты пока еще не разработан. Наиболее принятое условное обозначение марок магнитномягких ферритов следующее. Стоящее впереди число соответствует номинальному значению начальной магнитной проницаемости, стоящие за ним буквы «Н» или «ВЧ» обозначают соответственно низкочастотные или высокочастотные материалы; далее идут буквы «М» или «Н». Первая буква означает марганеццинковый феррит, вторая — никельцинковый, литийцинковый или другие ферриты. Для некоторых марок после указанных обозначений имеется еще цифра «1» или «2», что свидетельствует о некотором улучшении тех или иных свойств. Отметим также, что для различных марок ферритов особо оговариваются условия (значения частоты и напряженности поля), при которых определена начальная проницаемость.

**Пример.** «3000 НМ» обозначает марганеццинковый феррит, предназначенный для работы в области низких частот с номинальным значением начальной проницаемости  $\mu_a = 3000$ .

Пока еще находят применение и другие условные обозначения марок ферритов, например Ф-2000 (никельцинковый феррит с  $\mu_a = 2000$ ), ФМ-1000 (марганеццинковый феррит с  $\mu_a = 1000$ ) и др.

Как указывалось выше, ферриты не применяют в постоянных полях, однако при описании свойств различных марок часто приводят данные об их статических характеристиках. Это объясняется тем, что, во-первых, магнитные измерения в постоянных полях являются наиболее точными и, во-вторых, статические характе-

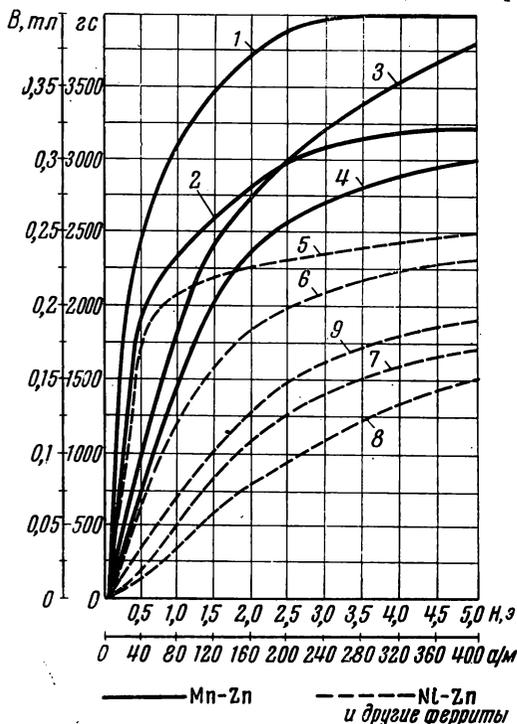


Рис. 40. Статические характеристики  $B = f(H)$  для некоторых марок ферритов:

1 — 4000НМ; 2 — 3000НМ; 3 — 2000НМ; 4 — 1000НМ; 5 — 2000НН; 6 — 600НН; 7 — 400НН; 8 — 200НН; 9 — 20ВЧ

ристы позволяют оценить собственно магнитные (а не электромагнитные) свойства материала, так как такие явления, как магнитная вязкость, вихревые токи и другие, при измерениях свойств в постоянных полях исключаются.

На рис. 40 приведены статические кривые намагничивания для некоторых марок ферритов, а в табл. 12 даны параметры петли гистерезиса. Из таблицы видно, что ферриты обладают низкой индукцией насыщения по сравнению с металлическими магнитными материалами, поэтому в сильных полях применять их невыгодно. Однако следует учесть, что в переменных полях высокой частоты ферриты благодаря практическому отсутствию размагничивающе-

го действия вихревых токов могут иметь более высокое значение индукции, чем металлические материалы.

В переменных полях обычно для ферритов, кроме начальной магнитной проницаемости, измеренной на высокой частоте (см. § 31), указывают тангенс угла потерь  $\operatorname{tg} \delta$  (или приведенный тангенс угла потерь  $\operatorname{tg} \delta / \mu_a$ ), граничную частоту  $f_{\text{гр}}$ , относительный температурный коэффициент начальной магнитной проницаемости  $\alpha_{\mu_a}$ , рабочую температуру  $t_p$ , обратимую магнитную проницаемость  $\mu_r$  при заданных условиях и некоторые другие параметры.

Таблица 12

## Параметры петли гистерезиса некоторых марок ферритов \*

Марка материала	Параметры петли гистерезиса							
	Максимальное поле $H_{max}$		Максимальная индукция $B_{max}$		Остаточная индукция $B_r$		Коэрцитивная сила $H_c$	
	э	а/м	гс	тл	гс	тл	э	а/м
4000НМ	10	800	4000	0,4	1300	0,13	0,1	8
3000НМ	10	800	3800	0,38	1500	0,15	0,15	12
2000НМ								
2000НМ1	10	800	3800	0,38	1400	0,14	0,2	16
2000НМ2								
1000НМ								
1000НМ1	10	800	3500	0,35	1100	0,11	0,35	28
1000НМ2								
2000НН	10	800	2500	0,25	1200	0,12	0,1	8
600НН	10	800	3100	0,31	1400	0,14	0,4	32
400НН	10	800	2300	0,23	1200	0,12	0,8	64
200НН	30	2400	1800	0,18	1000	0,10	1,5	120
100НН	100	8000	4100	0,41	1900	0,19	0,62	50
100НН1	90	7200	3450	0,345	1000	0,10	1,54	123
60ВЧ	90	7200	2450	0,245	1800	0,18	6,55	520
50ВЧ	100	8000	3800	0,38	1850	0,185	1,8	144
30ВЧ	90	7200	2250	0,225	1800	0,18	6,55	520
20ВЧ	90	7200	1900	0,19	900	0,09	12	96
10ВЧ	190	15 200	2100	0,21	1330	0,133	11,9	95
5ВЧ	100	8000	2200	0,22	200	0,02	20	1600

\* Точные значения соответствуют системе единиц СГСМ, в системе СИ они округлены.

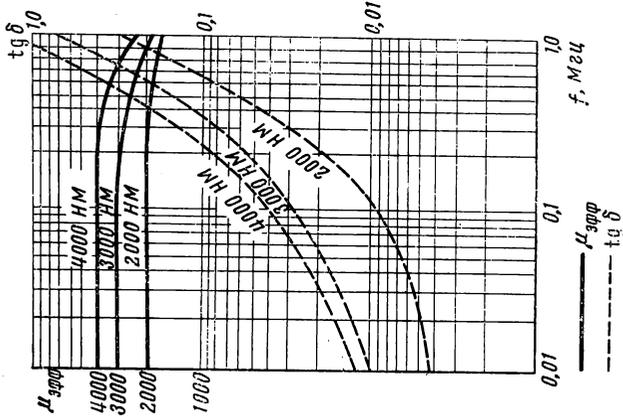


Рис. 42. Зависимость тангенса угла потерь  $\text{tg } \delta$  и эффективной магнитной проницаемости  $\mu_{эфф}$  марганецникобых ферритов от частоты ( $H = 5 \text{ мэ}$ )

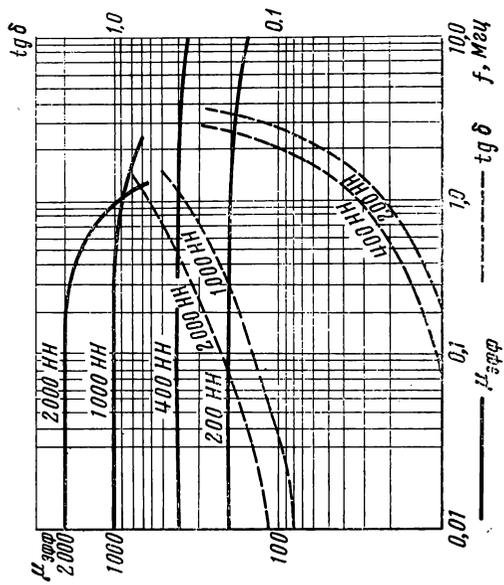


Рис. 41. Зависимость тангенса угла потерь  $\text{tg } \delta$  и эффективной магнитной проницаемости  $\mu_{эфф}$  никельцинковых ферритов от частоты ( $H = 5 \text{ мэ}$ )

Большой интерес представляют также зависимости тангенса угла потерь и проницаемости от частоты и от амплитуды переменного поля, а также зависимости обратимой проницаемости от напряженности подмагничивающего поля и различного рода температурные зависимости.

Рассмотрим эти вопросы несколько подробнее.

**Тангенс угла потерь  $\operatorname{tg} \delta$  и граничная частота  $f_{\text{гр}}$ .** Экспериментально было установлено, что в некоторой области изменения поля от нуля и выше (область Релея, определяемая обычно миллиэрстедами) выражение для общего тангенса угла потерь в зависимости от  $f$  и  $H$  может быть представлено следующим образом:

$$\operatorname{tg} \delta = \delta_n + \delta_f f + \delta_h H, \quad (43)$$

где коэффициенты  $\delta_n$ ,  $\delta_f$ ,  $\delta_h$  характеризуют собой потери соответственно на последствие (магнитную вязкость); потери на вихревые токи, отнесенные к единице частоты, и потери на гистерезис, отнесенные к единице напряженности поля.

Для ферритов составляющая потерь на вихревые токи практически ничтожно мала и ею можно пренебречь. В области очень слабых полей незначительными являются и потери на гистерезис. Следовательно, в области Релея в основном потери определяются магнитной вязкостью и возрастают с ростом частоты. Однако при повышении частоты  $\operatorname{tg} \delta$ , начиная от некоторого определенного для каждой марки феррита значения, возрастает значительно быстрее, чем это показывает уравнение (43). Одновременно резко уменьшается магнитная проницаемость, что иллюстрируется изображенными на рис. 41 и 42 зависимостями  $\operatorname{tg} \delta = \varphi(f)$  и  $\mu_{\text{эфф}}^* = \Psi(f)$  соответственно для никельцинковых и марганеццинковых ферритов. Частота, при которой начинается резкое возрастание угла потерь, называется *граничной частотой*  $f_{\text{гр}}$ . Для определенности принято считать граничной частотой такую, при которой  $\operatorname{tg} \delta = 0,1$ . Причины резкого возрастания потерь и уменьшения проницаемости с частотой весьма сложные и объясняются главным образом резонансными явлениями. Установлено, что чем выше начальная проницаемость, тем меньше граничная частота (см. рис. 40 и 41).

Во многих случаях вместо  $\operatorname{tg} \delta$  удобнее пользоваться понятием приведенного тангенса угла потерь.

Величины  $\operatorname{tg} \delta / \mu_a$  и  $f_{\text{гр}}$  для различных марок ферритов указаны в табл. 13.

На рис. 43 и 44 приведены зависимости  $\operatorname{tg} \delta$  и  $\mu_{\text{эфф}}$  от амплитуды переменного поля для никельцинковых и марганеццинко-

---

\* Эффективной (действующей) магнитной проницаемостью  $\mu_{\text{эфф}}$  называется отношение эффективных (действующих) значений магнитной индукции и напряженности магнитного поля.

вых ферритов. Эти зависимости показывают, что, чем выше начальная проницаемость, тем больше зависимость проницаемости от амплитуды поля. Например, при изменении поля от 0,5 до 0,1 э проницаемость феррита марки 200НН возрастает на 18%, а для ферритов с проницаемостью меньше 600 изменения практически отсутствуют, что является их достоинством. С увеличением амплитуды поля возрастают  $\operatorname{tg} \delta$  и нелинейные искажения, вызываемые гистерезисными явлениями.

**Относительный температурный коэффициент магнитной проницаемости  $\alpha_\mu$  и рабочая температура  $t_p$ .** Большая зависимость свойств ферритов от температуры по сравнению с другими высокочастотными магнитными материалами, в первую очередь по сравнению с магнитодиэлектриками (см. § 15), объясняется низкой точкой Кюри ферритов. Например, для высокопроницаемых никельцинковых ферритов  $\Theta$  меньше  $100^\circ\text{C}$ . В то же время известно, что при температурах ниже точки Кюри, но близких к ней, имеют место значительные изменения проницаемости и других магнитных свойств. Зависимости  $\mu_a = f(t)$  для никельцинковых ферритов представлены на рис. 45, а для марганеццинковых — на рис. 46.

Для оценки температурных изменений проницаемости пользуются температурным коэффициентом проницаемости  $TK_\mu$ , который для заданного диапазона температур ( $t_2 - t_1$ ) определяет ся по формуле\*

$$TK_\mu = \frac{\mu_{t_2} - \mu_{t_1}}{\mu_{t_1} (t_2 - t_1)}, \quad (44)$$

и относительным температурным коэффициентом магнитной проницаемости  $\alpha_\mu$ , определяемым из выражения:

$$\alpha_\mu = \frac{TK_\mu}{\mu_{t_1}} = \frac{\mu_{t_2} - \mu_{t_1}}{\mu_{t_1}^2 (t_2 - t_1)}. \quad (45)$$

При этом в выражения (44) и (45) можно подставлять различные значения  $\mu$ . Например, начальную, максимальную, обратимую и т. п.

Значения  $\alpha_{\mu_a}$  для разных марок ферритов приведены в табл. 13. Из рассмотрения данных таблицы видно, что наиболее благоприятную температурную характеристику проницаемости имеют марганеццинковые ферриты, температурные свойства всех других типов ферритов значительно хуже. Для уменьшения  $\alpha_\mu$  используют технологические и конструктивные методы. Технологический метод состоит в том, что, как показали исследования, небольшие добавки некоторых веществ (например, таких, как  $\text{CoO}$ ) благоприятно действуют на температурные свойства ферритов. Кон-

\* Аналогичным путем вводят понятия температурного коэффициента магнитной индукции, коэрцитивной силы и т. п.

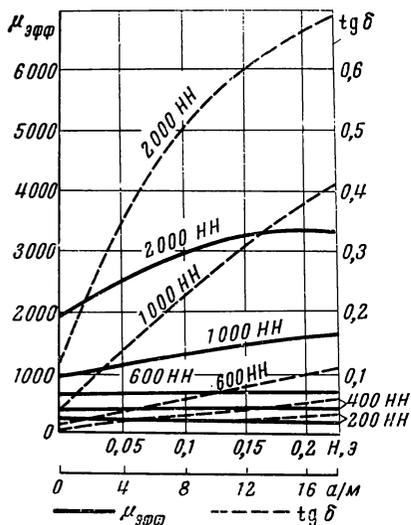


Рис. 43. Зависимость эффективной магнитной проницаемости  $\mu_{эфф}$  и тангенса угла потерь  $\text{tg } \delta$  никельцинковых ферритов от амплитуды переменного поля (при  $f = 100 \text{ кгц}$ )

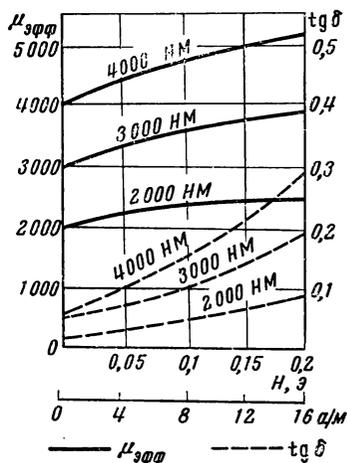


Рис. 44. Зависимость эффективной магнитной проницаемости  $\mu_{эфф}$  и тангенса угла потерь  $\text{tg } \delta$  марганеццинковых ферритов от амплитуды переменного поля (при  $f = 100 \text{ кгц}$ )

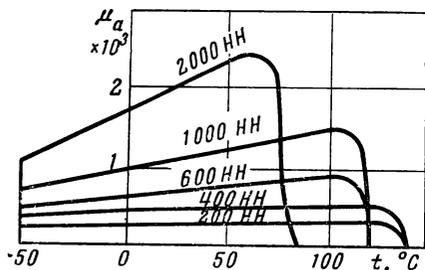


Рис. 45. Зависимость начальной магнитной проницаемости никельцинковых ферритов от температуры

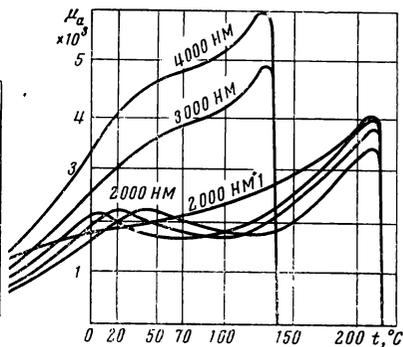


Рис. 46. Зависимость начальной магнитной проницаемости марганеццинковых ферритов от температуры (для марки 2000НМ приведены три кривые, показывающие возможный разброс  $\mu_a$ )

структивный метод заключается во введении в магнитную цепь воздушного зазора. При этом суммарный температурный коэффициент всей цепи уменьшается, однако это сопровождается также падением магнитной проницаемости. В первом приближении можно считать, что  $\alpha_\mu$  и  $\mu$  уменьшаются пропорционально друг другу.

**Рабочей температурой**  $t_p$  называют такую температуру, при которой проницаемость составляет 80% от номинального значения при 20° С. Рабочая температура для разных марок ферритов указана в табл. 13.

**Зависимость обратной магнитной проницаемости  $\mu_r^*$  от напряженности подмагничивающего поля.** Для ферритов характерна большая зависимость обратной магнитной проницаемости  $\mu_r$  от напряженности магнитного поля (рис. 47 и 48), что объясняется незначительным действием вихревых токов. Эти зависимости остаются неизменными для широкого диапазона частот, что позволяет, например, применять ферриты в схемах дистанционной настройки. Отметим, что применение в подобных устройст-

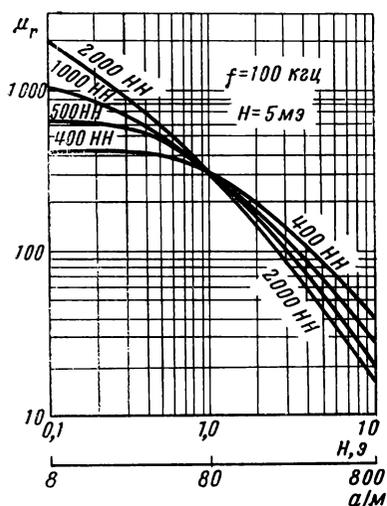


Рис. 47. Зависимость обратной магнитной проницаемости  $\mu_r$  никельцинковых ферритов от напряженности подмагничивающего поля

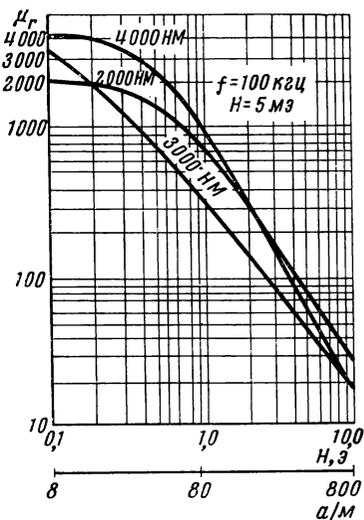


Рис. 48. Зависимость обратной магнитной проницаемости  $\mu_r$  марганеццинковых ферритов от напряженности подмагничивающего поля

\* Обратимая проницаемость определяется для фиксированного значения постоянного поля из выражения  $\mu_r = \frac{\Delta B}{\Delta H}$  (при  $\Delta H \rightarrow 0$ ).

Таблица 13

## Марки магнитномягких ферритов и их основные параметры

Марка ферритов	Начальная магнитная проницаемость $\mu_a$	Относительный температурный коэффициент начальной магнитной проницаемости		Приведенный тангенс угла потерь		Граничная частота $f_{гр}$	Рабочая температура $t_p$	Удельное сопротивление $\rho$
		$\alpha_{\mu_a} \times 10^6$	в интервале температур °C	$\text{tg}^2 \delta_p \times 10^6$ при напряженности $H=100$ (0,8 а/м)	При частоте $f$			
4000HM	4000 <sup>+800</sup> <sub>-500</sub>	2*	от + 20 до + 60	35	60	0,2	110	50
3000HM	3000 <sup>±500</sup>	3*	от + 20 до + 60	25	60	0,3	110	50
2000HM	2000 <sup>+500</sup> <sub>-300</sub>	±1,5*	от + 20 до + 60	15	45	0,6	180	50
2000HM1	2000 <sup>+500</sup> <sub>-300</sub>	0,8	от + 20 до + 70	15	45	0,6	180	50
		0,6	от + 20 до + 50	15	45	0,6	180	50
		0,8	от + 20 до - 10	15	45	0,6	180	50
2000HM2	2000 <sup>+500</sup> <sub>-300</sub>	±0,6	от + 20 до + 60	5	20	0,6	180	50
1500HM	1500 <sup>+200</sup> <sub>-300</sub>	±1,5*	от + 20 до + 60	15	40	0,8	180	—
1500HM1	1500 <sup>+200</sup> <sub>-300</sub>	0,8	от + 20 до + 70	15	40	0,8	180	—
		0,6	от + 20 до + 50	15	40	0,8	180	—
		0,8	от + 20 до - 10	15	40	0,8	180	—
1500HM2	1500 <sup>+200</sup> <sub>-300</sub>	±0,6	от + 20 до + 60	5	15	1,0	180	—
1000HM	1000 <sup>±200</sup>	±1,5*	от + 20 до + 60	15	30	1,0	180	50
2000HN	2000 <sup>+400</sup> <sub>-200</sub>	3*	от + 20 до + 60	100	300	0,2	70	10 <sup>9</sup>

Продолжение табл. 13

Марка ферритов	Начальная магнитная проницаемость $\mu_a$	Относительный температурный коэффициент начальной магнитной проницаемости		Приведенный тангенс угла потерь			Граничная частота $f_{гр}$	Рабочая температура $t_p$	Удельное сопротивление
		$\alpha \times 10^6$	в интервале температур	$\operatorname{tg} \delta \mu_a \times 10^6$	При частоте $f$				
					при напряженности $H=100$ $\frac{Мэ}{(0,8 \text{ а/м})}$	не более			
600НН	$600^{+200}_{-100}$	6*	от + 20 до + 60	25	125	1,0	110	$10^4$	
400НН	$400^{+100}_{-50}$	5*	от + 20 до + 60	20	50	2,0	120	$10^5$	
200НН	$200^{+50}_{-70}$	4*	от + 20 до + 60	30	65	3,0	120	$10^5$	
200НН1	$200+20$	25*	от + 20 до + 100	80	—	11	20,0	300	
100НН	$100^{+30}_{-10}$	30	от + 20 до + 100	24	—	1	40,0	300	
100НН1	$100^{+30}_{-15}$	10	от - 60 до + 125	170	—	1	—	$3,6 \cdot 10^7$	
60ВЧ	$60^{+12}_{-9}$	$\pm 16,7$	от - 60 до + 125	160	—	2,5	—	$6,6 \cdot 10^8$	
50ВЧ	$50^{+10}_{-5}$	50	от + 20 до + 100	120	—	25	60,0	350	
30ВЧ	$30^{+6}_{-4,5}$	$\pm 17$	от - 60 до + 125	300	—	5	—	$6,9 \cdot 10^8$	
20ВЧ	$20^{+8}_{-2}$	$\pm 2,2$	от + 20 до + 60	220	—	5	100	450	
13ВЧ	$13 \pm 2$	30	от + 20 до + 100	335	—	70	180	450	
13ВЧ1	$13 \pm 2$	$\pm 10$	от + 20 до + 100	460	—	100	150	450	
10ВЧ	$10^{+4}_{-1,5}$	$\pm 50$	от - 60 до + 125	900	—	10	—	$4,6 \cdot 10^8$	
5ВЧ	$5 \pm 0,5$	60	от + 20 до + 100	1250	—	100	300	450	

\* Величины даны для справок.

вах других высокочастотных магнитных материалов — металлических или магнитодиэлектриков — практически исключается. Это объясняется тем, что для магнитодиэлектриков  $\mu_r \approx \text{const}$ , а для металлических материалов, кроме малой зависимости  $\mu_r$  от постоянного поля (приблизительно в 100 раз меньшей, чем для ферритов), характеристики различны для разных частот.

В электрическом отношении ферриты являются полупроводниками. Удельное сопротивление  $\rho$ , измеренное на постоянном токе, для различных марок ферритов приведено в табл. 13. Данные таблицы показывают, что  $\rho$  марганеццинковых ферритов значительно меньше, чем для всех других. Это приводит к уменьшению  $f_{гр}$  и ограничивает частотный диапазон применения марганеццинковых ферритов несколькими мегагерцами.

Исследования показали, что в переменных полях проводимость ферритов определяется не только величиной  $\rho$  (токами проводимости), но также и токами смещения\*. Выражение для эффективной проводимости  $\gamma_{эфф}$ , учитывающей оба вида токов, имеет вид:

$$\gamma_{эфф} = \gamma + \epsilon_0 \epsilon'' \omega, \quad (46)$$

где  $\gamma$  — удельная проводимость в постоянных полях;  
 $\epsilon''$  — мнимая часть диэлектрической проницаемости;  
 $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума;  
 $\omega$  — угловая частота.

Из выражения следует, что  $\gamma_{эфф}$  возрастает с частотой. Для некоторых ферритов при  $f = 10 \text{ Мгц}$   $\gamma_{эфф}$  в 5—10 раз больше, чем  $\gamma$ . С увеличением температуры электропроводность ферритов увеличивается.

Кроме рассмотренных выше свойств, практический интерес представляют вопросы стабильности магнитных свойств ферритов во времени. Установлено, что с течением времени проницаемость ферритов падает. Это уменьшение резко зависит от состава и условий спекания, а также от температуры образца. Ориентировочно можно считать, что начальная магнитная проницаемость замкнутого магнитопровода в течение первого года после изготовления феррита падает на 3%. Дальнейшие изменения незначительны. Для улучшения временной стабильности некоторых ферритов, в первую очередь марганеццинковых, рекомендуют после их изготовления искусственную стабилизацию, которая состоит в проведении температурных циклов с определенными нагревом и выдержкой.

В заключение отметим некоторые особенности различных марок ферритов.

Существенными преимуществами марганеццинковых ферри-

\* Polder D., The Proc. of the Inst. of Elect. Eng., p. 2, v. 97, 1950, April, N. 56, p. 246.

тов по сравнению с никельцинковыми являются: в несколько раз меньшие потери на гистерезис, более высокая индукция и меньший температурный коэффициент магнитной проницаемости; недостатками — меньшее значение  $f_{гр}$ , что позволяет рассматривать марганеццинковые ферриты как низкочастотные (до нескольких мегагерц), а никельцинковые как высокочастотные (до сотен мегагерц).

Ферриты с высокой проницаемостью ( $\mu_a = 1000—2000$ ) при работе в слабых полях имеют преимущества (меньшие  $tg\delta$  и потери) перед низконикелевыми пермаллоями тонкого проката и электротехническими сталями.

Никельцинковые ферриты с проницаемостью  $\mu_a = 600—200$  находят применение на более высоких частотах и в больших полях, чем высокопроницаемые.

При жестких требованиях к величине нелинейных искажений марганеццинковые ферриты лучше никельцинковых, а в устройствах с подмагничиванием лучше никельцинковые.

Ферриты с проницаемостью в десятки единиц применяют в высокочастотной части спектра радиочастот (десятки и сотни мегагерц), где могут быть использованы также магнитоэлектрики. При решении вопроса о выборе материала в данном случае надо сравнить эти две группы (см. § 15).

Более конкретные рекомендации по выбору марки феррита можно получить лишь на основании расчетов по заданным техническим условиям (частотному диапазону, требованиям к температурной стабильности и т. п.) и справочным сведениям о феррите. В последнее время появилось много работ, посвященных этим вопросам\*.

Остановимся еще на конструкции деталей из магнитномягких ферритов.

Детали из ферритов могут быть изготовлены любой формы, которую позволяет керамическая технология (см. § 14). На рис. 49 показаны конструкции ферритовых сердечников катушек индуктивности, дросселей и трансформаторов. Каждая из изображенных на рис. 49 конструкций имеет несколько типов, различающихся размерами или их соотношениями. Наибольшее применение имеют кольцевые, броневые и Ш-образные сердечники.

Технические условия на кольцевые сердечники являются одновременно и техническими условиями на материалы. Преимуществом кольцевых сердечников является малое рассеяние магнитного потока, а недостатками — малая стабильность параметров, соответствующая стабильности материала, относительная сложность намотки и отсутствие возможности плавной регу-

---

\* См., например, Матвеев Г. А. и Хомич В. И. Катушки с ферритовыми сердечниками. Госэнергоиздат, 1962; Алпатов Н. И. Ферриты в электронных схемах. Воениздат, 1962.

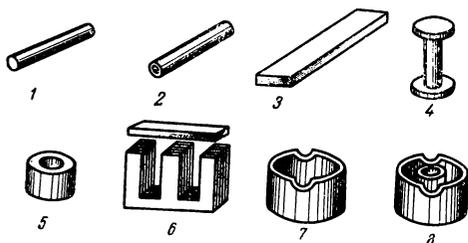


Рис. 49. Конструкции ферритовых сердечников:

1 — цилиндрический; 2 — трубчатый; 3 — пластинчатый; 4 — пулевидный; 5 — тороидальный; 6 — Ш-образный; 7 — чашечный; 8 — броневой

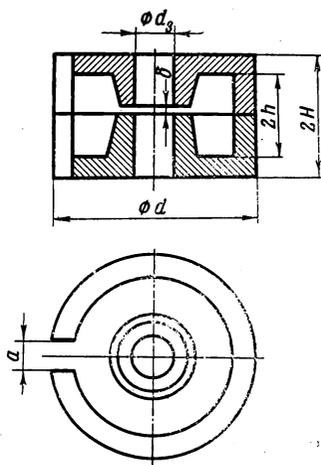


Рис. 50. Конструкция броневое сердечника

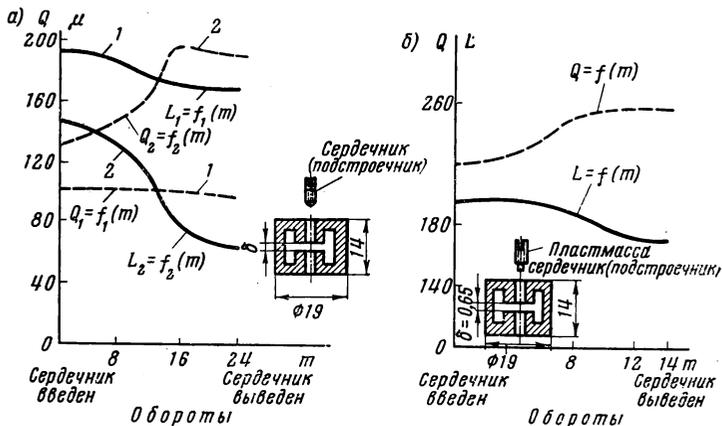


Рис. 51. Зависимости индуктивности и добротности катушки с броневым сердечником от перемещения подстроечника:

а — диаметр подстроечника близок к диаметру отверстия: 1 — сердечник без зазора ( $\delta=0$ ); 2 — сердечник с зазором ( $\delta=0,13$  мм); б — диаметр подстроечника много меньше диаметра отверстия

лировки индуктивности. Кольцевые сердечники выпускают обычно со следующими предельными размерами: наружный диаметр 2,5—125 мм, внутренний диаметр соответственно 1,0—80 мм, высота 0,8—18 мм.

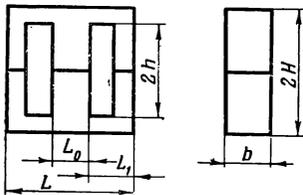


Рис. 52. Конструкция Ш-образного сердечника

Сердечник с воздушным зазором, например броневой, изображенный на рис. 50, выполняют обычно с зазором  $\delta$ . Зазор может быть образован в результате уменьшения высоты керна одной из двух чашек, составляющих сердечник. Величина  $\delta$  может иметь любое значение в пределах от 0 до  $h$  и задается потребителем при заказе.

В каждом отдельном случае оптимальные размеры зазора рассчитывают по заданным параметрам:  $TK_{\mu}$ , добротности  $Q$  и др. Броневой сердечник обычно имеет подстроечник — стержень из

Таблица 14

Размеры броневых ферритовых сердечников  
(обозначения соответствуют рис. 50)

Обозначение типоразмера сердечника	Б6	Б9	Б11	Б14	Б18	Б22	Б26	Б30	Б36	Б48
$d$ , мм	6,5	9	11	14	18	22	26	30	36	48
$d_3$ , мм	1,1	1,9	1,9	3,1	3,1	4,5	5,5	5,5	5,5	7,5
$2H$ , мм	5,6	5,6	6,4	8,4	10,6	13,6	16,4	19,0	22,0	31,4
$2h$ , мм	4	4	4,4	5,8	7,4	9,4	11,2	13,2	14,8	20,8
Длина магнитного пути $l_{\text{эфф}}$ , см	1,07	1,18	1,35	1,90	2,29	3,01	3,60	4,30	5,20	6,88
Сечение сердечника $S_{\text{эфф}}$ , см <sup>2</sup>	0,063	0,089	0,111	0,270	0,445	0,662	0,994	1,240	2,154	3,529
Объем сердечника $V_{\text{эфф}}$ , см <sup>3</sup>	0,068	0,105	0,150	0,514	1,019	1,990	3,582	5,327	11,20	24,26

феррита, входящий в центральное отверстие. Перемещая подстроечник, можно менять  $L(Q)$ . В зависимости от относительных размеров диаметров подстроечника и отверстия, а также от величины зазора  $\delta$ , характер и диапазон изменения  $L(Q)$  различны, что иллюстрируется на рис. 51. Размеры обычно применяемых броневых сердечников приведены в табл. 14.

Сердечники Ш-образные состоят из двух Ш-образных частей, сложенных шлифованными плоскостями (рис. 52). Они имеют очень широкое применение, так как отличаются простотой изготовления обмоток и сборки. Обычно устройства на Ш-образных сердечниках выполняют на большие мощности, чем на броневых сердечниках. Номинальные размеры имеющихся широкого применение Ш-образных сердечников приведены в табл. 15.

#### § 14. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ ФЕРРИТОВ И ПОЛУЧЕНИЕ МАГНИТНОМЯГКИХ ФЕРРИТОВ

Ферриты могут быть получены различными способами. Наиболее простым и распространенным методом в настоящее время является метод окислов, в котором в качестве исходных материалов используются окислы соответствующих металлов (см. общую схему изготовления ферритов).

После анализа исходных материалов на количество примесей, влажность и процентное содержание в них окислов для заданного состава феррита производится расчет составляющих шихты в весовых процентах.

Сырье развешивается и поступает на первый помол в вибромельницы\*, в которых сырье размельчается и тщательно перемешивается до получения однородной массы.

Далее производится предварительный обжиг при температуре на несколько сот градусов ниже температуры окончательного обжига. В результате получается полуспекшаяся масса с частичным или полным образованием феррита. Предварительный обжиг требуется также для уменьшения усадки изделия после формовки.

Второй помол должен обеспечить получение еще более измельченной и однородной массы, чем первый. Полученный таким образом порошок в дальнейшем непосредственно используется для получения изделий. В последнее время заводы радиотехнической промышленности начали получать подобные ферритовые порошки в готовом виде от химических предприятий.

Формование изделий из ферритов производится прессованием деталей в стальных формах, выдавливанием стержней, трубок

---

\* Можно применять шаровые мельницы, однако это значительно удлиняет процесс.

Размеры Ш-образных ферритов сердечников (обозначения соответствуют рис. 52)

Обозначение типа размера сердечника	Ш2,5×2,5	Ш3×3	Ш4×4	Ш5×5	Ш6×6	Ш7×7	Ш8×8	Ш10×10	Ш12×15	Ш16×20	Ш20×28
<i>L</i> , мм	10	12	16	20	24	30	32	36	42	54	65
<i>2H</i> , мм	10	12	16	20	24	30	32	36	42	54	65
<i>B</i> , мм	2,5	3	4	5	6	7	8	10	15	20	28
<i>L</i> <sub>0</sub> , мм	2,5	3	4	5	6	7	8	10	12	16	20
<i>L</i> <sub>1</sub> , мм	2	2,5	3,2	4	5	6	7,5	8	9	11	12
<i>2h</i> , мм	6,5	8	10,4	13	16	19	23	26	30	38	44
<i>I</i> <sub>эфф</sub> , см	2,1	2,6	3,4	4,1	5,2	6,3	7,4	8,4	9,7	12,3	14,4
<i>S</i> <sub>эфф</sub> , см <sup>2</sup>	0,07	0,10	0,19	0,30	0,43	0,61	0,69	1,0	1,8	3,4	5,7
<i>V</i> <sub>эфф</sub> , см <sup>3</sup>	0,16	0,28	0,66	1,3	2,2	3,9	5,1	8,4	17,4	41,4	82,8
Площадь окна <i>S</i> <sub>0</sub> , см <sup>2</sup>	0,13	0,20	0,33	0,52	0,80	1,2	1,7	2,1	2,7	4,2	5,3

через мунштук и значительно реже вытачиванием деталей из спрессованных сырых заготовок.

Во всех случаях для улучшения прессуемости в порошок вводятся пластифицирующие вещества. Наиболее часто для этой цели применяют водный раствор поливинилового спирта и декстрин (в массе для протяжки). После введения пластификатора масса тщательно перемешивается и поступает на формовку.

Формование изделий производится на гидравлических автоматических или полуавтоматических прессах при давлении до  $2 \text{ T/cm}^2$ .

Заключительной и ответственной технологической операцией, от которой в значительной степени зависит качество ферритовых изделий, является окончательный обжиг (спекание изделий). В процессе окончательного обжига происходит спекание изделий (образование черепка) и заканчивается процесс ферритизации.

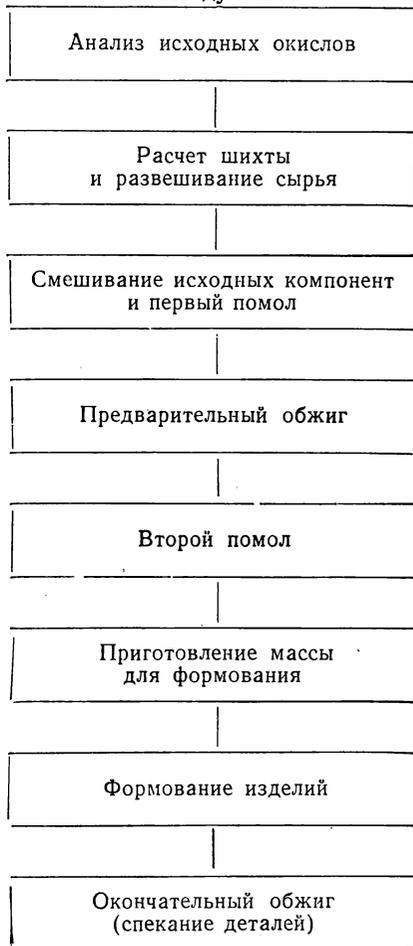
Несмотря на кажущуюся простоту рассмотренного технологического процесса, в производстве ферритов встречаются большие трудности.

В § 13 было указано, что одним из основных недостатков ферритов является плохая воспроизводимость свойств. Метод окислов не позволяет устранить этот недостаток, что объясняется следующим образом.

Окислы, в зависимости от способа их изготовления и внутреннего строения, обладают различной активностью, т. е. способностью вступать в химические соединения. Чем выше активность, тем легче и полнее происходит процесс ферритизации.

Например, опытным путем было установлено, что закись никеля, полученная прокаливанием углекислого никеля при темпе-

#### Схема изготовления ферритов по методу окислов



ратуре 700° С, лучше ферритизуется, чем закись никеля, полученная прокаливанием при более высокой температуре \*.

Большое влияние на активность окислов оказывают также примеси и степень измельчения частиц.

Стандарт на окислы не включает в себя нормирование активности \*\*. Поэтому ферриты, полученные по одинаковой технологии, но из разных партий сырья, удовлетворяющего требованиям ГОСТ, могут обладать разными свойствами, отличаясь друг от друга, например, по величине произведения  $\mu Q$  на частоте 100 кгц в отдельных случаях больше, чем в десять раз \*.

В практике массового производства ферритов по методу окислов указанный недостаток учитывается так: из каждой новой партии сырья изготавливают предварительно пробную партию изделий, и только в том случае, если свойства этих изделий соответствуют техническим условиям, сырье используется в производстве.

Второй способ устранения указанного недостатка — изменение технологии в направлении обеспечения контролирования процесса образования окислов. Этот способ, разработанный в СССР Н. Н. Шольц и К. А. Пискаревым, получил название *метода термического разложения солей*.

Исходными материалами в данном случае являются не окислы, а серноокислые, азотноокислые и другие соли соответствующих металлов.

Соли смешивают в необходимой пропорции и нагревают до 300° С. При этом происходит расплавление солей в кристаллизационной воде и их молекулярное перемешивание. Последнее обстоятельство увеличивает активность массы и позволяет значительно понизить требования к качеству помола.

Полученная после выпаривания воды твердая масса размалывается и далее нагревается до 935° С под вытяжкой.

При прокаливании происходит термическое разложение солей на окислы и газы. Исследования показали, что уже на этой стадии происходит частичное образование феррита.

Дальнейшее изготовление ферритов совпадает с методом окислов.

Метод термического разложения солей улучшает воспроизводимость свойств ферритов и позволяет получать магнитномягкие ферриты, имеющие значительно более высокую начальную магнитную проницаемость, чем при изготовлении первым методом.

Недостатками метода термического разложения солей являются:

---

\* Евсеев В. И. Некоторые вопросы технологии изготовления ферритов. Труды Первой межвузовской конференции по современной технике диэлектриков и полупроводников. Ленинград, 1957.

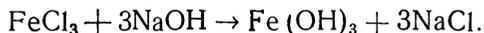
\*\* В самое последнее время некоторые ТУ нормируют эти свойства.

- 1) усложнение технологического процесса;
- 2) образование отходов, составляющих по весу приблизительно две трети от общего количества сырья;
- 3) необходимость утилизации отходов, в большинстве случаев являющихся вредными и загрязняющими воздушный бассейн (сернистые и другие газы).

Третий способ получения смеси окислов называется *способом совместного осаждения гидроокисей*.

В этом случае исходными материалами также являются соли, но технологический процесс на первом этапе отличается от метода термического разложения солей и заключается в следующем. Соли растворяют в дистиллированной воде и в раствор добавляют осадитель (соду, гидрат окиси натрия, аммиак и др.), в результате чего происходит совместное осаждение гидратов окисей.

Например, для  $\text{FeCl}_3$  и  $\text{NaOH}$  реакция идет следующим образом:



Гидроокись железа является нерастворимой и выпадает в осадок, а  $\text{NaCl}$  остается в растворе, который сливается сифонным способом.

Осадок тщательно промывается дистиллированной водой и далее используется по методу термического разложения солей.

Многократная промывка способствует удалению растворимых примесей, что повышает чистоту смеси окислов и увеличивает активность. Это является достоинством метода.

Однако он обладает всеми недостатками, присущими методу термического разложения солей, и, кроме того, еще большей сложностью, потерями неопределенного количества материала при промывке, а также опасностью появления примесей в виде некоторого количества растворимых солей, адсорбированных осадком.

Например,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  может адсорбировать до 0,88%  $\text{NaCl}$  \*.

Все же при хорошо отработанной и точно соблюдаемой технологии метод совместного осаждения гидроокисей позволяет получать ферриты с самыми высокими воспроизводимостью свойств и однородностью массы.

Он находит применение, например, при производстве магний-марганцевых ферритов с ППГ, для которых из-за небольшого размера изделий (в отдельных случаях вес изделия не превышает долей грамма) требуется сравнительно небольшое количество массы, но высокой степени однородности и повторяемости свойств.

В отдельных случаях применяют комбинированный метод: не-

---

\* Бойко В. Ф. ЖФХ, 1952, стр. 32, № 1.

которые составляющие используют в виде окислов, а другие — по способу солей или гидроокисей. Такой подход к выбору исходных материалов объясняется тем, что, например, на свойства никельцинкового феррита качество (активность)  $ZnO$  влияет мало, а  $Fe_2O_3$  или  $NiO$  влияют очень сильно. Поэтому целесообразно использовать в качестве сырья окись цинка и соли железа или никеля.

В процессе массового производства ферритов наиболее часто применяют при получении никельцинковых ферритов метод окислов, марганеццинковых — метод солей или комбинированный, магниймарганцевых (ферритов с ППГ) — метод гидроокисей или комбинированный.

Рассмотрим получение никельцинковых ферритов методом окислов и марганеццинковых ферритов комбинированным способом.

Сырьем для получения  $Ni-Zn$  ферритов по методу окислов являются  $Fe_2O_3$ ,  $NiO$  и  $ZnO$ .

По степени чистоты материалы разделяют на следующие группы: технические, технические очищенные, чистые (Ч), чистые для анализа (ЧДА), химически чистые (ХЧ) и особо чистые трех классов А, В, С. Для технических марок суммарное содержание примесей не должно превышать 1—2%, для особо чистых класса «С» —  $10^{-6}$ — $10^{-10}$ %. Стоимость материала в значительной степени определяется допустимым содержанием примесей.

Каждую партию сырья проверяют на влажность и процентное содержание окислов. Если влажность превышает 0,3%, то исходные материалы подсушивают на противнях в сушильном шкафу при температуре не выше 200° С.

Расчет весового количества составляющих шихты проводят с учетом поправок, полученных при анализе сырья. Составляющие отвешивают, высыпают в жестяной бак и перемешивают до получения однородной массы, после чего масса загружается в вибромельницу для первого помола.

Объем мельницы может быть от единиц до нескольких сотен литров. Амплитуда колебаний составляет обычно 2,0—2,5 мм при частоте около 1450 в мин. Одновременно с массой в мельницу загружают стальные шары, диаметром 10—20 мм. Отношение веса массы к весу шаров должно быть не более, чем 1 : 5.

Время помола устанавливается экспериментально при помощи опытных партий и составляет 40—60 мин. Периодически (один-два раза в неделю) производят проверку тонины помола промыванием небольшого количества массы (8—10 г) сильной струей воды через сито № 006\*. После промывания на сите не должно оставаться массы.

Полученный порошок поступает на первый обжиг, для чего

---

\* Сито № 006 имеет 10 000 отверстий на 1 см<sup>2</sup>.

его насыпают в шамотовые капсулы и помещают в туннельную или камерную печь. Максимальная температура обжига —  $900^{\circ}\text{C}$ , время выдержки при этой температуре — 4 ч. Капсулы разрешают вынимать из печи после их остывания до  $300^{\circ}\text{C}$ .

Второй помол в принципе не отличается от первого. Во время второго помола с целью использования брака и регулировки коэффициента усадки при спекании изделий разрешается добавлять к массе до 10% обрата в виде порошка с данной магнитной проницаемостью.

Полученный ферритовый порошок в зависимости от формы и размеров изделия готовится для прессования или выдавливания через мундштук.

Масса для прессования готовится следующим образом. На 1 кг порошка вводится  $100\text{ см}^3$  десятипроцентного водного раствора поливинилового спирта. Далее масса перемешивается в течение 5—10 мин в бегунах и протирается через сито № 06—07.

В массу для протяжки, кроме 12—15% десятипроцентного водного раствора поливинилового спирта, вводят 0,5—2,0% (по весу) декстрина, а также, при необходимости, добавляют до 6% воды.

Для получения высокой степени однородности после тщательного перемешивания масса от двух до пяти раз пропускается через вакуум-мялку. Масса считается готовой, если на срезе, сделанном проволокой, отсутствуют пузырьки воздуха.

Прессование производят на гидравлических прессах в стальных прессформах. Изделия из разных партий сырья могут иметь после окончательного обжига (спекания) различную усадку, величина которой определяется для каждого случая по данным опытной партии. Для получения меньшего разброса по размерам при разных усадках иногда пользуются следующим методом. Для одного и того же изделия изготавливают комплект прессформ различного размера. В зависимости от усадки пробной партии выбирают ту или иную прессформу. При этом можно получить сравнительно небольшие отклонения по размерам изделий для различных партий сырья (меньше 1% вместо 3% при одной пресс-форме).

Величина усадочного коэффициента после спекания для разных марок ферритов составляет приблизительно 5—25%.

Прессование производят при удельном давлении  $p \approx 0,3—2\text{ Т/см}^2$ .

После прессования изделия проверяют по внешнему виду на отсутствие трещин, сколов и других подобных дефектов. При необходимости удаляют облой.

Изделия методом протяжки изготавливаются на мундштучных прессах выдавливанием массы через мундштук с отверстием определенного диаметра. Таким путем изготавливают изделия в виде стержней, например ферритовые антенны.

Уменьшение разброса по величине усадки достигается применением комплекта мундштуков.

Стержни из мундштука принимают на деревянные плитки, подсушивают на воздухе в течение 2—3 суток и разрезают на куски заданной длины.

Контроль тот же, что и для прессованных изделий.

Окончательный обжиг (спекание) в принципе производится так же, как и предварительный.

Следует отметить, что окончательный обжиг в значительной степени определяет свойства изделия. Точный его режим должен быть отработан технологом для каждого конкретного случая. Он зависит от многих причин: марки материала, формы и размеров изделия, конструкции печи и т. п.

После спекания изделия поступают на разбраковку по внешнему виду, контроль электромагнитных параметров (см. § 32) и, если требуется, на операцию шлифования для подгонки размеров.

Свойства марганеццинковых ферритов зависят от точного соблюдения технологии и случайных причин еще в большей степени, чем свойства никельцинковых ферритов.

Отличительная особенность производства марганеццинковых ферритов состоит в том, что при охлаждении ферритов, содержащих марганец, в среде воздуха при атмосферном давлении марганец имеет склонность к окислению до более высоких степеней, чем  $MnO$ , что приводит к резкому снижению магнитных свойств.

Переход марганца в более высокое, чем двухвалентное, состояние можно частично устранить быстрым охлаждением («воздушная закалкой») изделий. Однако этот способ практически не позволяет получить ферриты с начальной проницаемостью  $\mu_a > 1000$  и вызывает появление трещин.

Для получения марганеццинковых ферритов с высокой магнитной проницаемостью охлаждение ведут в печах с инертной атмосферой, например в среде  $CO_2$  или в вакуумных печах, в которых давление изменяется в зависимости от температуры по определенной программе.

В производстве марганеццинковых ферритов часто используют комбинированный метод или метод солей.

При комбинированном методе сырьем являются окись железа «ЧДА», углекислый марганец «Ч», окись цинка и аммоний ванадиевокислый «ЧДА», который добавляется для лучшей спекаемости сверх 100% в количестве 0,32 г на 1 кг массы.

Предварительный обжиг и спекание требует более высоких температур, чем для никельцинковых ферритов.

Например, для феррита марки 2000НМ предварительный обжиг ведут при температуре  $1000 \pm 20^\circ C$  с выдержкой при этой температуре в течение четырех часов, а окончательный обжиг — при температуре от 1200 до  $1350^\circ C$  (температура для каждой

партии сырья устанавливается технологом по результатам опытной партии) в течение трех часов.

В заключение отметим, что многие вопросы технологии производства ферритов еще не отработаны, что подтверждается высоким процентом брака. Большие трудности при налаживании производства возникают также из-за дефицитности специализированного оборудования — печей, вибротельных и пр., а также вследствие низкого качества сырья. в первую очередь окиси железа.

Кроме рассмотренных нами методов получения ферритов, разработаны и многие другие, однако они не имеют пока промышленного значения [Л. 20].

## § 15. МАГНИТОДИЭЛЕКТРИКИ

Магнитодиэлектрики 15—20 лет тому назад были единственными высокочастотными магнитными материалами. В связи с появлением ферритов их значение уменьшилось, однако они находят применение и сейчас. Это объясняется некоторыми их преимуществами перед ферритами в первую очередь более высокой стабильностью свойств. Кроме того, особенности технологии производства магнитодиэлектриков, соответствующей технологии пластмасс, позволяют получать изделия значительно более высоких классов точности и чистоты, чем при керамической технологии получения ферритов.

Ранее было сказано, что магнитодиэлектрики представляют собой конгломерат из измельченного ферромагнетика, частицы которого разделены между собой в электрическом отношении изолирующими пленками из немагнитного материала, являющегося одновременно механической связкой.

Магнитные свойства магнитодиэлектриков в значительной степени определяются особенностями намагничивания совокупности отдельных ферромагнитных частиц, следовательно, их размеров и формы, взаимного расположения, соотношения между количествами ферромагнетика и диэлектрика. Магнитные свойства исходного вещества влияют на параметры магнитодиэлектрика сравнительно мало.

Магнитную проницаемость магнитодиэлектрика  $\mu'$  можно вычислить по формуле \* [Л. 8]:

$$\mu' = \frac{1}{\frac{1}{\mu} + \frac{V}{3}}, \quad (47)$$

\* Формула справедлива для частиц сферической формы.

где  $\mu$  — проницаемость исходного вещества;

$V$  — относительный объем, занимаемый изолирующей массой\*.

Из формулы следует, что, чем больше  $\mu$  и  $V$ , тем в меньшей степени сказываются магнитные свойства исходного вещества на величине проницаемости магнитодиэлектрика. Для промышленных типов магнитодиэлектриков изменение проницаемости исходного ферромагнетика в десятки раз вызывает незначительное изменение  $\mu'$ . Отсюда также видно, что нестабильность величины  $\mu$  лишь в малой степени влияет на  $\mu'$ , т. е. магнитодиэлектрикам свойственна значительно большая стабильность свойств, чем исходным ферромагнитным веществам.

Обычно магнитодиэлектрики работают в сравнительно небольших внешних полях  $H_e$ . Поле же  $H_i$ , действующее в каждой частице ферромагнетика, меньше  $H_e$ , так как

$$H_i = H_e - H_o,$$

где  $H_o$  — напряженность размагничивающего поля (см. формулу 33). Следовательно, при формулировании требований, предъявляемых к магнитодиэлектрикам, и анализе их работы можно ограничиться рассмотрением действия слабых полей (областью Релея).

Для начальной части кривой намагничивания закон Релея выглядит следующим образом:

$$B = \mu'_a H + \nu H^2, \quad (48)$$

где  $\mu'_a$  — начальная магнитная проницаемость магнитодиэлектрика;

$\nu$  — постоянная.

Из выражения (48) следует линейная зависимость магнитной проницаемости  $\mu'$  магнитодиэлектрика от поля:

$$\mu' = \mu'_a + \nu H, \quad (49)$$

или

$$\mu' = \mu'_a (1 + \alpha H), \quad (50)$$

где

$$\alpha = \frac{\nu}{\mu'_a} = \frac{\mu' - \mu'_a}{\mu'_a H} \quad (51)$$

коэффициент, являющийся постоянной магнитодиэлектрика и характеризующий стабильность проницаемости при изменении напряженности поля. Желательно, чтобы коэффициент  $\alpha$  был как можно ближе к нулю (чтобы разница между  $\mu'$  и  $\mu'_a$  была наименьшей).

\* Часто вместо понятия  $V$  пользуются коэффициентом заполнения  $P$ , равным в процентном выражении  $(100 - V\%)$ .

Зависимость магнитной проницаемости магнетодиэлектрика в небольшом интервале изменения температуры также выражается линейным законом

$$\mu'_{t_2} = \mu'_{t_1} [1 + \beta_{\mu'} (t_2 - t_1)], \quad (52)$$

где  $\beta_{\mu'}$  ( $TK_{\mu'}$ ) — температурный коэффициент магнитной проницаемости магнетодиэлектрика (см. формулу 44). Желательно  $\beta_{\mu'}$  иметь как можно меньше.

Потери в магнетодиэлектриках, так же как и потери в ферритах (см. § 13), оценивают величиной общего тангенса угла потерь  $\text{tg } \delta$  (или приведенного тангенса угла потерь  $\text{tg } \delta / \mu'_a$ ). Как было показано в § 13, в области Релея

$$\text{tg } \delta = \delta_h H + \delta_f f + \delta_{\pi}.$$

Коэффициенты потерь  $\delta_h$ ,  $\delta_f$ ,  $\delta_{\pi}$  определяют по сопротивлению потерь  $r_h$ ,  $r_f$ ,  $r_{\pi}$  эквивалентной схемы катушки с сердечником, включенной в цепь переменного тока.

Эквивалентная схема представляет собой последовательное соединение индуктивности  $L$  с сопротивлением  $r$ , равным сумме сопротивлений  $r_h$ ,  $r_f$ ,  $r_{\pi}$ , и сопротивления постоянному току  $r_0$ . Сумму ( $r_h + r_f + r_{\pi}$ ) называют сопротивлением потерь в сердечнике  $r_c$ .

Общий тангенс угла потерь и его составляющие можно выразить через сопротивления потерь следующим образом:

$$\text{tg } \delta = \frac{r_c}{2\pi f L}; \quad (53)$$

$$\delta_h = \frac{r_h}{2\pi f L H} [I/\vartheta]; \quad (54)$$

$$\delta_f = \frac{r_f}{2\pi f^2 L} [I/2\vartheta]; \quad (55)$$

$$\delta_{\pi} = \frac{r_{\pi}}{2\pi f L}. \quad (56)$$

Экспериментально можно определить только суммарные потери  $\delta$  ( $r_c$ ). Однако, измерив их для нескольких частот и напряженностей поля, можно произвести разделение потерь, т. е. вычислить величины  $\delta_h$  ( $r_h$ ),  $\delta_f$  ( $r_f$ ) и  $\delta_{\pi}$  ( $r_{\pi}$ ) (см. § 32). Знание величин составляющих потерь позволяет найти способы уменьшения суммарных потерь.

Особое значение для некоторых видов аппаратуры имеет уменьшение потерь на гистерезис, которые определяют величину нелинейных искажений, вносимых магнетодиэлектриком. Зависимость клирфактора

$$K_{\phi} = \frac{\sqrt{U_3^2 + U_5^2 + \dots}}{U_1}$$

от  $\delta_h$  имеет следующий вид:

$$K_\phi \approx 0,62\delta_h H. \quad (57)$$

Основными требованиями, предъявляемыми к исходному ферромагнетику для производства магнитодиэлектриков, являются:

- 1) возможность получения малых частиц, желательной определенной (сферической или чешуйчатой) формы;
- 2) большое удельное электросопротивление;
- 3) малые потери, прежде всего на гистерезис, для отдельных частиц в слабых полях.

В настоящее время наибольшее применение имеют магнитодиэлектрики на основе альсифера и карбонильного железа.

**Магнитодиэлектрики на основе альсифера.** Основные свойства альсифера были рассмотрены в § 11. Для магнитодиэлектриков применяют сплавы с содержанием 9—11% кремния и 6—8% алюминия. В данном случае, как было указано выше, нет необходимости путем строгого выдерживания состава стремиться к получению наибольшего значения магнитной проницаемости. Значения коэффициентов потерь на гистерезис и последствие минимальны при содержании кремния в пределах 9,4—10,2% (при 7,5% Al) и алюминия в пределах 7,2—8,0% (при 10% Si).

Важная особенность альсифера состоит в том, что его температурный коэффициент магнитной проницаемости в зависимости от содержания кремния и алюминия может быть меньше, больше или равен нулю. Альсифер является дешевым и недефицитным материалом. Все это обеспечило ему широкое применение в качестве ферромагнитной фазы магнитодиэлектриков.

Технологический процесс производства магнитодиэлектриков на основе альсифера в основном состоит в следующем:

1. Литье сплава в высокочастотной печи, охлаждение отливок в воде для придания сплаву большей хрупкости, размол в шаровых или вибромельницах, рассев и отжиг для снятия наклепа при температуре 950—980° С в вакууме.

2. Приготовление изолирующего состава. В настоящее время для этой цели применяют как органические изоляционные материалы (бакелит, полистирол, шеллак), так и неорганические (жидкое стекло, стеклоэмали и др.). Используются также изолирующие свойства оксидных пленок, образующиеся на поверхности ферромагнитных частиц. Изоляция между частицами должна обладать высокими диэлектрическими свойствами и плотно связываться с частицами ферромагнетика, образуя сплошную без разрывов пленку. Для выполнения последнего условия необходимо, чтобы поверхность изоляционной пленки на частицах обеспечивала бы максимальную подвижность порошка при прессовании. С этой целью в порошок часто вводят тальк, парафин или некоторые другие вещества.

Часто применяется связка в виде механической смеси жидкого стекла, талька и хромового ангидрида. Связка вводится в порошок альсифера, и смесь перемешивается и подогревается для удаления воды, содержащейся в связке.

3. Прессовка сердечников в прессформах из высококачественной стали на гидравлических прессах при сравнительно высоких давлениях, равных  $14\text{--}20 \text{ Т/см}^2$  (формование ферритовых изделий производят обычно при давлениях в  $1\text{--}2 \text{ Т/см}^2$ ). Чем больше давление, тем выше начальная проницаемость.

Прессованные детали для снятия наклепа от прессования подвергают отжигу в камерной печи при температуре  $780^\circ\text{С}$  с выдержкой около 40 мин и охлаждением на воздухе.

После термической обработки сердечники кипятят в воде для удаления жидкого стекла и остатков хромового ангидрида, после чего их высушивают в термостате и производят старение для стабилизации свойств во времени в течение 48 ч при  $140\text{--}160^\circ\text{С}$ .

Изготовленные таким образом сердечники гигроскопичны, поэтому их пропитывают бакелитовым лаком и смолу полимеризуют при  $120^\circ\text{С}$  в течение 2—3 ч.

Описанный процесс производства альсиферовых сердечников является только одним из возможных. В зависимости от марки магнитодиэлектрика меняется количество вводимой связки (4—8% по объему для магнитодиэлектриков с начальной проницаемостью свыше 40 и до 50% для низкопроницаемых магнитодиэлектриков), состав связки, крупность зерен ( $10^{-1}\text{--}10^{-4} \text{ см}$  в перечнике), давление при прессовании.

Основные параметры колец из альсифера различных марок для аппаратуры проводной связи и для радиоаппаратуры (ГОСТ 8763—58) приведены соответственно в табл. 16 и 17.

Буквы в названии типа кольца обозначают: ТЧ — тональная частота; ТЧК — тональная частота с компенсированным температурным коэффициентом магнитной проницаемости; ВЧ — высокая частота; ВЧК — высокая частота с компенсированным температурным коэффициентом магнитной проницаемости; П и Р — определяет соответственно назначение колец: для «проводной» или «радиоаппаратуры».

Кольца имеют размеры: наружный диаметр от 15 до 75 мм, внутренний диаметр от 7 до 46 мм; высоту от 4,8 до 16,8 мм.

Отметим особенности технологии производства магнитодиэлектриков с компенсированным температурным коэффициентом магнитной проницаемости. Сплавы с близким к нулю  $TK_\mu$  получают в результате смешивания в определенной пропорции альсиферов двух составов: с положительным (сплав А-11) и отрицательным (сплав А-10,2) температурным коэффициентом магнитной проницаемости. ГОСТ 8763—58 не разрешает применять сплавы с компенсированным  $TK_\mu$  в случае отсутствия повышен-

Таблица 16

**Основные параметры колец из альсифера для аппаратуры  
проводной связи (ГОСТ 8763—58)**

Тип кольца	ТЧ-60П	ТЧК-55П	ВЧ-32П	ВЧ-22П	ВЧК-22П
Начальная магнитная проницаемость $\mu_a$ при 20° С, гс/э	55—65	50—60	30—34	20—24	20—24
Температурный коэффициент начальной магнитной проницаемости $TK \mu_a'$ в интервале температур от +20 до +70° С	$-400 \cdot 10^{-6}$	от $-150 \cdot 10^{-6}$ до $+50 \cdot 10^{-6}$	$-250 \cdot 10^{-6}$	$-200 \cdot 10^{-6}$	от $-50 \cdot 10^{-6}$ до $+50 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент потерь на гистерезис $\delta_h$ , 1/э	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент потерь на вихревые токи $\delta_f$ , 1/гц	$250 \cdot 10^{-9}$	$250 \cdot 10^{-9}$	$85 \cdot 10^{-9}$	$12 \cdot 10^{-9}$	$12 \cdot 10^{-9}$
Коэффициент потерь на последствие $\delta_n$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Рабочий диапазон частот, кГц (не более)	10	10	50	100	100
Маркировочный знак колец (одна полоса)	черная	красная	белая	зеленая	желтая

ных требований к температурной стабильности сердечника, что объясняется повышенной стоимостью и дефицитностью таких сердечников.

**Магнитодиэлектрики на основе карбонильного железа.** В § 9 было указано, что карбонильное железо может быть получено в виде порошка с частицами сферической формы. Тонина порошка зависит от условий термического разложения пентакарбонила железа и увеличивается с возрастанием температуры. Для изготовления магнитодиэлектриков обычно применяются порошки с частицами 1—25 мк.

Чем выше рабочая частота, тем меньше по размеру частицы карбонильного железа должен иметь магнитодиэлектрик и тем меньше будет его магнитная проницаемость. Карбонильное железо содержит большое количество примесей (до 1—1,5% углерода и 0,2—0,8% кислорода), которые также снижают магнит-

Таблица 17

Основные параметры колец из альсифера для радиоаппаратуры  
(ГОСТ 8763—58)

Тип кольца	ТЧ-60Р	ТЧК-55Р	ВЧ-32Р	ВЧ-22Р	ВЧК-22Р
Начальная магнитная проницаемость $\mu'_a$ при 20°С, гс/э	55—65	50—60	30—34	20—24	20—24
Температурный коэффициент начальной магнитной проницаемости $TK_{\mu'_a}$ при $t$ от +20 до +70°С и от +20 до -60°С	$-400 \cdot 10^{-6}$	от $-150 \cdot 10^{-6}$ до $+50 \cdot 10^{-6}$	$-250 \cdot 10^{-6}$	$-200 \cdot 10^{-6}$	от $-50 \cdot 10^{-6}$ до $+50 \cdot 10^{-6}$
	—	от $-450 \cdot 10^{-6}$ до $+150 \cdot 10^{-6}$	—	—	от $-150 \cdot 10^{-6}$ до $+150 \cdot 10^{-6}$
Приведенный тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta/\mu'_a$ при напряженности поля $H \leq 0,2$ э, $H \leq 0,5$ э	$3,27 \cdot 10^{-4}$ $3,55 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$ $3,9 \cdot 10^{-4}$	$3,37 \cdot 10^{-4}$ $3,56 \cdot 10^{-4}$	$1,32 \cdot 10^{-4}$ $1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,32 \cdot 10^{-4}$ $1,5 \cdot 10^{-4}$
	и частотах $f$ 60 кГц		100 кГц		
Маркировочный знак колец, две полосы	черные	красные	белые	зеленые	желтые

ную проницаемость. Уменьшение проницаемости сопровождается уменьшением потерь на гистерезис и повышением стабильности магнитодиэлектрика.

Л. И. Рабкин дает следующее объяснение этому явлению [Л. 7]. Чем ниже проницаемость, тем большее значение в процессе намагничивания играют процессы вращения, которые требуют в слабых полях, по сравнению с процессом смещения границ, меньших затрат энергии.

Дальнейшее снижение проницаемости и уменьшение потерь сердечников из карбонильного железа достигается тем, что процесс разложения пентакарбонила железа ведут в среде азота. Полученное таким образом азотированное железо содержит несколько десятых процентов азота.

Для магнитодиэлектриков с низкой  $\mu_a$  и малыми коэффициентами потерь целесообразно применение именно азотированного железа. Сердечники из азотированного железа имеют на высоких

частотах значительно меньшие потери, чем сердечники из альсифера. Некоторые параметры магнитодиэлектриков на основе азотированного карбонильного железа приведены в табл. 18.

Таблица 18

Параметры магнитодиэлектриков на основе карбонильного железа [Л. 1]

Класс карбонильного железа	Начальная проницаемость $\mu_a$	Коэффициенты потерь			$TK_a \cdot 10^6$	Рабочий диапазон частот (ориентировочно)
		$\delta_H \cdot 10^3, 1/\%$	$\delta_f \cdot 10^6, 1/гц$	$\delta_n \cdot 10^3$		
П-4	12—15	0,13	3	0,2	50	до 200—500 кГц
Р-8	~8—13	~0,3—0,5	~5—10	~0,5	—	до 1—2 МГц
Р-2	~5—6	~0,1—0,2	~2	~0,3	—	до 50 МГц

Технологический процесс производства сердечников из порошка карбонильного железа состоит в изолировании порошка, прессовании деталей и их низкотемпературной термической обработке для придания механической прочности и стабилизации свойств. Подробно эти вопросы рассмотрены, например, в [Л. 7].

Из карбонильного железа изготавливают кольцевые, броневые и цилиндрические сердечники.

Кроме имеющих наибольшее применение групп магнитодиэлектриков на основе альсифера и карбонильного железа, известны и некоторые другие магнитодиэлектрики, например, на основе нелегированных и легированных пермаллоев.

Для производства магнитодиэлектриков на основе пермаллоев в основном используются порошки из молибденового пермаллоя. Эта группа магнитодиэлектриков отличается значительно более высокой проницаемостью (особенно с частичками чешуйчатой формы), одновременно и большими потерями, чем магнитодиэлектрики на основе альсифера и карбонильного железа. В СССР магнитодиэлектрики на основе порошков из пермаллоя в промышленном масштабе не производятся, поэтому они здесь не рассматриваются\*.

## § 16. ПРОЧИЕ МАГНИТНОМЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Кроме рассмотренных выше основных групп магнитномягких материалов, в технике находят применение материалы, обладающие особыми свойствами и имеющие более узкое применение.

\* Этот вопрос рассмотрен, например, в [Л. 7].

Из них мы рассмотрим железокобальтовые сплавы с высокой индукцией насыщения.

Чем выше индукция насыщения, тем более мощный поток (при прочих равных условиях) можно получить в магнитопроводе.

Из обычных материалов наивысшей индукцией насыщения обладает железо ( $4\pi J_S \approx 21\,500$  гс). В случаях, когда предъявляются особенно высокие требования к габаритам устройства, его весу и величине потока, применяют железокобальтовые сплавы, у которых индукция насыщения достигает 24 300 гс, что позволяет получить экономию в весе и объеме, по сравнению с железом, на 15—20%.

Практическое применение находят сплавы с содержанием 30—50% кобальта и 1,8—2,0% ванадия, который улучшает технологические свойства сплавов, в частности их обрабатываемость в холодном состоянии. Эти сплавы называются *пермендюррами*.

Индукция насыщения сплавов с большим и малым содержанием кобальта приблизительно одинаковая. Но высококобальтовые сплавы в слабых и средних полях имеют большие значения проницаемости, чем низкокобальтовые, зато последние дешевле.

Кроме большого значения индукции насыщения, пермендюр обладает также очень высокой обратимой проницаемостью, что делает его особенно ценным в качестве материала для мембран телефонов.

К недостаткам пермендюра следует отнести его малое электрическое сопротивление, высокую стоимость и дефицитность кобальта и ванадия.

Пермендюр применяется в постоянных магнитных полях или в слабых переменных полях с сильным подмагничиванием постоянным полем. Кривая намагничивания пермендюра с 1,8% ванадия представлена на рис. 53.

Преимущество железокобальтовых сплавов перед техническим железом становится ощутимым в области индукций выше 10 000 гс. Разница в величине магнитной проницаемости достигает своего максимального значения при индукции около 18 000 гс. Вблизи этой точки проницаемость кобальтовых сплавов больше проницаемости мягких сортов железа в несколько десятков раз.

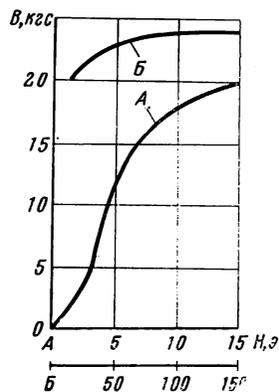


Рис. 53. Кривая намагничивания пермендюра с содержанием 1,8% ванадия

## МАГНИТНОТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ

## § 17. КЛАССИФИКАЦИЯ МАГНИТНОТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

**В** качестве основного классификационного признака промышленных сплавов для постоянных магнитов обычно принимают определяющий способ получения данного материала. По этому принципу магнитотвердые материалы могут быть разделены на следующие группы.

**1. Литые магниты на основе системы железо — никель — алюминий и железо — никель — алюминий — кобальт**, в некоторых случаях легированные медью, серой, титаном, ниобием и другими элементами.

Сплавы этой группы характеризуются хорошими магнитными свойствами, но плохими механическими качествами (низкой пластичностью и высокой твердостью). Обрабатываются только шлифовкой или электроискровым методом. В процессе изготовления для ряда сплавов применяется термомагнитная обработка, а также направленная кристаллизация, что приводит к повышению магнитных свойств за счет образования магнитной текстуры. Высококоэрцитивное состояние материалов этой группы объясняется механизмом дисперсионного твердения сплавов (см. § 21). В настоящее время сплавы дисперсионного твердения имеют исключительно большое значение и покрывают приблизительно 80% потребностей народного хозяйства в магнитотвердых материалах.

**2. Магниты, получаемые методами порошковой металлургии**, в которых процессы литья заменяются прессованием порошков.

Все магниты этой группы не требуют дополнительной механической обработки. Особенно широко они применяются при изготовлении магнитов, небольших по размерам или имеющих сложную конфигурацию.

В зависимости от особенностей производства и физических процессов образования высококоэрцитивного состояния, магниты из порошков подразделяются на металлокерамические, металлопластические, оксидные, из микропорошков.

Металлокерамические магниты получают из металлических порошков в результате прессования без связывающего материала и спекания при высокой температуре. По магнитным свойствам они лишь немного уступают литым, но дороже последних.

Металлопластические магниты изготавливаются, как и металлокерамические, из порошков, но прессуются вместе с изолирующей связкой и подвергаются нагреву до невысокой температуры, необходимой для полимеризации связывающего вещества. Они имеют пониженные, по сравнению с литыми магнитами, магнитные свойства, но обладают большим электрическим сопротивлением, малым удельным весом и относительно дешевы.

Среди оксидных магнитов практическое значение имеют пока только магниты на основе феррита бария (бариевые магниты). Технология их производства имеет много общего с производством магнитномягких ферритов. Применяют как изотропные бариевые магниты, так и анизотропные, обработанные при изготовлении в магнитном поле. Магнитные свойства бариевых магнитов в общем ниже, чем магнитов на основе железоникельалюминиевых сплавов, зато оксидные магниты дешевле и не содержат дефицитных элементов, а также имеют очень большое удельное электрическое сопротивление, что позволяет применять их в высокочастотных устройствах.

Магниты из микропорошков в основном изготавливаются из железа или железа с кобальтом и на основе системы марганец — висмут. Причина образования высококоэрцитивного состояния в этих материалах объясняется особенностями намагничивания однодоменных частиц. Пока еще магниты из микропорошков не имеют промышленного применения, но с теоретической точки зрения они являются весьма перспективными.

**3. Стали, закаливаемые на мартенсит:** хромистые, вольфрамовые и кобальтовые.

Материалы этой группы имеют значительно более низкие, по сравнению со сплавами дисперсионного твердения, магнитные параметры, но обладают хорошими механическими свойствами: в процессе изготовления могут подвергаться ковке и прокатке при высоких температурах, а также удовлетворительно обрабатываются резанием. Образование высококоэрцитивного состояния в материалах этой группы объясняется мартенситным строением, возникающим в результате закалки. Магниты из мартенситных сталей применяются в настоящее время относительно редко и только в устройствах, для которых вес и габариты не являются существенными.

#### **4. Прочие материалы для постоянных магнитов.**

В некоторых случаях к механическим или магнитным свойствам материалов для постоянных магнитов предъявляются особые требования. Например, для звукозаписи магнит должен быть изготовлен в виде тонкой проволоки или ленты. Для этого не под-

ходит ни один из перечисленных выше материалов. В этом случае применяют пластически деформируемые магнитотвердые сплавы: кунико, кунифе, викаллой и некоторые другие. Иногда в качестве основного требования выдвигается условие применения материала с максимальным значением коэрцитивной силы, чему соответствуют сплавы на основе благородных металлов, например сплав сигманал ( $\text{Ag}-\text{Mn}-\text{Al}$ ) или платина—кобальт, для которых  $JH_c$  достигает 5000—6000 э.

Эти и подобные магнитотвердые материалы имеют весьма ограниченное применение, поэтому они объединены при дальнейшем рассмотрении в одну группу.

### § 18. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К МАГНИТОТВЕРДЫМ МАТЕРИАЛАМ

Магнитотвердые материалы применяются для изготовления постоянных магнитов. При этом используется магнитная энергия, возникающая между полюсами магнита. Отсюда следует, что

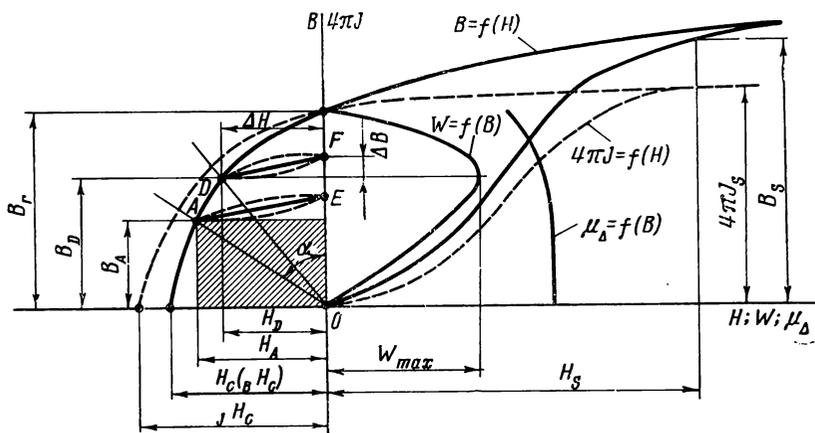


Рис. 54. Схематическое изображение кривых, характеризующих свойства магнитотвердых материалов

магнитные цепи с постоянными магнитами должны быть разомкнутыми, т. е. иметь полезный (рабочий) воздушный зазор. Поток в зазоре возникает после намагничивания материала при кратковременном помещении его в сильное магнитное поле.

Схематически кривые намагничивания магнитотвердого материала представлены на рис. 54. В дальнейшем будем считать, что магнит намагничен до намагниченности насыщения  $J_S$  или соответственно до индукции насыщения  $B_S$ .

После снятия внешнего поля магнитные свойства материала характеризуются кривой размагничивания — расположенным во втором квадранте участком гистерезисной петли. Положение рабочей точки  $A$  на этой кривой определяется относительными размерами постоянного магнита, т. е. величиной коэффициента размагничивания  $N$  ( $\operatorname{tg} \alpha = N/4\pi$ ). Индукция  $B_A$  называется *кажущейся остаточной индукцией* или *остаточной индукцией в разомкнутой цепи*.

Энергия  $W_A$  во внешнем пространстве (воздушном зазоре), создаваемая единицей объема материала для точки  $A$ , может быть выражена следующими равенствами:

в системе СИ

$$W_A = \frac{B_A H_A}{2} \quad [\text{дж/м}^3], \quad (58)$$

в системе СГСМ

$$W_A = \frac{B_A H_A}{8\pi} \quad [\text{эрг/см}^3]. \quad (58')$$

В практике использования магнитных материалов вместо энергии  $W_A$  часто пользуются пропорциональной ей величиной ( $B_A H_A$ ). В некотором масштабе энергия  $W_A$  может быть представлена площадью прямоугольника со сторонами  $B_A$  и  $H_A$  (на рис. 54 прямоугольник заштрихован).

Меняя размеры магнита, например величину воздушного зазора, будем менять положение рабочей точки на кривой размагничивания. Если цепь замкнута, то индукция будет наибольшей, равной остаточной индукции  $B_r$  материала, но так как воздушный зазор, где может быть использована энергия магнита, при этом отсутствует ( $H=0$ ), то  $W=0$ . Второе предельное значение, при котором энергия также равна нулю, соответствует  $H=H_c$ ;  $B=0$  ( $N=\infty$ ), что не имеет физического смысла. Для точек, близких к этому положению, вследствие очень большого размагничивающего поля, индукция мала. Поэтому, хотя воздушный зазор и велик, но использование энергии магнита незначительное.

Изображенная на рис. 54 зависимость  $W=f(B)$  показывает, что магнит имеет наиболее выгодную рабочую точку  $D$ , для которой энергия, отдаваемая во внешнее пространство единицей объема магнита, максимальна.

Проектирование систем с постоянными магнитами в значительной степени сводится к расчету размеров магнитной цепи (коэффициента размагничивания) таким образом, чтобы обеспечить работу в точке максимальной отдачи энергии. Поэтому и качество магнитотвердого материала оценивается, в первую очередь, значением  $W_{\max}$  или пропорциональной ей величиной  $(BH)_{\max}$ . Для применяемых в настоящее время материалов  $(BH)_{\max}$  имеет значения от  $0,25 \cdot 10^6$  гс·э (хромистая сталь) до

$8,1 \cdot 10^6$  гс·э (алнико VIII — материал с магнитной и кристаллической текстурой). На уникальных лабораторных образцах получена энергия  $11 \cdot 10^6$  гс·э.

Максимальная энергия будет тем больше, чем больше величины  $B_r$  и  $H_c$ , а также чем ближе к прямоугольной форме (выпуклее) кривая размагничивания. Выпуклость кривой оценивается коэффициентом выпуклости  $\gamma$ , который определяется уравнением

$$\gamma = \frac{(BH)_{\max}}{B_r H_c}. \quad (59)$$

Современные магнитотвердые материалы, применяемые в промышленности, имеют  $B_r = 2000—13\,500$  гс;  $H_c = 50—4000$  э;  $\gamma = 0,25—0,75$ .

Увеличение  $W_{\max}$  может быть достигнуто в результате увеличения  $B_r$ ,  $H_c$  и  $\gamma$ .

С точки зрения получения наибольших значений  $B_r$  интерес представляют железо и сплавы железо — кобальт, обладающие самыми высокими намагниченностями насыщения (для железа  $4\pi J_S \approx 21\,500$  гс). Предельное значение  $B_r$  будет получено в том случае, если при уменьшении намагничивающего поля до нуля,  $J_S$  не уменьшится. Тогда  $B_r = 4\pi J_S$ .

Коэрцитивная сила, в свете представлений теории ферромагнетизма, может быть получена наиболее высокой у материалов из мелких, однодоменных порошков. При этом особенно большого увеличения  $H_c$  можно достигнуть в результате применения частиц, обладающих анизотропией формы. Теоретические расчеты показывают, что самыми перспективными в отношении получения больших значений  $H_c$  являются, как и в отношении получения больших значений  $B_r$ , железо и сплавы железо — кобальт. Для железа предельное значение  $(BH)_{\max} = 38,5 \cdot 10^6$  гс·э. Практически пока достигнута величина  $(BH)_{\max} = 3,5 \cdot 10^6$  гс·э, т. е. использовано только 9% возможностей материала. Большая разница между теоретическими и достигнутыми значениями объясняется в значительной степени технологическими трудностями получения материала с оптимальными свойствами (см. § 23). Для некоторых материалов достигнутые на практике значения почти соответствуют предельным, т. е. возможности таких материалов в значительной степени уже исчерпаны. Например, для бариевых магнитов эта величина составляет 70—80%.

Для  $\gamma$  максимальное значение равно единице (кривая размагничивания представляет собой два взаимно перпендикулярных отрезка);  $\gamma$  существенно увеличивается при создании магнитной анизотропии (текстуровке) материала.

В процессе эксплуатации магнита положение рабочей точки, в качестве которой была выбрана точка  $D$ , отвечающая условию  $W_{\max}$ , не остается постоянным. В некоторых случаях изменение

положения вызывается изменением величины воздушного зазора. Это происходит, например, в магнитных цепях магнитоэлектрических двигателей и генераторов, при работе удерживающих магнитов и т. п. В других случаях рабочая точка смещается под действием внешних магнитных полей, температуры, тряски, ударов, а также в результате магнитной стабилизации (см. § 19).

Изменение магнитного состояния происходит во всех указанных случаях по кривым возврата, представляющим собой частные петли гистерезиса, одна из вершин которых лежит на кривой размагничивания. Кривые возврата являются весьма узкими, поэтому их обычно заменяют прямыми возврата (на рис. 56 прямые  $AE$  и  $DF$ ). Ход прямой возврата оценивается коэффициентом возврата  $\mu_{\Delta}$ , определяемым по формуле

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta B}{\Delta H}, \quad (60)$$

где  $\Delta B$  — изменение индукции, соответствующее изменению поля  $\Delta H$  (см. рис. 56).

На рис. 56 представлена зависимость  $\mu_{\Delta} = f(B)$ . Для железоникельалюминиевых сплавов  $\mu_{\Delta}$  составляет единицы, а для мартенситных сталей — десятки. Чем меньше коэффициент возврата, тем меньше будут изменения кажущейся остаточной индукции в результате смещения положения рабочей точки. Отсюда следует, что коэффициент возврата определяет в некоторой степени стабильность магнитной цепи.

Кроме основных критериев магнитных свойств ( $W_{\max}$  и  $\mu_{\Delta}$ ), при оценке магнитотвердых материалов могут оказаться существенными механические свойства (прочность), в процессе производства обрабатываемость материала, а также плотность, электросопротивление, стоимость. Особенно важное значение имеет, для некоторых случаев, вопрос стабильности магнитных свойств, который рассмотрен в § 19.

В табл. 19 приведены некоторые свойства различных групп материалов для постоянных магнитов.

## § 19. СТАБИЛЬНОСТЬ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Магнит считается стабилизированным, если он не меняет своих свойств с течением времени и возвращается к первоначальному магнитному состоянию после устранения внешней причины, которая вывела его из этого состояния.

Изменение магнитного потока может происходить в результате изменений магнитных свойств вещества, связанных с фазовыми превращениями и уменьшением внутренних напряжений (структурное старение), а также от изменения магнитного состояния материала под воздействием внешних условий (магнитная нестабильность).

Таблица 19

## Некоторые свойства различных групп материалов для постоянных магнитов

Марка	Химический состав*	$(BH)_{\max}$ , $10^{-6}$ эс.э	Плотность $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	Удельное электро- противле- ние $\rho$ , ом·мм <sup>2</sup> /м	Ориенти- ровочная стоимость 1 кг мате- риала, руб.
ЮНД4 (АНЗ)	15,5% Al; 25% Ni; 4,0% Cu	0,9	7,1	0,65	1,4
ЮНДК24 (АНК04)**	9,0% Al; 14,0% Ni; 24% Co; 4,0% Cu; 0,3% Ti	4,0	7,3	0,47	10
ЮНДК25БА**	9,0% Al; 15,0% Ni; 25% Co; 4,0% Cu; 0,8% Nb	6,6	7,4	0,45	30—40
0,7 БИ	BaO·6Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,8	4,4	10 <sup>8</sup>	2,3
3 БА**	BaO·6Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,5	4,9	10 <sup>5</sup>	5,8
ЕХЗ	2,8—3,6% Cr; 0,9—1,1% С	0,35	7,8	0,3	0,15
Металлокерами- ческий (на базе ЮНДК24)**	8,0% Al; 13,5% Ni; 23,0% Co; 4,0% Cu	3,75	7,0	0,68	—
Металлопласти- ческий (на базе ЮНД4)	15,0% Al; 24,0% Ni; 4,0% Cu	0,38	5,0	—	—
Мп—Ві**	23,0% Мп; 77% Ві	5,4	7,0	—	—
Pt—Co	77,0% Pt; 33,0% Co	3,8	—	0,42	120
Викаллой II**	52,0% Co; 13,0% V	3,5	7,6	0,60	40
Железо (микро- порошок)**	Fe	3,5	4,0	—	—

\* Остальное железо.

\*\* Текстурованный.

Структурное старение является необратимым в том смысле, что магнитные свойства могут быть восстановлены только в результате проведения повторной термической обработки.

Свойства, изменившиеся под действием магнитной нестабильности, могут быть восстановлены повторным намагничиванием. При этом магнитная нестабильность может иметь как обратимый, так и необратимый характер. Если после возвращения внешних условий к исходным магнитные свойства восстанавливаются, то имеют место обратимые изменения, а при наличии гистерезиса — необратимые.

Степень структурного старения для разных материалов весьма различна. Магниты из мартенситных сталей всегда необходимо подвергать искусственному остариванию, а для магнитов из железоникельалюминиевых сплавов в большинстве случаев этого не требуется.

Метод искусственного старения мартенситных сталей заключается в длительном выдерживании магнита при повышенной температуре. Например, магнит выдерживают в кипящей воде, т. е. при  $100^{\circ}\text{C}$  в течение 10—15 ч, что по данным М. Кюри равносильно естественному старению в течение 10—15 лет.

Структурную стабильность сплавов с дисперсионным твердением можно повысить частичным снятием напряжений посредством отпуска магнитов при повышенной температуре с последующим медленным охлаждением.

Уменьшение магнитной нестабильности идет по пути устранения необратимых изменений и последующей оценки оставшихся обратимых изменений. Основными методами магнитной стабилизации являются частичное размагничивание магнита и обработка его температурными циклами.

Идея метода частичного размагничивания заключается в том, что намагниченный магнит подвергают действию переменного магнитного поля с убывающей до нуля амплитудой. В результате такой обработки дальнейшие изменения свойств магнита в известном диапазоне изменений внешних условий становятся обратимыми.

Для объяснения этого явления рассмотрим, как под действием внешнего магнитного поля будут меняться магнитные свойства системы, характеризующейся рабочей точкой  $A$  (рис. 55).

При действии поля  $\Delta H$  изменение магнитного состояния произойдет по прямой возврата и будет соответствовать точке  $C$ . После устранения поля магнит будет характеризоваться точкой, практически близкой к  $A$ , т. е. система будет магнитностабильной в том смысле, как условились выше. Рассмотрим теперь действие поля  $-\Delta H$ . При наличии этого поля рабочей будет точка  $E$ . После устранения поля магнитное состояние, изменяясь по прямой возврата, определится точкой  $F$ , т. е. магнитные свойства изменятся необратимо. Если теперь на магнит действовать



Соответствующим образом для оценки влияния внешнего поля можно ввести понятие магнитоиндукционного коэффициента.

Температурный коэффициент магнитной индукции зависит, кроме химического состава и структуры материала, от относительных размеров магнита (коэффициента размагничивания), степени предварительного размагничивания, а также (в общем случае) от  $t_0$  и  $\Delta t$ . Это иллюстрируется рис. 56, на котором изображена зависимость размагничивающего участка гистерезисной петли от температуры для сплава алкомакс III (железоникель-алюминиевый сплав с кобальтом, медью и ниобием). Из рисунка видно, что в зависимости от величины коэффициента размагничивания  $\alpha_B$  может быть положительным, отрицательным и равным нулю.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что для оценки обратимых температурных изменений надо знать не только марку сплава, но и коэффициент размагничивания и степень предварительного размагничивания.

Практически чаще всего наибольший интерес представляют

температурные зависимости не постоянного магнита, а магнитной системы, т. е. магнита с арматурой из магнитномягкого материала. Такие данные могут быть получены только на основании экспериментальных исследований магнитных систем.

Стабильность свойств магнитотвердых материалов из-за трудности определения и неопределенности температурного коэффициента не нормируются. Исключение представляют барьерные магниты, для которых, как показали исследования,  $\alpha_B$  не зависит от  $N$ . Для них  $\alpha_B$  — отрицательный, приблизительно равен  $0,2\%/1^\circ\text{C}$  в интервале от  $-65$  до  $+200^\circ\text{C}$ . Для металлических магнитотвердых материалов в области точки  $(BH)_{\max}$  ориентировочно можно считать, что  $\alpha_B$  меняется в пределах от  $-0,01\%/1^\circ\text{C}$  до  $-0,05\%/1^\circ\text{C}$ , т. е. имеет значения приблизительно в десять раз меньшие, чем у оксидных магнитов.

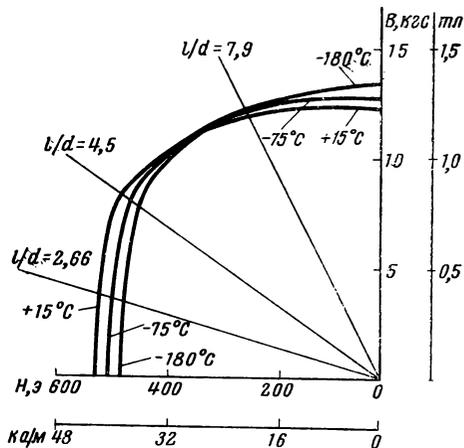


Рис. 56. Зависимость размагничивающей кривой от температуры для сплава алкомакс III (по данным Клегга)

## § 20. НАМАГНИЧИВАНИЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Важнейшим вопросом эффективного использования магнитно-твердых материалов является высокое качество намагничивания систем с постоянными магнитами.

Обычно магниты (кроме магнитов из феррита бария) намагничиваются после сборки системы, так как при этом после магнитной стабилизации значение индукции в зазоре оказывается больше, чем при намагничивании без системы, с последующей сборкой и магнитной стабилизацией (рис. 57). На рисунке  $OA$  — линия коэффициента намагничивания, характеризующая магнитную систему после сборки;  $OC$  — линия коэффициента размагничивания для магнита без арматуры;  $B_1$  и  $B_2$  — индукции в зазоре, получаемые после магнитной стабилизации соответственно для системы, намагниченной до и после сборки.

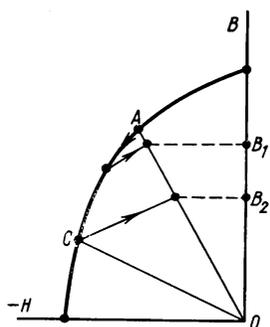


Рис. 57. Изменение магнитного состояния при намагничивании до и после сборки

Намагничивание до сборки связано также и с трудностями технологического характера, возникающими при сборке устройства с намагниченым магнитом (необходимость иметь немагнитный инструмент, возможность засорения ферромагнитной пылью и т. п.). Исследования показали, что для получения предельных магнитных характеристик напряженность намагничивающего поля должна быть в 5—7 раз больше коэрцитивной силы. Эти данные относятся к тому случаю, когда весь объем магнита пронизывается полем указанной величины, что имеет место, например, при намагничивании магнита с плоскопараллельными полюсами, зажатого между полюсами электромагнита постоянного тока. В большинстве случаев из-за влияния потоков рассеивания, магнитного сопротивления воздушных промежутков, вихревых токов (при намагничивании переменным полем) значение намагничивающего поля должно быть больше указанного и соответствовать 3000—10 000 э.

Для создания полей такой величины в объеме, достаточном для помещения в зазор магнитной системы, требуются значительные намагничивающие ампервитки. При одновитковом намагничивании, которое применяется в ряде случаев, для этого необходимо иметь токи в десятки тысяч ампер.

Применяется намагничивание в установках, питаемых постоянным током, переменным, при одновременном действии постоянного и переменного токов, а также импульсное.

Намагничивание постоянным током производится в электро-

магнитах\*. Такие электромагниты получаются громоздкими и для них требуются мощные источники питания.

Например, пермеамер сильных полей установки типа У-541, создающий поле, равное 4000 э в зазоре 50 мм, имеет массу, равную 250 кг, а электромагнит, созданный для намагничивания постоянных магнитов, при поле в 40 000 э и зазоре 12 мм потребляет мощность, равную 28 квт.

На переменном токе требуемое значение тока в результате применения трансформаторов получить относительно просто. Однако в этом случае возникают другие трудности: нельзя гарантировать высокое качество намагничивания, так как в зависимости от того, при каком мгновенном значении тока произойдет выключение, магнит может оказаться намагниченным хуже, лучше и даже совсем не намагниченным. Для устранения этого недостатка надо или обеспечить выключение тока при достижении им максимального значения, или иметь большой запас по намагничивающему току, что уменьшает вероятность плохого намагничивания.

Следует также иметь в виду влияние вихревых токов, действие которых приводит к тому, что в результате затухания электромагнитной волны при ее проникновении в глубь металла внутренний объем магнита может оказаться ненамагниченным.

Связь между минимальной продолжительностью импульса  $T$ , при которой весь объем магнита промагничивается, размерами магнита и его физическими свойствами может быть представлена следующей эмпирической формулой:

$$T = 8K \frac{B}{H} D^2 \cdot 10^{-10} \text{ [сек]}, \quad (62)$$

где  $K$  — удельная проводимость материала магнита (для железоникельалюминиевых сплавов  $K = 1,7 \cdot 10^4 \text{ ом}^{-1}$ );

$B$  — индукция в магните, гс;

$H$  — напряженность намагничивающего поля, э;

$D$  — эффективный диаметр магнита, см.

Практическое осуществление метод намагничивания переменным током нашел в ударном трансформаторе (рис. 58).

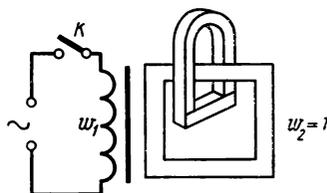


Рис. 58. Схематическое устройство ударного трансформатора

\* Гордон А. В. и Сливинская А. Г. Электромагниты постоянного тока. Госэнергоиздат, 1960.

Трансформатор состоит из первичной обмотки  $\omega_1$  с большим числом витков и вторичной обмотки  $\omega_2 = 1$  в виде короткозамкнутой толстой медной шины. При размыкании ключом  $K$  цепи первичной обмотки во вторичной возникает импульс тока в несколько десятков тысяч ампер, который и используется для намагничивания магнита.

Б. М. Яновский предложил производить намагничивание по идеальной кривой, для получения которой магнит помещают в постоянное поле и одновременно воздействуют на него переменным полем с убывающей до нуля амплитудой. При этом значение постоянного тока, необходимое для намагничивания до насыщения, может быть взято приблизительно в три раза меньше, чем при отсутствии переменного поля.

Для намагничивания широкое применение находят схемы, в которых используется явление заряда и разряда мощной батареи конденсаторов. Для исключения колебаний в таких схемах применяют различные выпрямляющие устройства, позволяющие пропускать ток в одном направлении, т. е. производить импульсное намагничивание.

Установки с импульсным намагничиванием накапливают энергию в конденсаторе длительно, а отдают ее в процессе разряда за короткий промежуток времени. Поэтому для создания мощного импульса не требуется большого тока потребления, что позволяет использовать для питания установки обычную осветительную сеть. К достоинствам импульсных установок надо отнести также их малые габариты и относительную простоту устройства.

Одна из возможных схем импульсной намагничивающей установки приведена на рис. 59.

Рассматриваемое устройство может быть использовано не только для намагничивания магнитных систем, но также и для их размагничивания. В первом случае должен быть замкнут штепсельный разъем  $HУ$  и разомкнут штепсельный разъем  $PУ$ , во втором случае — наоборот.

Рассмотрим работу схемы в качестве намагничивающего устройства. При замыкании ключа  $K$  напряжение сети подается через трансформатор  $Tr$  в обмотку реле  $P_1$ , которое срабатывает и замыкает контакт  $K_1$ , создавая тем самым цепь заряда конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  (через выпрямитель  $B$ , зарядное сопротивление  $r_1$ , контакт  $K_1$  и штепсельный разъем  $HУ$ ). Емкости конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  равны  $700 \text{ мкф}$ .

Вольтметр  $V$ , включенный через делитель напряжения (сопротивления  $r_2$  и  $r_3$ ), измеряет текущее напряжение на емкостях. В зависимости от необходимой величины тока в импульсе схема позволяет при помощи сопротивления  $r_4$  устанавливать максимальное значение зарядного напряжения от 600 до 1000 в. При достижении заданного значения напряжения срабатывает реле

$P_2$  и размыкает через контакт  $K_2$  цепь питания реле  $P_1$ . Контакт  $K_1$  размыкается, и процесс заряда емкостей заканчивается.

Нажатием кнопки  $A$  подается питание на реле  $P_3$ , которое, замкнув контакты  $K_3$ , создает цепь питания игнитрона  $I$ . Игнитрон зажигается, и батарея конденсаторов разряжается через намагничивающую катушку, подключенную к зажимам  $1$  и  $2$ . В цепь разряда входят также сопротивления  $r_5 = 10^{-2}$  ом и  $r_6$ . Первое сопротивление используется при включении осциллографа для наблюдения намагничивающего импульса. Второе сопротивление необходимо для исключения возможности возник-

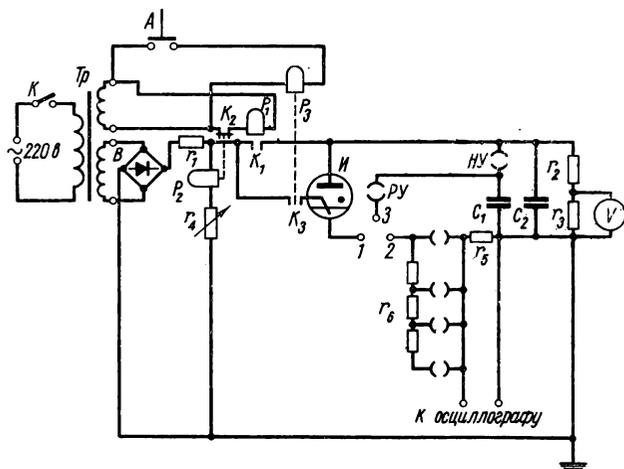


Рис. 59. Принципиальная схема установки для импульсного намагничивания

новения обратной полуволны и устанавливается в зависимости от индуктивности намагничивающей обмотки с магнитом.

При использовании схемы для размагничивания штепсель переставляется из гнезда  $HУ$  в гнездо  $PУ$ , а к зажимам  $1$ ,  $2$  и  $3$  подключается размагничивающее устройство. Оно представляет собой воздушный трансформатор с двумя обмотками. Начала обмоток соединяются с зажимами  $1$  и  $3$ , а концы — с зажимом  $2$ . В данном случае при включении питания заряжается только конденсатор  $C_2$ . Во время его разряда через игнитрон и первичную обмотку размагничивающего трансформатора во вторичной цепи, представляющей собой колебательный контур, состоящий из индуктивности обмотки и емкости  $C_1$ , возникают затухающие колебания. Они создают переменное поле с убывающей до нуля амплитудой, которое и используется для размагничивания.

Техника намагничивания зависит от формы и размеров магнита.

Подковообразные магниты можно намагничивать, например, так, как показано на рис. 60.

Устройство для намагничивания состоит из железной плиты с малым магнитным сопротивлением, на котором располагается катушка с большим числом витков. Магниты ставят на плиту, охватывая катушку и замыкая полюса через железо. Установка позволяет осуществить одновременное намагничивание большого числа магнитов.

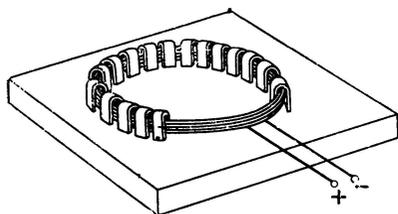


Рис. 60. Намагничивание подковообразных магнитов на плите

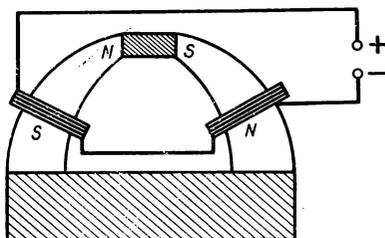


Рис. 61. Намагничивание рогообразных массивных магнитов

Для намагничивания массивных магнитов рогообразной формы массой до 50—100 кг применяют метод последовательного намагничивания, заключающийся в следующем. На магниты одевают плоские катушки и полюса замыкают железными перемычками (рис. 61).

Катушки рассчитывают так, чтобы при включении тока магнит промагнитился в месте их расположения до насыщения. Включают ток, т. е. промагнитывают участок под катушками. Ток выключают, катушки передвигают по магниту, включают ток, снова передвигают катушки и так до полного сближения катушек.

Приведенные примеры показывают, что каждый раз, исходя из конкретных условий задачи, надо продумывать вопрос о методе намагничивания и выборе конструкции намагничивающего устройства.

## § 21. СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Fe — Ni — Al. СВОЙСТВА И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Сплавы на основе Fe — Ni — Al являются важнейшими современными материалами для постоянных магнитов. Они были открыты в 1932 г. и с тех пор интенсивно изучаются и совершенствуются. Большой вклад в эту область науки и техники внесли советские ученые Б. Г. Лившиц, А. С. Займовский, В. С. Месь-

кин, О. С. Иванов, Ю. А. Скаков и др. Однако и до настоящего времени в области теории, объясняющей причины высококоэрцитивного состояния этих сплавов, имеется много неясных вопросов.

В 1938 г. Брэдли и Тейлором была построена политермическая диаграмма состояния системы Fe—Ni—Al\*. В дальнейшем эта диаграмма была уточнена О. С. Ивановым.

Высококоэрцитивное состояние сплавов объяснялось вначале как результат возникновения больших напряжений в кристаллической решетке. Если бы эти предположения были правильными, то наилучшие магнитные свойства должен был бы иметь сплав, подвергнутый резкой закалке на твердый раствор с последующим отпуском (двойная обработка). Однако В. С. Меськин, А. С. Займовский и Б. Г. Лившиц на основании экспериментальных данных показали, что оптимальные свойства получают лишь в том случае, если охлаждение сплава происходит с определенной для каждого сплава скоростью, названной *критической скоростью охлаждения* (обработка II типа). Рис. 62 иллюстрирует это положение. Теория напряжений не могла объяснить наличия критической скорости охлаждения.

В дальнейшем было установлено, что большую роль в образовании высококоэрцитивного состояния этих сплавов играет механизм дисперсионного твердения. Применение новейших методов исследований (рентгеноструктурного, электронной микроскопии и др.), а также теоретические исследования в области ферромагнетизма позволили установить, что при определенных условиях охлаждения Fe—Ni—Al сплавов образуются высокодисперсные частицы, принадлежащие к фазам  $\beta$  и  $\beta_2$ , причем

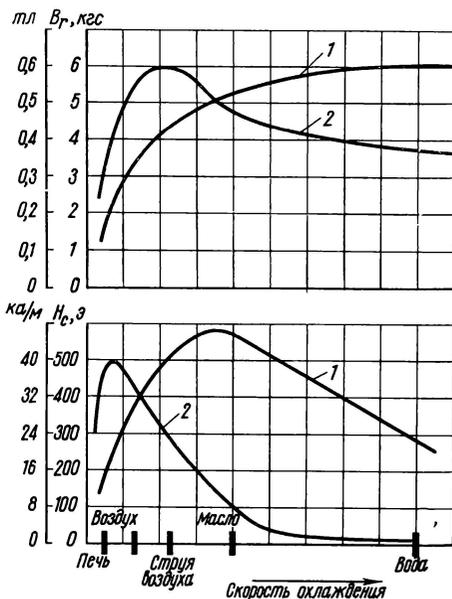


Рис. 62. Зависимость магнитных свойств сплавов от скорости охлаждения:  
1 — 32% Ni; 12% Al; 2 — 25% Ni; 15% Al

\* В схематическом виде эта диаграмма была построена в 1933 г. Кестером.

$\beta$ -фаза близка по составу к чистому железу, т. е. ферромагнитна, и имеет форму удлинённых пластинок при однодоменной толщине, а  $\beta_2$ -фаза представляет собой твердый раствор железа на основе Ni—Al и является слабомагнитной\*. Таким образом получается система в виде немагнитной матрицы  $\beta_2$  с однодоменными ферромагнитными включениями  $\beta$ .

Для намагничивания таких систем требуются весьма большие поля или, что то же, эти материалы обладают большой коэрцитивной силой, так как намагничивание происходит только за счет процессов вращения. Например, Е. И. Кондорский показал, что для железного порошка, состоящего из частиц с размерами в 0,01 мк, изолированных друг от друга немагнитной матрицей, коэрцитивная сила равна 530 э.

Особенности дисперсионного твердения позволили объяснить существование критической скорости охлаждения. При условиях, отличных от оптимальных,  $\beta$ -фаза может оказаться обедненной железом, а  $\beta_2$ -фаза, наоборот, обогащенной им, или не будет получена необходимая степень дисперсности и т. п., что вызовет уменьшение коэрцитивной силы.

Дальнейшие исследования показали также, что  $\beta_2$ -фаза в сплаве находится в условиях сильного всестороннего сжатия, а  $\beta$ -фаза испытывает столь же сильные растягивающие напряжения со стороны  $\beta_2$ -фазы, что обуславливает существование сильных структурных напряжений.

Большинство ученых в настоящее время считают, что высококоэрцитивное состояние Fe—Ni—Al сплавов объясняется однодоменной структурой и сильными внутренними напряжениями этих сплавов. Однако вопрос нельзя считать окончательно решенным, имеются и другие точки зрения. Например, некоторые авторы считают, что роль внутренних напряжений очень мала.

В настоящее время Fe—Ni—Al сплавы без легирующих элементов не находят применения из-за сравнительно низких магнитных свойств. Наибольшее применение имеют сплавы с медью и с кобальтом. Высококобальтовые сплавы, содержащие больше 15% Co, как правило, применяют с магнитной или с магнитной и кристаллической текстурой.

Рассмотрим влияние различных элементов на свойства сплавов, а также особенности сплавов с магнитной и с кристаллической текстурой.

**Влияние никеля и алюминия.** Практическое значение имеют сплавы, содержащие 20—33% Ni и 11—17% Al. На рис. 63 приведена зависимость свойств тройных Fe—Ni—Al сплавов от концентрации никеля и алюминия. Анализ представленных зависимостей позволяет сделать следующие выводы.

---

\* Обозначение « $\beta$ -фазы» было введено Брэдли и Тейлором для фаз с решеткой объемноцентрированного куба.

Повышение содержания Ni вызывает уменьшение остаточной индукции  $B_r$  и увеличение коэрцитивной силы  $H_c$  и  $(BH)_{\max}$  \*. При этом возрастание концентрации Ni свыше 27% на свойства сплава влияет мало. Из рис. 63 видно, что при больших содержаниях Al увеличение содержания Ni до 30% вызывает даже уменьшение  $(BH)_{\max}$  по сравнению со сплавом с 27,5% Ni. Критическая скорость  $v_{кр}$  при увеличении содержания Ni возрастает.

Повышение содержания Al (свыше 10%) вызывает сначала увеличение  $H_c$  и  $(BH)_{\max}$ , а после перехода этих величин через максимум (12,5—14% Al) — их уменьшение. В высоконикелевых сплавах оптимальное содержание смещается в сторону больших величин. Остаточная индукция при увеличении концентрации Al уменьшается. Зависимости для некоторых сплавов имеют при этом аномальный характер. Критическая скорость по мере увеличения содержания Al падает.

Наибольшей удельной энергией обладают сплавы с содержанием приблизительно 27,5% Ni и 14% Al. Однако критическая скорость охлаждения таких сплавов является высокой и не может быть практически обеспечена для массивных (более 0,2—0,3 кг) магнитов. Поэтому можно считать, что при самом правильном выборе состава сплава и оптимальной термической обработке массивные магниты или магниты сложной конфигурации из Fe—Ni—Al сплавов имеют более низкие свойства, чем мелкие. ГОСТ 4402—48 допускает снижение магнитных свойств для магнитов из таких сплавов при массе 2—5 кг на 10%.

В некоторых случаях стремятся не к получению наибольшей величины  $(BH)_{\max}$ , а к достижению определенного соотношения между  $B_r$  и  $H_c$ . Это может быть достигнуто как изменением состава сплава, так и выбором скорости охлаждения. Последнее положение иллюстрируется рис. 62, из которого видно, что максимумы  $B_r$  и  $H_c$  не совпадают \*\*.

**Влияние меди.** Медь является полезным легирующим элементом. В СССР новым стандартом \*\*\* на Fe—Ni—Al сплавы для постоянных магнитов предусматривается производство только сплавов с медью (сплавов системы Fe—Ni—Al—Cu).

Медь обеспечивает лучшую повторяемость характеристик, т. е. меньшую зависимость свойств сплавов от небольших изменений химического состава, наличия примесей и нарушения режима термообработки. Кроме того, медь улучшает механиче-

\* На рис. 63 вместо  $(BH)_{\max}$  представлена пропорциональная ей величина  $B_r H_c$ .

\*\* Немецкий стандарт на материалы для постоянных магнитов (DIN17410, проект) даже нормализует этот метод, предусматривая маркировку сплавов одного и того же состава буквой «K» (с повышенной  $H_c$ ) или буквой «R» с повышенной  $B_r$ ).

\*\*\* ГОСТ 9575—60 рассмотрен в конце данного параграфа.

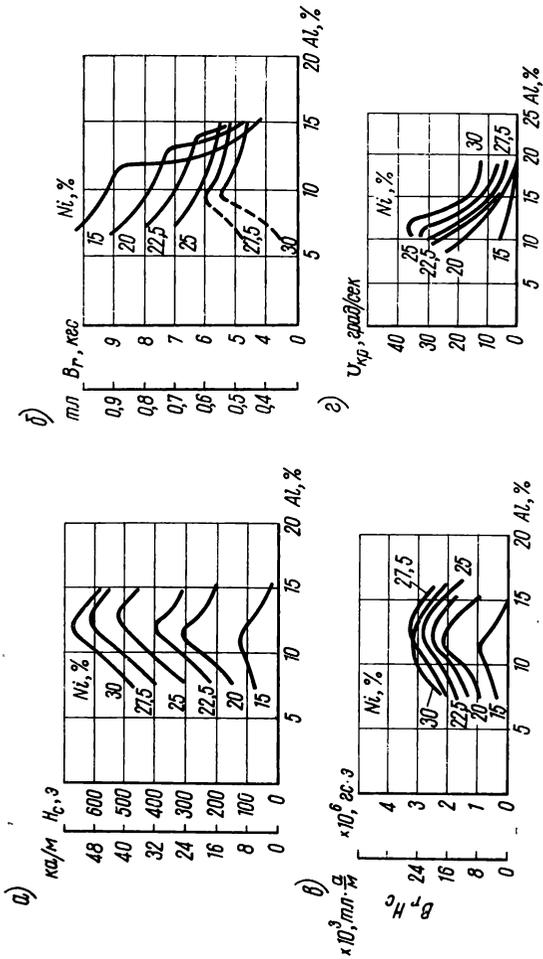


Рис. 63. Зависимость свойств Fe—Ni—Al сплавов от концентрации Ni и Al (образец сечением 12×12 мм), [Л. 29]

ские свойства сплавов (см. § 22). В отдельных случаях сплавы с медью могут конкурировать со сплавами, содержащими дорогой и дефицитный кобальт.

Влияние меди на магнитные свойства различно и зависит от содержания в сплаве никеля и алюминия. Для сплавов со сравнительно небольшим содержанием Ni наилучшие свойства соответствуют приблизительно сплавам с 4%-ным содержанием меди (рис. 64). Для сплавов с большим содержанием никеля (26—

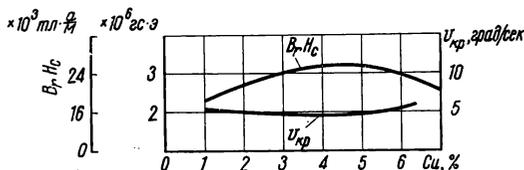


Рис. 64. Влияние меди на магнитные свойства и критическую скорость охлаждения при содержании 23,5% Ni и 14,7% Al [Л. 29]

32%) по данным А. А. Шекалова содержание меди целесообразно увеличивать до 8—12%. При этом в условиях оптимальной термической обработки свойства получаются в среднем на 20% выше, чем в сплавах без меди или с ее незначительным содержанием (4%).

В табл. 20 приведены Fe—Ni—Al—Cu сплавы, не требующие специальной термообработки. Таблица хорошо иллюстри-

Таблица 20

Зависимость между массой магнитов и химическим составом Fe—Ni—Al—Cu сплавов при условии получения оптимальных свойств \* без применения специальной термообработки [Л.3]

Масса магнита, г	Содержание элементов**, %		
	Ni	Al	Cu
5—15	27—28	12—13	—
20—100	26—27	13—14	—
150—250	24—26	14—14,5	3,5—5
300—500	23—24	15—15,5	3,5—6
1000—2000	23—24	15,6—16,0	3,5—5
2500—3500	23—24	16,0—16,5	3,5—5
5000—6000	23—24	16,5—17	3,5—5

\* Магниты из этих сплавов имеют следующие свойства:  $H_c = 450—580 \text{ э}$ ;  $B_r = 4500—6200 \text{ гс}$ ,  $(BH)_{\text{max}} = (3 \div 2,3) \cdot 10^6 \text{ гс} \cdot \text{э}$ .

\*\* Остальное железо.

рует зависимость критической скорости охлаждения, которая определяется массой магнита, от концентрации Ni и Al в сплаве.

**Влияние кобальта.** Легирование Fe—Ni—Al сплавов кобальтом позволило существенно улучшить их магнитные свойства и, что особенно важно, не только увеличивая  $H_c$ , что можно сделать добавляя Ni или Cu, но и повышая остаточную индукцию и коэффициент выпуклости. А. С. Займовский с сотрудниками установил, что кобальт должен вводиться не только за счет железа, но и за счет части никеля и алюминия. При таких условиях остаточная индукция получается большей вследствие высокого насыщения железа, а большое значение коэрцитивной силы обеспечивается наличием кобальта.

Наилучшие составы Fe—Ni—Al—Co: 20—22% Ni; 9—12% Al; 5—10% Co, которым соответствуют  $B_r$ , равная 6500—8000 гс (вместо 5000—6000 гс в сплавах без кобальта) и  $H_c$ , равная 550—400 э.

Исследования показали, что и для кобальтовых сплавов легирование медью является полезным. Медь незначительно повышает магнитную энергию, но главным образом улучшает условия термической обработки. Это объясняется следующим образом. Кобальт существенно понижает критическую скорость охлаждения и распад твердого раствора по схеме  $\beta_2 \rightarrow \beta + \beta_2$  идет очень вяло. Медь повышает эту скорость. Однако это оказывается недостаточным и термообработка сплавов с кобальтом требует двух этапов: охлаждения с критической скоростью, что обеспечивает получение высоких значений  $B_r$ , и отпуска для получения больших значений коэрцитивной силы.

**Влияние других элементов.** Титан в количестве 0,3% увеличивает механическую прочность сплава за счет измельчения величины зерна, а в количестве нескольких процентов (2—5%) может быть использован для получения сплавов с большой коэрцитивной силой и с различным отношением  $B_r/H_c$  при более или менее постоянном значении  $(BH)_{\max}$ .

Сера в количестве 0,1—0,2% резко повышает механические свойства сплава, не снижая при этом магнитных свойств.

Ниобий используется в количестве 0,5—1,5% и несколько увеличивает магнитные свойства, повышая  $H_c$ ,  $B_r$  и, следовательно,  $(BH)_{\max}$ .

Кремний, марганец и углерод можно рассматривать не как легирующие элементы, а как вредные примеси\*. Наиболее опасной примесью является углерод, его содержание в сплаве не должно, в соответствии с принятыми стандартами, превы-

---

\* До последнего времени кремний использовался в сплаве АНК для повышения  $H_c$ . Однако этот сплав содержит много никеля (33%) и в настоящее время вытесняется другими марками.

шать 0,03%. Содержание кремния допускается не свыше 0,15%, а марганца 0,35%.

**Особенности сплавов с магнитной текстурой** (термообработанных в магнитном поле). В 1938 г. Оливер и Шедден значительно улучшили магнитные свойства Fe—Ni—Al—Co сплавов, используя термомагнитную обработку, т. е. охлаждение сплава от высоких температур в магнитном поле. При этом возрастание магнитных характеристик происходило лишь в направлении действия поля, т. е. материал становился магнитноанизотропным или, другими словами, приобретал магнитную текстуру.

Дальнейшие исследования показали, что применение термообработки имеет смысл лишь для сплавов с большим содержанием кобальта. Например, для сплавов с 12% Co термомагнитная обработка увеличивает магнитную энергию приблизительно на 20%, а для сплавов с содержанием 20—25% Co увеличение происходит в ряде случаев на 80% и более. При этом  $H_c$  практически не меняется, а увеличиваются  $B_r$  и выпуклость  $\gamma$  кривой.

Можно дать следующее объяснение влиянию термомагнитной обработки на высококобальтовые сплавы. Кобальт действует в двух направлениях: понижает критическую скорость охлаждения и повышает точку Кюри (для Co точка Кюри равна 1150°С, а для Fe — 768°С). Низкое значение критической скорости охлаждения обеспечивает необходимое для образования магнитной текстуры время. Повышение точки Кюри приводит к тому, что в момент перехода вещества при охлаждении из парамагнитного в ферромагнитное состояние металл имеет еще достаточную для деформации доменов пластичность.

Работами ряда авторов (Л. А. Шубиной и Я. С. Шура, Китаеля и др.) показано, что магнитная текстура связана с упорядоченным расположением пластинчатых выделений  $\beta$ -фазы, которые располагаются преимущественно под небольшими углами к направлению поля. Векторы намагниченности доменов располагаются вдоль продольных осей пластинок и, следовательно, составляют с направлением термомагнитной обработки углы, близкие к нулю или к 180°.

Намагничивание таких сплавов в основном состоит из двух процессов: инверсии антипараллельно направленных векторов  $J$  («опрокидывания») и незначительного увеличения намагниченности за счет процесса вращения. Так как конфигурация доменов в рассматриваемой системе является устойчивой, то намагниченность после снятия намагничивающего поля уменьшится очень мало, только за счет небольшого обратного вращения, т. е.  $4\pi J_S \rightarrow B_r$ , чего нельзя сказать для нетекстурованных материалов.

Размагничивание возможно лишь за счет поворота части доменов на 180°, для чего требуются большие поля, зато после до-

стижения этой величины поля процесс будет идти быстро, т. е. кривая размагничивания стремится к прямоугольной форме.

Для увеличения в таких сплавах  $B_r(J)$  концентрацию Ni и Al в них уменьшают (Ni до 14—15%; Al до 8—9%) и увеличивают содержание Fe, как составляющей с большим насыщением.

**Особенности сплавов с кристаллической и магнитной текстурой.** Дальнейшее существенное повышение магнитных свойств Fe—Ni—Al—Cu—Co сплавов оказалось возможным в результате создания магнитов с особой макроструктурой в виде столбчатых кристаллов. Это явление было открыто Эвелином и Буром. При этом наблюдается увеличение всех магнитных параметров:  $B_r$ ,  $H_c$ ,  $\gamma$  (наиболее существенно возрастает  $\gamma$ ). Магнитная энергия магнитов повышается по сравнению с обычной кристаллизацией на 60—70% (рис. 65). Влияние макроструктуры в виде

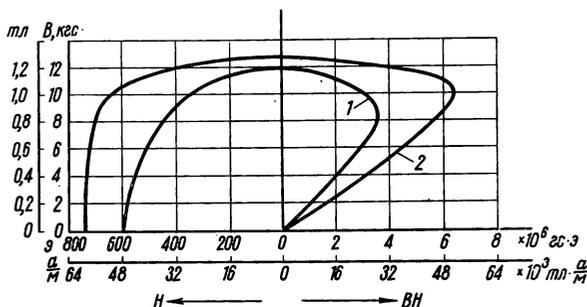


Рис. 65. Влияние кристаллической текстуры на магнитные свойства сплава АНКс-4Нб:

1 — сплав с магнитной текстурой; 2 — сплав с магнитной и кристаллической текстурами (по данным А. А. Шекалова)

ориентированных столбчатых кристаллов на величину магнитной энергии объясняется следующим: а) кристаллографическая текстура создается в направлении легкого намагничивания, а как показывают опыты, проведенные на монокристаллах, гистерезисная петля в этом направлении имеет наибольшие значения  $B_r$  и  $\gamma$ ; б) магнитная ось в столбчатом кристалле пересекает меньше границ зерен, т. е. имеет меньше разрывов в доменной цепи, чему соответствует более устойчивая конфигурация доменов.

Эвелин и Бур считают\*, что около двух третей улучшения магнитных свойств происходит от воздействия первой причины и одной трети — от второй. Создание направленной кристаллизации достигается посредством особых условий охлаждения сплава (см. § 22).

\* Eveling D. a. Burr A., Journ. of Metals, v. 5, 1953, N. 4, p. 537.

В настоящее время в СССР выпуск Fe—Ni—Al сплавов производится в соответствии с ГОСТ 9575—60 (новый стандарт) и ГОСТ 4402—48 (старый стандарт). Временное сохранение старого стандарта объясняется тем, что некоторые ранее выпускавшиеся марки сплавов не вошли в новый ГОСТ, а производство изделий с этими сплавами продолжается.

Сравнение нового и старого стандартов показывает следующее. Изменены обозначения марок сплавов. Раньше марки обозначались первыми буквами названий элементов, входящих в состав сплава\*.

В новом ГОСТ приняты следующие обозначения: Ю — алюминий; Н — никель; Д — медь; К — кобальт; Т — титан; Б — ниобий; А — кристаллическая текстура. Наличие магнитной текстуры не обозначается, но она подразумевается всегда при содержании кобальта свыше 15%. Например, обозначение ЮНДК25БА свидетельствует о том, что это сплав с магнитной и кристаллической текстурой, содержащий алюминий, никель, медь, 25% кобальта и ниобий.

ГОСТ 4402—48 содержит восемь марок сплавов ( $B_r = 4000—12\,000$  гс;  $H_c = 250—750$  э;  $(BH)_{\max} = (0,7—4,0) \times 10^6$  гс·э); ГОСТ 9575—60 содержит одиннадцать марок сплавов ( $B_r = 5000—13\,300$  гс;  $H_c = 500—1080$  э;  $(BH)_{\max} = (0,9—6,6) \cdot 10^6$  гс·э). Из прежних марок исключено четыре (АН1; АН2; АНК; АНК01), как не обладающие какими-либо преимуществами по сравнению с другими, и включено семь новых марок.

Все сплавы по новому ГОСТ содержат медь (3—4%, а бескобальтовые сплавы ЮНД12 и ЮНД8 соответственно 12% и 8%). Несколько процентов титана (ЮНДК35Т5 и ЮНДК24Т2) применено для повышения  $H_c$ , а титан в количестве 0,3% (для большинства других сплавов) — для улучшения механических свойств. Ниобий (0,8%) несколько повышает коэрцитивную силу. Сера (0,1%) введена для повышения пластичности. Все сплавы должны содержать не более 0,15% кремния; 0,03% углерода; 0,35% марганца. Из одиннадцати марок семь текстурованных (пять с магнитной и две с магнитной и кристаллической текстурой).

Новый ГОСТ предусматривает нормирование магнитных свойств не только по величинам  $B_r$  и  $H_c$ , но также и по значениям индукции  $B_D$  и напряженности поля  $H_D$  в точке с максимальной энергией  $(BH)_{\max}$ . Магнитные свойства Fe—Ni—Al сплавов для постоянных магнитов приведены в табл. 21, а кривые размагничивания и магнитной энергии — на рис. 66.

\* Например, АНК — алюминий, никель, кремний; АНК04 — алюминий, никель, кобальт; 4 — четвертая марка, отличающаяся от других подобных марок процентным содержанием кобальта.

Таблица 21

Магнитные свойства сплавов для постоянных магнитов  
(по данным ГОСТ 9575—60)

Марки сплавов	$B_r$		$H_c$		$B_D$		$H_D$		$(BH)_{\max}$		$(BH)_{\max}$		$\gamma$
	Т.л	zс	кал/м	э	Т.л	zс	кал/м	э	$\frac{(BH)_{\max}}{2}$		$(BH)_{\max}$	$\frac{(BH)_{\max}}{\times 10^{-6}}$	
									дж/м <sup>3</sup>	эрг/см <sup>3</sup>			
ЮНД4(АНЗ)	0,50	5000	40,0	500	0,30	3000	24,0	300	3600	36 000	7200	0,9	0,36
ЮНД12	0,50	5000	52,0	650	0,29	2900	30,0	375	4400	44 000	8800	1,1	0,34
ЮНД8	0,60	6000	44,0	550	0,37	3700	28,0	350	5200	52 000	10 400	1,3	0,39
ЮНДК15(АНК02)	0,75	7500	48,0	600	0,43	4300	28,0	350	6000	60 000	12 000	1,5	0,33
ЮНДК18 (АНК03)	0,90	9000	55,0	690	0,57	5700	34,0	425	9700	97 000	19 400	2,4	0,38
ЮНДК35Т5	0,80	8000	87,0	1080	0,50	5000	56,0	700	14 000	140 000	28 000	3,5	0,40
ЮНДК24Т2	1,10	11 000	58,0	725	0,77	7700	38,0	475	14 800	148 000	29 600	3,7	0,46
ЮНДК24(АНК04)	1,23	12 300	44,0	550	0,95	9500	34,0	425	16 000	160 000	32 000	4,0	0,59
ЮНДК24Б	1,20	12 000	51,0	640	0,85	8500	37,0	465	16 000	160 000	32 000	4,0	0,52
ЮНДК25А	1,33	13 300	54,0	675	1,14	11 400	46,0	575	26 400	264 000	52 800	6,6	0,74
ЮНДК25БА	1,28	12 800	62,0	775	1,05	10 500	50,0	625	26 400	264 000	52 800	6,6	0,67

Примечания: 1.  $B_D$  и  $H_D$  — индукция и напряженность поля в точке  $(BH)_{\max}$ ;  
2.  $\gamma$  — коэффициент выдуклости.

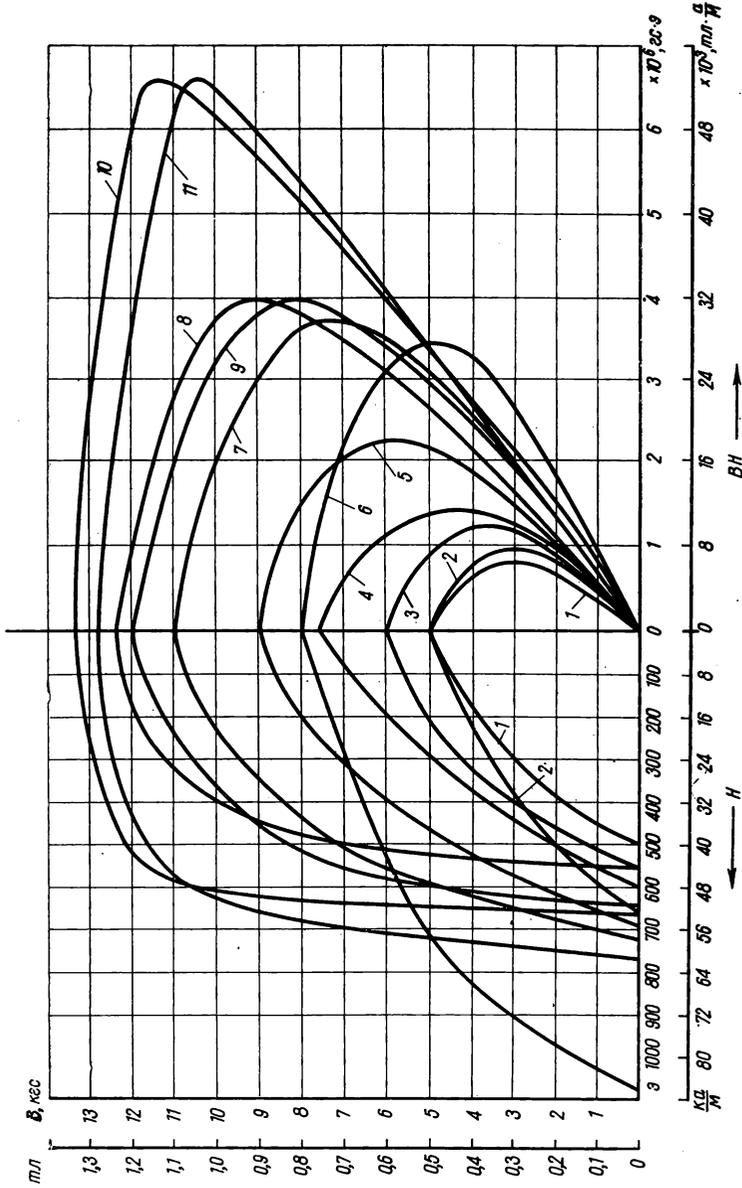


Рис. 66. Кривые размагничивания и энергии сплавов (по данным ГОСТ 9575—60):  
 1 — ЮНД4 (АНЗ); 2 — ЮНД12; 3 — ЮНД8; 4 — ЮНДК15 (АНК02); 5 — ЮНДК18 (АНК03); 6 — ЮНДК35Т5;  
 7 — ЮНДК24Т2; 8 — ЮНДК24 (АНК04); 9 — ЮНДК24Б; 10 — ЮНДК25А; 11 — ЮНДК25БА

Наибольшее применение в настоящее время имеют сплавы ЮНД4 (АНЗ), ЮНДК24 (АНКо4), ЮНДК15 (АНКо2). Сплавы ЮНД4 и ЮНДК24 хорошо технологически освоены и многие магнитные системы проектировались именно для применения этих сплавов. Кроме того, ЮНД4 является самым дешевым из всех Fe—Ni—Al сплавов для постоянных магнитов\*, а ЮНДК24 обладает высокими магнитными свойствами в направлении магнитной текстуры. Сплав ЮНДК15 применяют в том случае, когда требуются сравнительно высокие магнитные свойства, и материал не должен обладать магнитной анизотропией.

Введение нового ГОСТ должно существенно изменить характер потребления различных марок. Перспективными являются сплавы ЮНД8 и ЮНД12, как не содержащие дорогого и дефицитного кобальта, а также и другие сплавы, например сплавы с кристаллической текстурой, когда будет освоена технология их массового производства.

## § 22. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЫХ МАГНИТОВ И ОСОБЕННОСТИ ИХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Сплавы, применяемые для постоянных магнитов, относятся к прецизионным, т. е. к таким, качество которых в очень большой степени определяется выполнением технологии. Даже небольшие отклонения в составе шихты, организации процесса литья и режима термической обработки приводят к непоправимому браку. Марки шихтовых материалов должны соответствовать ГОСТ 9575—60.

Наиболее вредной примесью является углерод, суммарное количество которого ограничивается 0,03%, поэтому железо применяется только марки «Армко А». Применение для этой цели сталей типа Ст. 10 недопустимо. Ниобий и сера вводятся не в чистом виде, а как соединения с железом. При этом расчет шихты должен учитывать количество железа, введенное вместе с легирующими элементами.

Резка шихтовых материалов для загрузки в тигель производится на пресс-ножницах. Методы, связанные с нагревом (автоген или электрорезка), применять не рекомендуется.

Все материалы перед загрузкой тщательно очищаются от грязи, масла, окислов и т. п. В шихту может добавляться литейный возврат.

Плавку необходимо вести в высокочастотных индукционных печах, которые обеспечивают необходимые условия для получе-

---

\* Стоимость 1 кг сплава ЮНД4 равна 1,55 руб., сплава ЮНДК15—6,6 руб. и сплава ЮНДК24—10 руб.

ния высококачественного сплава: энергичное перемешивание металла, быстроту плавки (плавка в 3 кг осуществляется приблизительно за 5 мин; в 10 кг — за 25—30 мин; в 100 кг — за 45—60 мин), уменьшение насыщения газами. Выполнение последнего условия обеспечивается потому, что отношение поверхности ванны к весу плавки для высокочастотных печей по сравнению со всеми другими печами наименьшее.

Порядок плавки следующий: вначале загружают и расплавляют железо, затем вводят никель, кобальт, медь и последним вводят алюминий. Его добавляют быстро и крупными кусками. Ванну перемешивают, выдерживают в течение 2—3 мин, затем очищают поверхность от шлака и ведут разливку.

Тигель должен иметь поворотное устройство для разливки сплава в ковш или опоки. Качество сплава существенно зависит от температуры разливки, которая должна выдерживаться равной 1500—1550° С. Понижение температуры приводит к появлению сыни и холодных спаев (как бы разделения магнита на части), а повышение ухудшает механические свойства (увеличивает хрупкость). Заливку надо вести быстро, не допуская разрыва струи металла.

В настоящее время применяются разные формы литья магнитов (в землю, в сухие формы, по выплавляемым моделям, в металлические формы, т. е. в кокиль). Наибольшее распространение имеют литье в землю (старый метод) и в сухие формы (новый метод).

При литье в землю форма обычно представляет собой стопу, состоящую из 5—8 опок. Высота опоки определяется требованиями прочности и обычно составляет 60—80 мм, для магнитов сложной формы высота опоки — 120—180 мм.

Опоки (кроме нижней) пронизываются вертикальным стояком с ответвляющимися от него шлаковиками. Расход сплава на стояк и шлаковики составляет (для мелких магнитов) до 90% общего веса металла. Образование паров при заливке вызывает возникновение пористости и раковин.

Размеры магнитов в верхних и нижних опоках (из-за того, что земля может раздаваться под действием веса металла) различны. Например, для магнита массой в 300 г разница размеров верхних и нижних магнитов может достигать 1,5 мм, поэтому вводят большие припуски. Затем магниты шлифуются, в результате чего получают нужные размеры магнитов.

Технология изготовления сухих форм заключается в следующем. На стальную шлифованную плиту 1 (рис. 67) с калеными и хромированными моделями 2 одевается кольцо 3. Затем формы набиваются массой 4, состоящей из кварцевого песка (например, люберецкого) и 2—3% крепителя. Форма закрывается крышкой 5 и переворачивается, после чего плита 1 и кольцо 3 снимаются. Формы сушат в печи при температуре 250° С в

течение 1—2 ч. Изготовленная таким образом форма обладает хорошей газопроницаемостью.

Высота формы определяется высотой магнита плюс 5—10 мм, т. е. значительно меньше высоты опоки при литье в землю. Сухие формы позволяют делать стопу в 80—100 опок вместо 5—8 опок при литье в землю. Это значительно увеличивает производственные возможности при тех же площадках.

Литье по выплавляемым моделям заключается в следующем. Пресс-форму заполняют легкоплавкой массой (например, смесью стеарина и парафина сметанообразной консистенции), которая застывает, приобретая форму магнита. Полученную модель погружают в жидкость, обладающую свойством смачивать ее поверхность, затем вынимают из ванны, помещают под струю песка и просушивают на воздухе. Такую операцию продельвают до тех пор, пока на модели не образуется достаточно толстый слой песка.

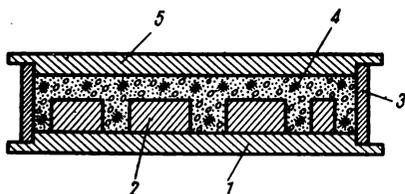


Рис. 67. Схема изготовления сухой формы

Потом массу выплавляют горячей водой и полученную форму просушивают при 750—850° С.

Изготовленные литьем по выплавляемым моделям магниты имеют хорошее качество поверхности, точно выдержанные размеры (соответствующие классам точности 4 и 5) и не требуют дополнительной механической обработки.

Недостатком метода является его высокая стоимость, однако он окупается при изготовлении магнитов сложной формы. Этот метод является прогрессивным и в настоящее время осваивается многими заводами.

Литье в кокиль применяется мало. Достоинства этого метода заключаются в возможности изготовления магнитов по высоким классам точности, а также в долговечности формы, которая может выдержать тысячи отливок. Недостатком является большая скорость охлаждения сплава, что вызывает ухудшение магнитных свойств, а также может служить причиной образования трещин, раковин и других дефектов.

Для устранения этих недостатков формы перед разливкой металла подогревают, а марки сплавов подбираются такие, которые имеют большую критическую скорость охлаждения.

В большинстве случаев для получения оптимальных свойств магнитов подвергают специальной термообработке.

Режимы термической обработки для разных марок сплавов различны. Так как магнитные свойства в значительной степени определяются качеством закалки, то особенное внимание надо обратить на выполнение этого процесса.

Особую обработку, так называемую термомагнитную, проходят материалы с магнитной текстурой. Эта обработка заключается в том, что магнит, нагретый до температуры 1250—1300° С, остывает в сильном магнитном поле (не менее 1500 э) до 500° С.

В зависимости от характера производства (массовое или мелкосерийное), а также от марки сплава и размеров магнита этот процесс может быть организован различно.

При мелкосерийном производстве возможно остывание магнитов между полюсами электромагнита непосредственно после отливки, т. е. в опоках. Однако при этом электромагнит не может быть использован эффективно, так как между полюсами нельзя обычно поместить больше одной опоки.

Достоинство метода заключается в том, что не требуется повторный нагрев магнита, т. е. исключается одна технологическая операция и, следовательно, обеспечивается экономия электроэнергии.

Чаще применяют метод, при котором магниты вынимают из опок, обрубая литники, обрабатывают на пескоструйном аппарате, нагревают до 1300° С и помещают в магнитное поле. В этом случае полезный зазор электромагнита может быть использован значительно эффективнее, чем при остывании в опоках.

Скорость остывания в магнитном поле существенно влияет на магнитные свойства. Поэтому для каждого размера и формы магнита экспериментально подбирают наиболее выгодные условия охлаждения.

В некоторых случаях магниты остывают открытыми, иногда их прикрывают асбестом, или даже помещают в камеру, нагретую до 500—600° С.

Обработанный указанным образом магнит приобретает магнитную текстуру, он имеет большие значения остаточной индукции и коэффициента выпуклости, но малую коэрцитивную силу.

Для увеличения  $H_c$  все магниты с магнитной текстурой подвергаются отпуску, который заключается в нагреве до 500° С и выдержке при этой температуре в течение 5 ч.

После отпуска магниты размагничивают и они поступают на механическую обработку.

Отметим некоторые особенности производства материалов с двойной (магнитной и кристаллической) текстурой.

Кристаллическая текстура придается материалу в процессе особых условий охлаждения сплава, залитого в форму.

Форма, выполненная, например, в виде кварцевой трубки, помещается в индукционную печь, внутрь которой вставлен нагреватель в виде графитовой трубки большего диаметра, чем кварцевая трубка. Нагреватель выполняет одновременно и роль электромагнитного экрана, предохраняя сплав от перемешива-

ния токами высокой частоты, что исключило бы возможность образования кристаллической текстуры.

Форма располагается на холодильнике, который может быть выполнен, например, в виде медного пустотелого сосуда с водяным охлаждением. Для предохранения поверхности холодильника, соприкасающейся со сплавом, от разрушения на дно формы помещают пластинку из никеля. Чтобы не было выброса расплавленного металла через низ, форму обмазывают по наружным краям смесью кварцевого песка с жидким стеклом. Перед заливкой форму прогревают до 1400—1450° С.

Температура расплавленного в другой индукционной печи и заливаемого через промежуточный ковш металла равна 1500—1580° С. Через несколько минут после заливки в месте соприкосновения с холодильником образуется твердый слой металла, и затем начинают медленно (со скоростью, равной приблизительно 10 мм/мин) опускать холодильник с формой.

Полученная таким образом отливка имеет кристаллическую текстуру, направленную по продольной оси формы. Затем отливка проходит обработку, предусмотренную для сплавов с магнитной текстурой (магнито).

Вместо кварцевой грубки можно применять формы, изготовленные методом литья по выплавляемым моделям.

Приведенная технология производства материала с кристаллической текстурой является ориентировочной. Заводские методы получения таких материалов еще разрабатываются.

В заключение рассмотрим вопросы, связанные с механической обработкой и монтажом магнитов из железоникельалюминиевых сплавов.

Ввиду чрезвычайной хрупкости и высокой твердости этих сплавов их обработка на металлорежущих станках затруднена. Смягчающий отжиг или изменение химического состава в заводской практике используется мало.

Единственной выполнимой операцией является шлифовка.

Магниты шлифуют на различных плоскошлифовальных или круглошлифовальных станках. Шлифовку рекомендуют проводить в два этапа: грубую (черновую) до термической обработки со съемом металла за проход 0,1—0,25 мм и тонкую (чистовую) после термической обработки со съемом металла за проход 0,01—0,05 мм. Шлифование в один этап увеличивает брак по трещинам.

Применяется также электроискровой метод обработки, но он требует специального оборудования, не позволяет выполнять все требуемые операции (чистовую обработку) и освоен далеко не на всех заводах.

На рис. 68 показана электрическая схема установки для шлифования магнитов электроискровым методом. Принцип работы заключается в следующем. Магниты 1 помещаются в ван-

ну 2 с керосином и периодически с помощью кулачкового механизма приводятся в соприкосновение шлифуемыми плоскостями. В момент разрыва цепи образуется электрическая дуга, под действием которой разрушаются неровности поверхности.

Производительность труда в 10 раз выше, чем при обработке на шлифовальных станках. Электроискровой метод пока применяют только для грубой шлифовки, доводка осуществляется на станках.

Особый интерес в отношении механической обрабатываемости представляют Fe—Ni—Al сплавы с медью. По данным

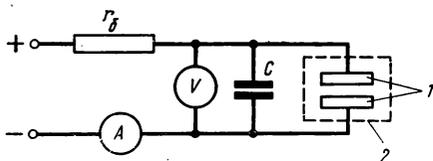


Рис. 68. Электрическая схема установки для шлифования магнитов электроискровым методом

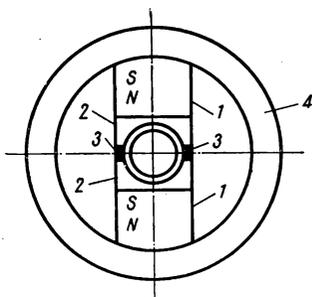


Рис. 69. Магнитная система с магнитами из Fe—Ni—Al сплава:

1 — магниты; 2 — полюсные наконечники из армо-железа; 3 — прокладка из немагнитного материала (латуни); 4 — стяжное кольцо из армо-железа

А. А. Шекалова\* сплав, содержащий 11% Al, 29% Ni и 10% Cu, допускает обработку победитовым резцом (со скоростью 12 м/мин при подаче 0,33 мм и глубине резания 0,3 мм) непосредственно после литья, а низкоалюминиевые сплавы с медью обрабатываются по такому же режиму и в закаленном высококоэрцитивном состоянии.

Особенности механических свойств магнитов из железоникельалюминиевых сплавов (невозможность выполнения резьбы, трудности осуществления отверстий и т. п.) требуют специальных решений при монтаже магнитной системы.

На рис. 69 показана удобная (в отношении монтажа) и хорошая с точки зрения магнитных свойств система, широко применяемая в измерительных механизмах магнитоэлектрических приборов.

\* Шекалов А. А. Новые материалы для постоянных магнитов. Изд-во ЛДНТП, 1960.

Сборка такой системы может быть выполнена без применения крепежной арматуры, например одеванием нагретого до нескольких сот градусов кольца 4 на детали 1, 2 и 3. При остывании кольцо стягивает всю систему.

Иногда в магнитах делают канавки, применяют литье на стальные или бронзовые втулки, под отверстия (литье со стержнями) и т. п.

## § 23. МАГНИТЫ ИЗ ПОРОШКОВ

К достоинствам порошковой металлургии относятся высокая производительность и возможность автоматизации производства, почти полное отсутствие потерь металла, а также получение изделий по высоким классам точности, не требующих (в большинстве случаев) механической обработки.

Следует отметить, что необходимость изготовления дорогих пресс-форм и наличия специализированного оборудования (прессов, печей с защитной атмосферой и др.) приводит к тому, что экономически выгодно применять порошковые методы лишь в условиях массового производства мелких (весом до нескольких сот граммов) магнитов или магнитов сложной конфигурации.

В § 17 было указано, что магниты, получаемые методами порошковой металлургии, можно разделить на металлокерамические, металлопластические, оксидные и из микропорошков.

Для первых двух групп магнитов физические процессы образования высококоэрцитивного состояния объясняются теми же причинами, что и для монокристаллических магнитов; для двух других групп измельченное состояние материала является необходимым условием получения высококоэрцитивных свойств.

**Металлокерамические магниты.** В настоящее время металлокерамические магниты изготовляют из Fe—Ni—Al сплавов, а также из деформируемых сплавов Cu—Ni—Co, Cu—Ni—Fe, Fe—Co—Mo, Pt—Co и Ag—Mn—Al (см. § 25), которые можно обрабатывать давлением и резанием. Однако металлокерамическая технология даже для этих сплавов во многих случаях является экономически более выгодной, чем обработка на станках.

При изготовлении Fe—Ni—Al металлокерамических магнитов алюминий вводится в виде железоалюминиевой лигатуры (сплав из 50% Fe и 50% Al), отлитой и размолотой в порошок. Измельчение литых сплавов или порошков элементов, входящих в сплав, не обеспечивает получения высоких магнитных свойств. Это объясняется тем, что в первом случае сильно снижается  $V_r$  из-за плохого сцепления частиц, а во втором происходит окисление алюминия, и состав сплава произвольно меняется.

Размеры частиц порошков в своей основной массе не долж-

ны быть менее 10 мк. К металлическим порошкам в небольшом количестве (0,3—0,5%) добавляют для улучшения спекаемости теорит цинка.

Изменение магнитных свойств металлокерамических магнитов по сравнению с монокристаллическими объясняется главным образом повышенной пористостью материала. При этом коэрцитивная сила практически не изменяется, а  $B_r$ ,  $\gamma$  и  $B_{\max}$  уменьшаются.

А. Б. Альтман\* предложил следующие эмпирические формулы для оценки влияния пористости на магнитные свойства:

$$B_r = B_{r_0} - \left( \frac{B_{r_0}}{50} - 25 \right) P \quad (63)$$

и

$$W_{\max} = W_{\max_0} - \left( \frac{W_{\max_0}}{23} - 850 \right) P, \quad (64)$$

где  $W_{\max}$  [эрг/см<sup>3</sup>] и  $B_r$  [гс] — максимальная энергия и остаточная индукция постоянных магнитов из порошков;

$W_{\max_0}$ ,  $B_{r_0}$  — те же характеристики для монокристаллических магнитов;

$P$ , % — пористость.

Уменьшение пористости металлокерамических магнитов достигается введением легирующих присадок, выбором давления при прессовании и условий спекания, а также применением двухкратного прессования и спекания.

Можно указать следующий примерный режим производства металлокерамических магнитов из Fe—Ni—Al порошков:

а) предварительное прессование при давлении порядка 10 Т/см<sup>2</sup>;

б) полуспекание при температуре  $900 \pm 100^\circ \text{C}$  с выдержкой 2 ч и охлаждением до  $400^\circ \text{C}$  в водороде;

в) допрессовка при давлении 15 Т/см<sup>2</sup>;

г) спекание при температуре  $1280 \pm 5^\circ \text{C}$  с выдержкой 4 ч и охлаждением до  $400^\circ \text{C}$  в водороде.

К качеству водорода и конструкции печи при этом предъявляются очень высокие требования. Водород применяют не технический, а тщательно очищенный и высушенный. Печи должны быть сконструированы так, чтобы в рабочей камере не образовывались пары воды и газы.

Изготовленные таким образом магниты подвергают термической, а для высококобальтовых сплавов и термомагнитной обработке.

Металлокерамические магниты имеют обычно пористость 3—5%, что вызывает снижение  $W_{\max}$  и  $B_r$  на 10—20%. Однако в результате тщательной обработки технологии возможно полу-

\* Альтман А. Б. Физика металлов и металловедение, т. 4, 1957, № 1.

чить металлокерамические магниты без понижения свойств. По механической прочности металлокерамические магниты примерно в 3—6 раз превосходят литые. Каталог завода «Электроконтакт» (1961 г.) рекомендует следующие предельные размеры, для которых изготовление металлокерамических магнитов является рентабельным: высота  $h$  от 1 до 5 мм; сечение  $s$  от 0,1 до 50 см<sup>2</sup>; отношение  $h/\sqrt{s}$  не более, чем 2 : 1; диаметр  $d$  отверстия (минимальный) 2 мм.

Отметим также, что металлокерамическая технология позволяет получать магниты с арматурой (полюсными наконечниками, магнитопроводами и т. п.), т. е. целиком магнитные системы. Такие системы изготавливаются совместным прессованием в одной пресс-форме смеси порошков магнитотвердого материала и железа с последующим спеканием.

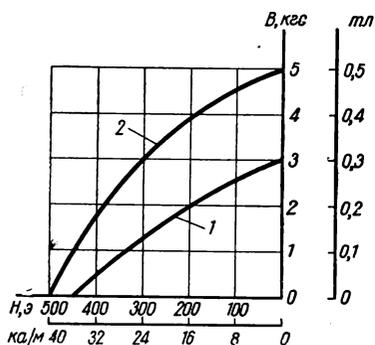


Рис. 70. Кривые размагничивания и магнитной энергии металлопластического (кривая 1) и литого (кривая 2) магнитов из сплава ЮНД4

**Металлопластические магниты.** Эти магниты имеют значительно более простую технологию, чем металлокерамические, но магнитные свойства их хуже. Наиболее часто применяемая технология изготовления металлопластических магнитов в общих чертах заключается в следующем.

Порошок, полученный из литых заготовок сплавов Fe—Ni—Al или Fe—Ni—Al—Co, смешивают с твердым порошкообразным диэлектриком\*, например с фенольной смолой, и прессуют под сравнительно невысоким давлением (около 5 Т/см<sup>2</sup>). Далее прессовки нагревают до 120—180°С и выдерживают при этой температуре несколько часов для полимеризации связи.

Полученные таким образом магниты имеют точно выдержанные размеры, так как нагревание до невысокой температуры не вызывает деформаций и обеспечивает высокое качество поверхности. Механические свойства в несколько раз выше, чем у литых магнитов.

Магнитные свойства металлопластических магнитов значительно понижены. Уменьшение  $H_c$  происходит приблизительно на 10%,  $B_r$  — на 35—50%,  $W_{max}$  — на 40—60%, выпуклость кривой размагничивания меньше, чем у литого материала. На рис. 70 показаны кривые размагничивания металлопластиче-

\* Иногда применяют жидкие связи.

ских магнитов из сплава следующего состава: 15% Al, 24% Ni, 4% Cu и литого магнита близкого состава (ЮНД4).

Понижение магнитных свойств объясняется большим содержанием (до 30% по объему) неферромагнитной компоненты.

Отметим некоторые особенности металлопластических магнитов. Снижение магнитных свойств до некоторой степени компенсируется уменьшением плотности (5,0—5,5 г/см<sup>3</sup> вместо 7,0—8,0 г/см<sup>3</sup> для литых магнитов), поэтому разница в величине энергии при пересчете на единицу объема заметно уменьшается. Металлопластические магниты обладают большим удельным электрическим сопротивлением, что позволяет применять их в цепях с наличием переменного магнитного поля. Порошковая технология позволяет изготавливать магниты с запрессовкой различных полюсных наконечников, втулок и т. п.

**Оксидные магниты и магниты из микропорошков.** В настоящее время для изготовления *оксидных магнитов* используют два соединения: феррит бария BaO · 6Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (бариевые магниты) и феррит кобальта CoO · Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (вектолит). Практическое применение имеют только бариевые магниты, так как вектолит обладает низкими магнитными свойствами и высокой стоимостью.

К магнитам из микропорошков относятся магниты из железа, железо — кобальта и интерметаллического соединения Mn — V. Магниты из этих материалов применяют пока еще мало, но по мнению многих специалистов и на основании теоретических расчетов они являются весьма перспективными.

Природа высококоэрцитивного состояния оксидных магнитов и магнитов из тонких порошков в значительной степени объясняется процессами перемангничивания однодоменных частиц. Современная теория ферромагнетизма позволила установить количественные зависимости, определяющие магнитные свойства однодоменных частиц.

Критический размер частицы, при котором ее можно считать однодоменной, подсчитывается по формуле:

$$D_0 = \frac{9}{J_s} \sqrt{\frac{k\theta K}{a}}, \quad (65)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;

$K$  — константа кристаллографической анизотропии;

$a$  — междоатомное расстояние.

Формулу (65) нельзя считать универсальной. Например, для веществ с малым значением  $K$  (железо) Т. Пейн\* рекомендует уточненную формулу. Однако для получения качественной картины формула (65) является вполне пригодной.

\* Пейн Т. Магнитные свойства мелких частиц. Сб. «Магнитные свойства металлов и сплавов». Изд-во иностр. лит-ры, 1961.

Если по формуле (65) найти критический размер частиц трех материалов: железа, бариевого феррита и сплава  $Mn-Vi$ , то будут получены следующие результаты: железо — 0,05 мк, бариевый феррит — 1,5 мк и  $Mn-Vi$  — от 5 до 8 мк. Очень малый размер частиц железа объясняется высоким насыщением и низким значением  $K$  этого металла.

Для материалов, в которых каждая частица представляет один домен и отделена от других частиц немагнитной прослойкой, намагничивание происходит без смещения границ, только за счет процесса вращения, что требует больших намагничивающих полей.

Причинами возникновения коэрцитивной силы при таком намагничивании являются кристаллографическая анизотропия, анизотропия формы монодоменных частиц и анизотропия механических напряжений (внешних или внутренних). Все три составляющие  $JH_c$  могут быть подсчитаны по формулам.

Коэрцитивная сила от

а) кристаллографической анизотропии

$$JH_{cK} = \frac{2K}{J_S}, \quad (66)$$

б) анизотропии формы частиц

$$JH_{cN} = (N_b - N_a) J_S, \quad (67)$$

в) анизотропии механических напряжений

$$JH_{c\sigma} = \frac{3}{2} \frac{\lambda\sigma}{J_S}, \quad (68)$$

где  $N_b$  — коэффициент размагничивания по продольной оси частиц;

$N_a$  — он же в поперечном направлении;

$\lambda$  — константа магнитострикции;

$\sigma$  — величина механических напряжений, приложенных к образцу.

Практически для создания материалов с большой коэрцитивной силой пока используются явление существования в веществе кристаллографической анизотропии и создание монодоменных частиц, обладающих анизотропией формы. Увеличение  $JH_c$  созданием механических напряжений пока не используется.

Для получения материала с наибольшей энергией  $W_{max}$ , кроме увеличения  $H_c$ , надо стремиться к получению максимальных значений остаточной индукции  $B_r$  и коэффициента выпуклости  $\gamma$ .

Остаточная индукция зависит от свойств вещества ( $J_S$ ), плотности упаковки монодоменных частиц и степени магнитной анизотропии материала.

Наибольшие значения  $J_S$  имеют железо и сплавы железо — кобальт. С увеличением плотности упаковки индукция возрастает, но, начиная с некоторого значения, падает  $H_c$ . Оптимальный коэффициент заполнения составляет приблизительно 50—70%. Магнитная анизотропия материала, которая достигается, например, воздействием магнитного поля при прессовании, увеличивает  $B_r$  за счет уменьшения разницы между  $B_r$  и  $B_S$  (в пределе  $B_r = 4\pi J_S$ ). Одновременно с этим возрастает  $\gamma$ .

Итак, задачу получения материала для постоянных магнитов из тонких порошков можно сформулировать следующим образом: необходимо создать систему из параллельно ориентированных монодоменных частиц, обладающих анизотропией формы (например, в виде удлинённых эллипсоидов) при условии оптимальной плотности упаковки.

В табл. 22 приведены предельные значения магнитных параметров материалов из тонких порошков, вычисленные в предположении выполнения сформулированных условий. В этой же

Таблица 22  
Свойства постоянных магнитов из микропорошков \*

Материал	$B_r, \text{ зс}$	$JH_c, \text{ э}$	$BH_c (H_c),$	$(B^H)_{\text{max}} \times 10^{-6}, \text{ зс} \cdot \text{э}$
Сплав Мп — Вi:				
а) Теоретический верхний предел	7800	37 000	7800	15,2
б) Практически достигнутые значения	4800	6000	3650	5,4
Бариевый феррит:				
а) Теоретический верхний предел	4650	17 000	4650	5,4
б) Практически достигнутые значения	4000	1950	1930	3,7
Железо:				
а) Теоретический верхний предел	14 300	3600	3600	38,5
б) Практически достигнутые значения	9000	720	700	3,5
Железо — кобальт:				
а) Теоретический верхний предел	16 300	4100	4100	49,9
б) Практически достигнутые значения	9050	1050	1025	5,0

\* Пейн Т. Магнитные свойства мелких частиц. Сб. «Магнитные свойства металлов и сплавов». Изд-во иностр. лит-ры, 1961.

таблице помещены сведения о практически достигнутых значениях этих параметров.

Из рассмотрения данных таблицы можно сделать заключение о том, что самыми перспективными материалами в отношении получения наибольшей энергии являются порошки из железа и железо — кобальта. Однако возможности этих материалов использованы пока не больше, чем на 9—10%, в то время как возможности бариевых ферритов реализованы уже почти на 80%.

Объясняется это тем, что для бариевых ферритов  $K$  велико, а  $J_S$  мало. Следовательно, на основании формулы (66) можно сделать вывод, что составляющая  $J_{H_{cK}}$  от кристаллографической анизотропии имеет большое значение и именно она в основном определяет значение  $J_{H_c}$ . Кроме того, критический размер  $D_0$  монокристаллических частиц для феррита бария составляет сравнительно большую величину, равную 1,5 мк. Получение частиц таких размеров без выполнения условия их удлиненной формы является практически разрешимой задачей. Для железа и железо-кобальта  $K$  мало, а  $J_S$  велико. Следовательно, составляющая  $J_{H_{cK}}$  от кристаллографической анизотропии мала и существенное увеличение коэрцитивной силы может быть достигнуто только в результате использования анизотропии формы частиц. Но это требует решения технологической задачи получения частиц определенной формы, имеющих размеры 0,01—0,1 мк, параллельном их расположении и оптимальной плотности упаковки, что связано с большими трудностями.

**Бариевые магниты.** Феррит бария в отличие от магнитномягких ферритов имеет не кубическую, а гексагональную кристаллическую решетку с одноосной анизотропией. Наличие магнитных свойств объясняется нескомпенсированным антиферромагнетизмом (ферримagnetизмом), для которого характерным является низкое (по сравнению с металлическими магнитными материалами) значение остаточной индукции.

В настоящее время промышленность выпускает две группы бариевых магнитов: изотропные (БИ) и анизотропные (БА).

Технология производства магнитов БИ в принципе не отличается от описанной выше технологии производства магнитномягких ферритов. Примерную схему изготовления магнитов БИ можно представить следующим образом.

Исходные материалы: окись железа  $Fe_2O_3$  марки «ЧДА», углекислый барий  $BaCO_3$  или азотнокислый  $Ba(NO_3)_2$  марки «Ч». Каолин высшего или первого сорта для тонкой керамики.

Расчет шихты соответствует соединению  $BaO \cdot 6Fe_2O_3$ . Каолин добавляют в количестве 0,5% сверх 100% основного материала. Каолин препятствует росту зерен и тем самым увеличивает  $H_c$ . Одновременно он в сотни и тысячи раз снижает электросопротивление.

После первого вибропомола производится обжиг массы при температуре  $1250 \pm 30^\circ \text{C}$  в течение 3 ч (для  $\text{BaCO}_3$ ). Второй вибропомол имеет очень важное значение, так как он должен обеспечить размер частиц не свыше 1—2 мк. Перед помолом вторично в массу добавляют 0,5% каолина. Далее изделия прессуются и подвергаются окончательному обжигу при температуре  $1230 \pm 50^\circ \text{C}$  с выдержкой 3 ч.

Особенности производства магнитов БА заключаются в том, что после второго сухого помола производится мокрый помол (в течение 4 ч), после которого масса отстаивается не менее трех суток, и прессование в магнитном поле. Мокрый помол обеспечивает лучшее измельчение частиц. Для прессования в магнитном поле масса сметанообразной консистенции заливается в пресс-форму, которая помещается внутрь намагничивающей катушки. Кратковременным включением и выключением тока производится магнитная встряска массы. Включается намагничивающий ток, который должен иметь такую величину, чтобы в конце прессования поле составляло 8000—10 000 э. В начале прессования поле должно быть не менее 2000—3000 э. Именно это начальное поле является определяющим, так как оно приложено тогда, когда частицы находятся во взвешенном состоянии. Включается насос для откачки воды и путем медленной подачи давления производится прессование при давлении 0,2—0,5 Т/см<sup>2</sup>. Выключаются намагничивающий ток и отсос воды. Изделие размагничивается путем включения и выключения тока, имеющего обратное, по сравнению с намагничивающим током, направление. Изделие выпрессовывается \*\*.

Магнитные свойства магнитов БИ и БА приведены в табл. 23, а на рис. 71 показаны кривые размагничивания и магнитной энергии. Отметим некоторые особенности бариевых магнитов. По величине магнитной энергии БИ соответствуют ЮНД4 (АНЗ), а БА — ЮНДК15 (АНКо2). При этом они обладают очень большой коэрцитивной силой и малой величиной остаточной индукции. Точка  $(BH)_{\text{max}}$  соответствует большому значению коэффициента размагничивания, поэтому бариевые магниты целесообразно изготавливать в виде шайб, тонких дисков (с отношением  $l/d \approx 5—10$ ) и т. п. Вследствие большой величины  $H_c$  бариевые магниты обладают высокой стабильностью в отношении действия внешних магнитных полей, тряски, ударов и структурного старения. Бариевые магниты могут намагничиваться до сборки системы, поскольку у них кривая возврата практически совпадает с кривой размагничивания \*. Коэффици-

\* Для БА кривые возврата для точек выше  $(BH)_{\text{max}}$  совпадают с кривой размагничивания, а для точек ниже  $(BH)_{\text{max}}$  идут параллельно.

\*\* В самое последнее время начали применять сухое прессование магнитов БА при высоких удельных давлениях без органического пластификатора.

ент возврата  $\mu_{\Delta}$  для бариевых магнитов приблизительно равен единице (точнее  $\mu_{\Delta} \approx 1,1-1,2$ ), что позволяет упростить расчеты, считая, что наличие магнитного материала не влияет на картину магнитного поля в воздухе. Удельное сопротивление бариевых магнитов  $\rho = 10^6-10^9 \text{ ом} \cdot \text{см}$ , т. е. в миллионы раз выше, чем у металлических материалов, что практически исключает возможность возникновения в них вихревых токов и позволяет использовать в магнитных цепях, подвергающихся действию полей высокой частоты. Большое достоинство бариевых магнитов

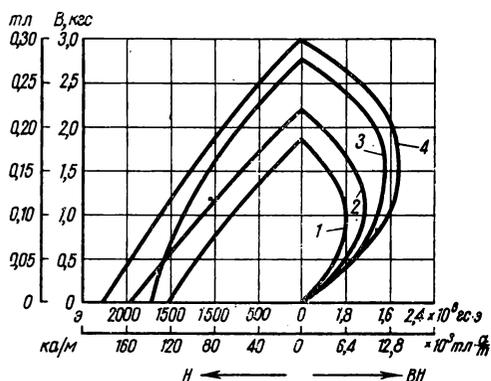


Рис. 71. Кривые размагничивания и магнитной энергии бариевых магнитов:  
1 — 0,7БИ; 2 — 1БИ; 3 — 2БА; 4 — 3БА

состоит в том, что они не содержат дефицитных и дорогих материалов. Бариевые магниты приблизительно в 10 раз дешевле магнитов из ЮНДК24 (АНК04).

К недостаткам бариевых магнитов следует отнести плохие механические свойства (высокие хрупкость и твердость, что позволяет обрабатывать их только шлифовкой) и, самое главное, большую зависимость магнитных свойств от температуры. Температурный коэффициент

магнитной индукции для бариевых магнитов не зависит от величины коэффициента размагничивания и составляет приблизи-

Таблица 23

## Магнитные свойства бариевых магнитов

Марка материала	Остаточная индукция $B_r, \text{Гс}$	Коэрцитивная сила (по индукции) $H_c, \text{э}$	$(BH)_{\text{max}} \cdot 10^{-6}, \text{Гс} \cdot \text{э}$	Примечание
0,7 БИ	1800—2100	1600—1400	0,7—0,8	(без каолина), высокое $\rho$
1 БИ	1900—2200	1800—1600	0,8—1,1	Повышенные по сравнению с 0,7 БИ магнитные свойства
2 БА	3000—3500	2900—2300	2,0—2,9	Повышенная $H_c$
3 БА	3600—4000	2200—1600	3,0—3,5	Повышенная $B_r$

тельно  $0,2\%/1^\circ\text{C}$ , т. е. в десять раз больше, чем у литых магнитов. Кроме того, они обладают необратимостью свойств при охлаждении, т. е. после охлаждения и последующего нагрева до первоначальной температуры магнитные свойства не восстанавливаются, что иллюстрируется рис. 72. При повторном понижении температуры изменение  $B$  практически отсутствует. Для стабилизации свойств изделия выдерживаются в раздробленном сухом льде при температуре  $t = -60^\circ\text{C}$  в течение 4 ч.

**Магниты из микропорошков.** Технология производства магнитов из микропорошков  $\text{Mn}-\text{Vt}$  в общих чертах заключается в следующем. Механическим дроблением марганцевисмутового

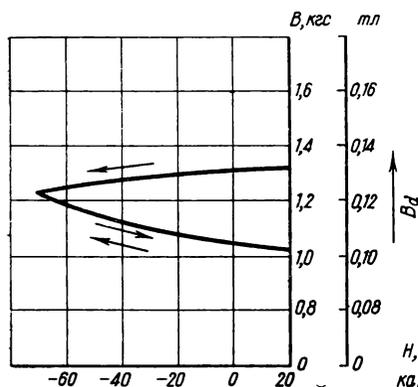


Рис. 72. Температурная зависимость для магнитов БИ в разомкнутой цепи ( $l/d \approx 1$ )

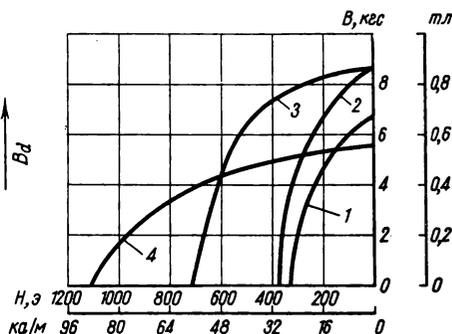


Рис. 73. Кривые размагничивания магнитов из микропорошков железа и железо — кобальта [Л. 8]

1 — железный порошок, сферические частицы; 2 — железокобальтовый порошок, сферические частицы; 3 — железный порошок, удлиненные частицы, плотность упаковки 50%; 4 — железный порошок, удлиненные частицы, плотность упаковки 30%

сплава (23%  $\text{Mn}$  и 77%  $\text{Vt}$ ) получают частицы монокристаллических размеров (5—8  $\mu\text{m}$ ). Затем порошок пропускают через магнитный сепаратор, который отделяет ферромагнитную фазу  $\text{Mn}-\text{Vt}$  от немагнитных частиц марганца и висмута. Прессовка порошка  $\text{Mn}-\text{Vt}$  производится при температуре около  $300^\circ\text{C}$  в магнитном поле напряженностью приблизительно 20 000 э, которое создает одинаковую ориентацию осей легкого намагничивания отдельных частиц. Магнитные свойства  $\text{Mn}-\text{Vt}$  порошка соответствуют свойствам лучших металлических материалов для постоянных магнитов. Особенно большое значение имеет коэрцитивная сила ( $jH_c$  до 6000 э). Однако эти свойства сохраняются только для температур не ниже  $20^\circ\text{C}$ . При понижении температуры свойства быстро падают (для восстановления не-

обходимо повторное намагничивание), что существенно ограничивает применение этих материалов.

Железные и железо-кобальтовые магниты из микропорошков требуют применения химических способов получения частиц нужного размера (0,01—0,1 мк). Порошок получают восстановлением муравьинокислого железа в водороде при умеренной температуре. Из полученного таким образом порошка прессуют магниты и для повышения коррозионной устойчивости пропитывают раствором смолы. Иногда для повышения механической прочности и остаточной индукции прессовки до пропитывания отжигают в водороде. На рис. 73 приведены кривые намагничивания магнитов из микропорошка железа и железо-кобальта. Присадка кобальта (30% Co) существенно улучшает свойства материала.

#### § 24. МАРТЕНСИТНЫЕ СТАЛИ

Мартенситом называется особый вид микроструктуры, возникающей при закалке стали. Образование мартенсита сопровождается значительными объемными изменениями, созданием больших внутренних напряжений решетки и возникновением больших значений коэрцитивной силы. Мартенситная структура характеризуется также наивысшими значениями твердости и электросопротивления.

Опытные исследования показали, что оптимальные магнитные свойства могут быть получены в том случае, если структура состоит не из одного мартенсита, а включает в себя высокодисперсные карбиды. Такое состояние, условно названное дисперсионным твердением мартенсита, обеспечивается термообработкой, при которой часть карбидов переводится в твердый раствор, а другая часть выделяется в высокодисперсном виде. Это способствует не только увеличению коэрцитивной силы, но и увеличению остаточной индукции, так как при меньшем растворении карбидов мартенсит содержит меньше углерода и, следовательно, имеет более высокое магнитное насыщение.

Отсюда следует сделать важный практический вывод о том, что качество термообработки в значительной степени определяет магнитные свойства материала. При некоторых температурных воздействиях, например при отжиге стали для уменьшения твердости с целью облегчения механической обработки, может произойти магнитная «порча», т. е. резкое ухудшение магнитных свойств после закалки. Это явление объясняется процессами, возникающими в карбидной фазе стали. Для восстановления свойств в результате «порчи» необходимо применять исправляющую термообработку.

Мартенситные стали начали применять раньше всех других материалов для постоянных магнитов. В настоящее время они

используются сравнительно мало из-за их низких магнитных свойств. Однако полностью от их применения не отказываются, так как они дешевы и могут обрабатываться на металлорежущих станках.

Состав и свойства мартенситных сталей нормируются ГОСТ 6862—54. Интересно отметить, что указанный ГОСТ, предусматривающий выпуск пяти марок сталей, был принят взамен ОСТ НКТП 3543, который предусматривал выпуск десяти марок сталей. Это говорит об уменьшении роли этой группы материалов для современной техники. Некоторые данные мартенситных сталей приведены в табл. 24.

Таблица 24

Состав и свойства мартенситных сталей для постоянных магнитов (ГОСТ 6862—54)

Марка стали	Химический состав*, %					Магнитные свойства (не менее)**	
	C	Cr	W	Co	Mo	$B_r, зс$	$H_c, э$
ЕХ	0,95—1,10	1,30—1,60	—	—	—	9000	58
ЕХЗ	0,90—1,10	2,80—3,60	—	—	—	9500	60
Е7В6	0,68—0,78	0,30—0,50	5,20—6,20	—	—	10 000	62
ЕХ5К5	0,90—1,05	5,50—6,50	—	5,50—6,50	—	8500	100
ЕХ9К15М	0,90—1,05	8,0—10,0	—	13,5—16,5	1,2—1,7	8000	170

\* В состав всех сталей входят также 0,2—0,4% Mn; 0,17—0,4% Si и не более 0,3% Ni, 0,03% P, 0,02% S.

\*\* Магнитные свойства гарантируются при условии соблюдения технологической инструкции поставщика по термообработке и после 5 ч структурной стабилизации при 100°С (в кипящей воде).

Величина  $(BH)_{\max}$  для мартенситных сталей составляет  $(0,25—1,0) \cdot 10^6 зс \cdot э$ .

На заводы электротехнической промышленности мартенситные стали поставляются металлургическими заводами в основном в виде проката различного сортамента: прутков или полос. В редких случаях магниты из кобальтовых сталей изготавливают литьем в земляные формы.

Рассмотрим свойства применяемых в промышленности марок мартенситных сталей.

**Хромистые стали ЕХ и ЕХЗ.** Эти марки сталей являются основными марками мартенситных сталей как дешевые и не содержащие дефицитных материалов. Сталь ЕХ, магнитные свойства которой несомненно хуже, чем стали ЕХЗ, является зато более мягкой в механическом отношении и применяется в тех случаях, когда требуется сложная обработка магнитов резанием.

Хромистые стали в интервале температур 650—900°С подвержены магнитной порче. Порча может возникнуть, например, при изготовлении магнитов путем гибки полос в горячем состоянии. Для устранения порчи технологический процесс предусматривает двойную термообработку\*:

1) нормализация при 1050—1100°С с пятиминутной выдержкой с момента прогрева и последующее охлаждение в масле или на воздухе; этой операцией устраняется магнитная порча стали;

2) закалка на мартенсит при 850°С с десятиминутной выдержкой с момента прогрева и последующее охлаждение в масле.

В ряде случаев оптимальные магнитные свойства получают только в результате более сложной термообработки, чем указанная.

Стабильность свойств хромистых сталей можно охарактеризовать следующими данными: после кипячения в течение 6 ч коэрцитивная сила уменьшается на 3—5%; для стали, размагниченной на 5%, изменение свойств за 10 лет составляет несколько процентов, без размагничивания  $B_r$  уменьшается за тот же срок на 35%.

**Вольфрамовая сталь E7B6.** Магнитные свойства этой стали несколько выше, чем хромистой. Однако высокая стоимость и дефицитность вольфрама почти полностью исключают применение стали E7B6.

Вольфрамовая сталь подвержена порче как в результате отпуска при 750—900°С, так и в результате увеличения времени выдержки при закалке сверх оптимальной. Восстановление свойств достигается нормализацией при температуре 1200—1250°С. Закалка производится в воде или в масле при 820—860°С.

Структурное старение вольфрамовой стали весьма велико, что требует ее остаривания путем кипячения в воде в течение 15—20 ч. Магнитная стабильность стали высокая; после размагничивания на 5—10% она в дальнейшем теряет не более 0,5—1% потока.

**Кобальтовые стали EX5K5 и EX9K15M.** Кобальтовые стали обладают наилучшими из мартенситных сталей магнитными свойствами. Однако они весьма дороги, требуют сложной (тройной) термической обработки, трудно обрабатываются из-за значительных твердости и хрупкости, и поэтому не находят широкого применения.

Кобальтовые стали более подвержены порче, чем вольфрамовая и хромистые стали. После нормализации при 1150—1250°С кобальтовая сталь подвергается промежуточному отжигу при 750—800°С и только после этого закалке. Такая «трой-

\* Данные приведены для стали EX.

ная» обработка обеспечивает получение структуры с оптимальными магнитными свойствами.

Для структурной стабилизации кобальтовые стали требуют длительности выдержки 25—30 ч при 100° С, т. е. в несколько раз больше, чем хромистые и вольфрамовые стали. Магнитная стабильность кобальтовых сталей очень высокая.

## § 25. ПРОЧИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Выше были рассмотрены наиболее широко применяемые в настоящее время материалы для постоянных магнитов. Кроме них находят применение пластически деформируемые сплавы и сплавы на основе благородных металлов.

**Пластически деформируемые сплавы.** Эти сплавы обладают высокими в отношении механической обработки свойствами. Они хорошо штампуются, режутся ножницами, обрабатываются на всех металлорежущих станках. Из пластически деформируемых сплавов можно изготовить ленты, пластины, листы, проволоку. В отдельных случаях (при изготовлении мелких магнитов сложной конфигурации) целесообразно применять металлокерамическую технологию. Марок пластически деформируемых сплавов много, и физические процессы, которым они обязаны высокими магнитными свойствами, различны.

Наибольшее распространение имеют сплавы кунифе (Cu—Ni—Fe), кунико (Cu—Ni—Co) и викаллой (Co—V—Fe).

Рекомендуемая технология сплавов кунифе и кунико заключается в следующем [Л. 27]. Сплавы выплавляют в высокочастотной вакуумной печи и отливают в малые слитки диаметром около 70 мм. Слитки проковывают до размера 35 мм с нагревом до 1000° С и после этого прокатывают до толщины 6 мм. Затем сплав подвергают термической обработке, которая состоит в нагреве в водородной печи до 1400° С в течение 8 ч с охлаждением в воде и в отпуске при 650° С в течение 3 ч.

Далее следует протяжка со степенью деформации в 80—90% и отпуск при 600° С. Очевидно, что такая технология является доступной только для заводов с высокой степенью оснащения оборудованием.

Сплав кунифе в зависимости от химического состава имеет разные названия и свойства. Наибольшее распространение получил сплав кунифе I (магнетофлекс), состоящий из 60% Cu, 20% Ni и 20% Fe. Сплавы кунифе анизотропны, намагничиваются в направлении прокатки, часто применяются в виде проволоки малых толщин, а также штамповок.

Сплавы кунико изотропны. Ввиду большого значения  $H_c$  и относительно малого  $B_r$ , их следует применять при изготовлении

магнитов сложной конфигурации в разомкнутых цепях. Кунико дороже сплава Al—Ni—Co в 5—6 раз.

Викаллоем называются сплавы, содержащие около 50% Co, 8—15% V и остальное Fe. В зависимости от химического состава, термической и механической обработок свойства этих сплавов меняются в очень широких пределах, приближаясь (в ряде случаев) по величине  $(BH)_{\max}$  к сплаву ЮНДК24. До окончательной термической обработки механические свойства викаллоев приблизительно аналогичны свойствам меди, а после термической обработки — стали. Основной недостаток этих сплавов — большая стоимость.

Викаллои применяют для изготовления очень мелких магнитов сложной или ажурной конфигурации (викаллою I), а также для изготовления высокопрочной магнитной ленты или проволоки (викаллою II).

Некоторые данные пластически деформируемых сплавов приведены в табл. 25.

Таблица 25

Некоторые свойства пластически деформируемых сплавов для постоянных магнитов

Марки сплавов	Химический состав**	Магнитные свойства		
		$B_r$ , гс	$H_c$ , э	$(BH)_{\max} \cdot 10^{-6}$ , гс·э
Викаллою I*	52% Co; 9,5% V	9000	3000	1,0
Викаллою II*	52% Co; 13% V	9000—9500	370—470	2,0—3,5
Кунифе I*	60% Cu; 20% Ni	5400—6000	590—350	1,0—1,85
Кунифе II*	50% Cu; 20% Ni; 2,5% Co	7300	260	0,7—0,8
Кунико I	50% Cu; 21% Ni; 29% Co	3400	660—710	0,8—1,0
Кунико II	35% Cu; 41% Co	5300	450	1,0

\* В направлении прокатки.

\*\* Остальное железо.

**Сплавы на основе благородных металлов.** К таким сплавам относятся сплавы серебра с марганцем и алюминием (силманал) и сплавы платины с железом (77,8% Pt и 22,2% Fe) или платины с кобальтом (76,7% Pt и 23,3% Co). Материалы этой

группы, особенно платиновые, отличаются очень высокой стоимостью и находят применение только в виде сверхминиатюрных магнитов весом в несколько миллиграммов. Для изготовления магнитов из всех сплавов этой группы широко применяется металллокерамическая технология.

Сплавы на основе драгоценных металлов характеризуются чрезвычайно высокими значениями коэрцитивной силы. Для сплава Pt—Co  $jH_c = 5000$  э; для сплава силманал  $jH_c = 6000$  э. По величине  $(BH)_{\max}$  сплав Pt—Co можно сравнивать со сплавом ЮНДК24, т. е.  $(BH)_{\max} \approx 3,8 \cdot 10^6$  гс·э. В литературе\* имеются данные о том, что получен кобальтплатиновый сплав, у которого  $(BH)_{\max} = 9,0 \cdot 10^6$  гс·э. У сплава силманал  $B_r \approx 520$  гс, поэтому  $(BH)_{\max} \approx 0,075 \cdot 10^6$  гс·э, что приблизительно в десять раз меньше, чем у самого дешевого сплава Fe—Ni—Al.

Очень высокие значения  $jH_c$  сплавов из благородных металлов приводят к тому, что магниты из этих материалов являются чрезвычайно стабильными. Это определяет и области применения данных сплавов. Они используются в точных электроизмерительных приборах с подвижными магнитами в качестве «магнитных» пружинки и т. п.

---

\* Martin D. L. and Geisler A. H. Journal Appl. Phys., 1952, 24, p. 498.

---

## МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

### § 26. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЕТЛЕЙ ГИСТЕРЕЗИСА (ППГ)

**С**овременные устройства технической кибернетики содержат тысячи элементов, запоминающих и перерабатывающих поступающую информацию. Обычно в подобных системах информация, подлежащая обработке, представляется в двоичной системе счисления, в которой для кодирования любой величины используются только два символа: «1» и «0». Огромное преимущество двоичной системы счисления заключается в том, что она позволяет весьма просто изобразить любое число с любой степенью точности с помощью электрических импульсов.

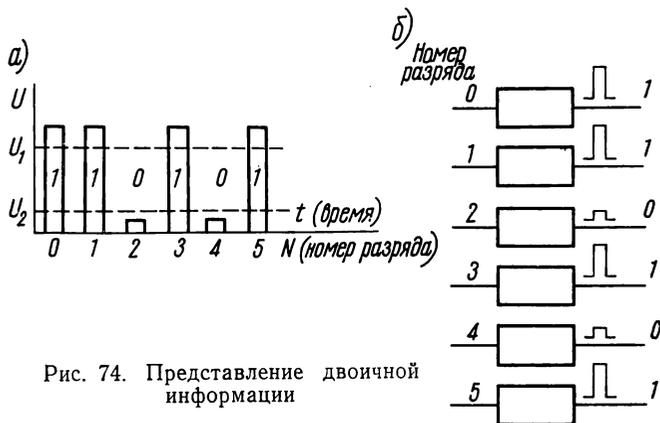


Рис. 74. Представление двоичной информации

Например, если принять, что наличие импульса соответствует цифре «1», его отсутствие — цифре «0», а очередность появления импульса — номеру его разряда, то шестirazрядное двоичное число 101011, соответствующее десятичному числу 43, можно записать приведенной на рис. 74, а последовательностью временных импульсов (нулевой разряд записывают справа).

Для передачи и обработки информации в двоичной системе без возникновения ошибок требуется, чтобы величина напряжения импульса, соответствующая «1», была не меньше некоторого минимального значения  $U_1$ , а величина напряжения помех при наличии «0» не превышала некоторого максимального значения  $U_2$ .

Применяется также параллельная запись двоичных чисел, при которой импульсы, соответствующие различным разрядам, появляются на разных выходах схемы одновременно (рис. 74, б).

В качестве элементов хранения и переработки двоичной информации все больше применяются элементы, выполненные на основе ферромагнетиков с использованием двух его устойчивых состояний, которые характеризуются положительным и отрицательным значениями остаточной индукции. Можно показать (см., например, [Л. 30]), что отношение полезного сигнала к сигналу помехи для кибернетических устройств с магнитными элементами получается тем больше, чем ближе петля гистерезиса приближается к прямоугольной форме, т. е. чем меньше разница между максимальной  $B_{\max}$  и остаточной  $B_r$  индукциями. Поэтому магнитные материалы этой группы принято называть материалами с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ).

Двоичные элементы на сердечниках с ППГ по надежности значительно превосходят не только ламповые, но и полупроводниковые элементы. Они обладают также другими преимуществами (хранением информации без затрат энергии, высокой стабильностью характеристик, малым потреблением мощности, малыми размерами, низкой стоимостью, простотой проектирования сложных устройств), в силу которых находят все большее применение в устройствах хранения и переработки дискретной информации.

Переключение сердечников с ППГ из одного состояния намагниченности в другое может осуществляться в основном двумя способами: перемагничивающими токовыми импульсами, создающими поля, значительно превосходящие коэрцитивную силу, или совпадающими во времени несколькими токовыми импульсами, каждый из которых не может заметно изменить состояние сердечника и суммарное значение которых превосходит коэрцитивную силу.

Первый способ переключения сердечников применяется в основном в устройствах переработки и передачи информации, второй — в устройствах хранения дискретной информации (запоминающих устройствах).

Материалы с ППГ могут быть подразделены на три группы: ферриты, текстурованные ферромагнитные сплавы, применяемые в виде лент толщиной от 0,5 мм до единиц и десятков микрон, и тонкие ферромагнитные пленки.

В настоящее время наибольшее распространение получили ферритовые сердечники с ППГ благодаря открытию ферритов со спонтанной (самопроизвольной) прямоугольностью петли гистерезиса. При изготовлении таких сердечников не требуется принятия специальных технологических мер (создания механических напряжений или отжига в магнитном поле) для получения текстуры, обеспечивающей получение высокой прямоугольности петли, как это необходимо для металлических материалов с ППГ. Технологический процесс производства ферритовых сердечников с ППГ значительно проще процесса изготовления ленточных сердечников из сплавов тонкого и сверхтонкого проката. Однако микронные сердечники, изготовленные из сплавов сверхтонкого проката (2—10 мк), выгодно отличаются от ферритовых сердечников своей температурной стабильностью и лучшими магнитными свойствами.

Применение тонких ферромагнитных пленок, имеющих высокие частотные свойства и позволяющих создать компактные элементы, на перемагничивание которых требуются незначительные затраты энергии, открывает большие перспективы для развития радиоэлектроники. Но многие вопросы в области изготовления и применения тонких пленок, например такие, как получение элементов с одинаковыми свойствами, измерение их параметров и другие, находятся еще в стадии разработки.

В зависимости от особенностей устройств, в которых используются ферромагнетики с ППГ, требования к ним могут существенно различаться. Так, ферромагнетики, предназначенные для работы в устройствах переработки дискретной информации, должны отличаться небольшим значением статической коэрцитивной силы  $H_c$ . Наоборот, ферромагнетики, предназначенные для работы в устройствах хранения дискретной информации, в которых для переключения сердечников используется принцип совпадения нескольких токов, должны иметь большое значение  $H_c$  для обеспечения высокого быстродействия.

Однако все же можно сформулировать следующие основные требования к материалам с ППГ.

1. Основным параметром, характеризующим магнитный материал и магнитный элемент, является *коэффициент прямоугольности петли гистерезиса*  $K_{пр}^*$ , представляющий собой отношение остаточной индукции  $B_r$  к максимальной индукции  $B_{max}$ :

$$K_{пр} = \frac{B_r}{B_{max}}. \quad (69)$$

---

\* Иногда этот параметр называют относительной остаточной индукцией.

Значение максимальной индукции  $B_{\max}$  обычно определяют для поля  $H_{\max} = (5-10) H_c$ , что близко соответствует предельным характеристикам.

Желательно, чтобы  $K_{\text{пр}}$  был возможно большим (ближе к единице). Для современных материалов с ППГ коэффициент прямоугольности  $K_{\text{пр}} = 0,8-0,98$ .

Наибольшей прямоугольностью пегли обладают металлические сердечники.

2. При работе сердечника с ППГ в режиме совпадения двух или нескольких токовых импульсов важным параметром является коэффициент квадратности  $K_{\text{кв}}$ , который представляет собой отношение изменения индукции при положительном воздействии, уменьшенном в  $k$  раз ( $k < 1$ ), к изменению индукции при предыдущем полном отрицательном воздействии, следующим за полным положительным воздействием (рис. 75):

$$K_{\text{кв}} = \frac{\Delta B_{(k \cdot H_{\max})}}{\Delta B_{(-H_{\max})}}. \quad (70)$$

Обычно  $k$  равно 0,33; 0,5 или 0,66, что соответствует действию частичных токов возбуждения, составляющих  $1/3$ ,  $1/2$  или  $2/3$  величины перемгничивающего тока.

Коэффициент квадратности должен быть достаточно мал. Это означает, что при работе по частному циклу, определяемому симметричным воздействием  $\pm H_{\max}$ , уменьшенное в  $k$  раз, воздействие не должно существенно менять намагниченности сердечника (стягивать его).

Для хороших образцов ферритов  $K_{\text{кв}} < 0,2$  и достигает 0,3 при коэффициенте  $k$ , равном 0,66. Так как ленточные сердечники практически не используются в запоминающих устройствах, то значения коэффициента квадратности для них обычно не приводятся.

Коэффициент квадратности магнитных пленок при воздействии поля, совпадающего по направлению с осью легкого намагничивания, достигает высоких значений, что позволяет эффективно использовать эти элементы в запоминающих устройствах, работающих на принципе совпадения токов.

3. Время, необходимое для переключения ферромагнетика с ППГ из одного состояния остаточной индукции в противоположное, называемое *временем перемгничивания*  $\tau_{\text{ф}}$ , должно быть по возможности малым.

Уменьшение  $\tau_{\text{ф}}$ , помимо пропорционального увеличения быстродействия устройства, вызывает также возрастание выходного сигнала, снимаемого с элемента.

Время переключения сердечников с ППГ в современных устройствах автоматики и вычислительной техники составляет несколько микросекунд. В наиболее быстродействующих устрой-

ствах это время доходит до одной микросекунды и менее и ограничено в основном трудностями создания кратковременных мощных переключающих полей.

На рис. 76 представлены сравнительные зависимости  $1/\tau_{\Phi} = f(H)$  для трех основных групп материалов с ППГ, из которых видно большое преимущество в этом отношении микронных сердечников и особенно тонких ферромагнитных пленок по сравнению с ферритами.

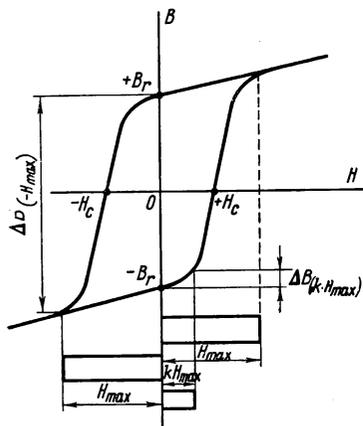


Рис. 75. К определению коэффициента квадратности

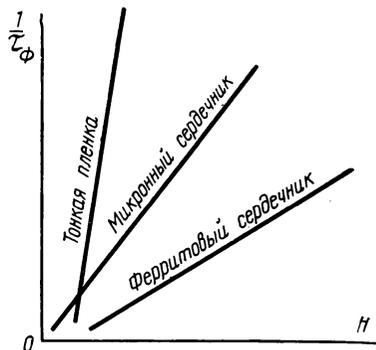


Рис. 76. Сравнительные зависимости  $1/\tau_{\Phi} = f(H)$  для трех групп материалов

4. Для обеспечения быстрого перемагничивания сердечников они должны иметь небольшое значение *коэффициента переключения*  $S_w$ , под которым понимают величину электрического заряда (количество электричества), необходимого для полного переключения сердечника, т. е. для его перемагничивания из одного состояния остаточной индукции в противоположное состояние максимальной индукции.

Коэффициент переключения  $S_w$  зависит только от типа ферромагнетика (свойств материала сердечника и его геометрии) и в определенных пределах не зависит от характера переключения.

Коэффициент переключения измеряется обычно в *мкк/см* или *э·мксек*. Для ферритов различных марок  $S_w = 0,25—0,66$  *мкк/см*. Для ленточных сердечников микронного проката  $S_w = 0,2—1,6$  *мкк/см* и возрастает по мере увеличения толщины листа. Для тонких ферромагнитных пленок  $S_w$  значительно меньше, чем для сердечников.

5. Поле старта  $H_{ст}$ , под которым понимают усредненное значение напряженности статического поля, характеризующего величину динамической коэрцитивной силы, в большинстве случаев желательно иметь минимальным.

Обычно  $H_{ст} = (1,2—1,4) H_c$ .

6. Высокая температурная стабильность свойств.

Для ферритов характерно повышение точки Кюри с увеличением коэрцитивной силы. Так, например, феррит марки ВТ-5, имеющий коэрцитивную силу  $H_c = 0,12 \text{ а/см}$ , теряет свои ферромагнитные свойства при температуре  $+150^\circ\text{С}$ , в то время как феррит марки ВТ-6, имеющий коэрцитивную силу  $H_c = 3,0 \text{ а/см}$ , сохраняет свои основные свойства до  $+320^\circ\text{С}$ . Такая зависимость объясняется тем, что высококоэрцитивные ферриты имеют меньшее процентное содержание компонент с повышенной зависимостью свойств от температуры.

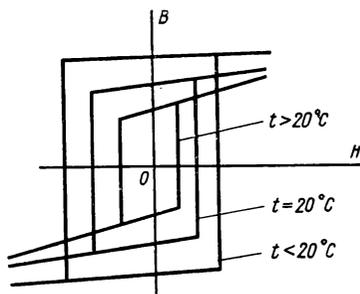


Рис. 77. Петли гистерезиса феррита с ППГ при разных температурах

Вообще у сердечников с большими значениями коэрцитивной силы наблюдается меньшая зависимость статических и динамических (импульсных) параметров от температуры.

Форма петли гистерезиса феррита при разных температурах схематически показана на рис. 77. Как правило, при повышении температуры площадь петли уменьшается, а прямоугольность ее ухудшается, т. е. происходит уменьшение коэрцитивной силы, остаточной индукции и коэффициента прямоугольности. При охлаждении сердечников наблюдаются обратные явления.

На рис. 78, а и б приведены для феррита марки ВТ-1 температурные зависимости магнитных характеристик сердечников:

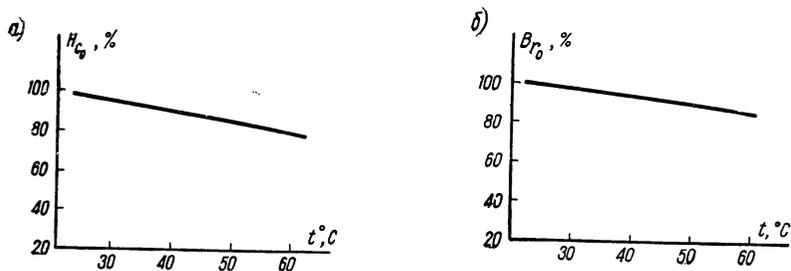


Рис. 78. Изменение свойств феррита марки ВТ-1 от температуры: а — относительной коэрцитивной силы; б — относительной остаточной индукции

относительной коэрцитивной силы

$$H_{c_0} = \frac{H_c(t^\circ=t)}{H_c(t^\circ=20^\circ\text{C})} 100\%$$

и относительной остаточной индукции

$$B_{r_0} = \frac{B_r(t^\circ=t)}{B_r(t^\circ=20^\circ\text{C})} 100\%$$

Данные зависимости показывают, что коэрцитивная сила и остаточная индукция в зависимости от температуры изменяются приблизительно по линейному закону:

$$H_{c_0} \% = 100 - K_{H_c} t_1^\circ \quad (71)$$

и

$$B_{r_0} \% = 100 - K_{B_r} t_1^\circ \quad (72)$$

где  $t_1^\circ = t^\circ - 20^\circ\text{C}$ ,  $t = (+20^\circ\text{C}) - (+60^\circ\text{C})$ , а коэффициенты линейности  $K_{H_c} \approx 0,60$ ;  $K_{B_r} \approx 0,40$ .

Наибольшие неприятности при использовании схем на ферритах с ППГ при повышенных температурах вызывает уменьше-

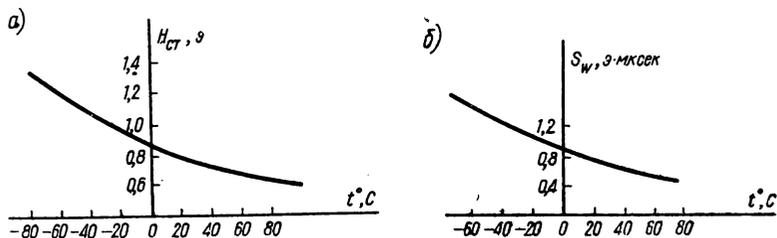


Рис. 79. Зависимость динамических параметров феррита от температуры:  
а — поля старта; б — коэффициента переключения

ние коэффициента прямоугольности динамической петли гистерезиса, приводящее к возрастанию сигнала помехи. Последний может исказить информацию, перерабатываемую устройством, выполненном на ферритовых сердечниках.

На рис. 79 приведены зависимости основных динамических параметров феррита (поля старта и коэффициента переключения) от температуры для одного из типов ферритов с ППГ. Как видно из рассматриваемых характеристик, изменения поля старта и коэффициента переключения направлены в одну и ту же сторону, что приводит к значительной нестабильности процесса переключения сердечника при изменении температуры.

При работе в особенно тяжелых температурных режимах следует использовать металлические материалы с ППГ, у кото-

рых зависимость свойств от температуры значительно слабее, чем у ферритов.

При изменении температуры от  $-20$  до  $+60^\circ\text{C}$  у ферритов различных марок коэрцитивная сила уменьшается в 1,5—2 раза, остаточная индукция — на 15—30%, коэффициент прямоугольности — на 5—35%. Параметры металлических сердечников в этом диапазоне температур практически не изменяются.

Температурная стабильность магнитных пленок в настоящее время исследована сравнительно мало. Стабильность параметров металлических магнитных пленок достаточно высока. Они могут устойчиво работать в диапазоне температур  $\pm 150^\circ\text{C}$ .

Перечисленных требований не всегда бывает достаточно для определения пригодности сердечников к работе в конкретной импульсной схеме. К тому же проверять каждый сердечник по всем перечисленным параметрам в производственных условиях затруднительно. Поэтому сердечники обычно испытывают в импульсном режиме по программе, соответствующей рабочим условиям (см. § 33).

Рассмотрим некоторые особенности технологии производства материалов с ППГ и сердечников из них.

Наибольшее применение в качестве материалов с ППГ типа ферритов имеют магниймарганцевые ферриты. Изделия из них имеют форму тороидов относительно малых размеров и массы. Известны подобные кольца с наружным диаметром  $D < 1$  мм; наибольшая величина  $D$  составляет 6—7 мм. Поэтому необходимое количество ферритового порошка сравнительно невелико.

К воспроизводимости свойств предъявляются очень высокие требования. В отдельных устройствах число работающих ферритовых элементов составляет сотни тысяч, и все они должны иметь вполне определенные характеристики.

Поэтому технология производства ферритов с ППГ является прецизионной. Обычно применяют комбинированный метод с использованием осаждения гидроокисей. Исходные материалы берут повышенной степени чистоты (марганец азотнокислый, окись железа, окись магния со степенью чистоты «ЧДА», окись цинка, гидроокись кальция — «Ч», углекислый аммоний — «ХЧ»).

В целом производство является весьма сложным. Так, например, осадок промывают дистиллированной водой от 3 до 5 раз при времени стояния в каждом случае не менее двух часов. Подробно это рассматривается в [Л. 20].

Характерными особенностями производства ферритов с ППГ является высокая температура окончательного обжига (до  $1400^\circ\text{C}$ ) и «воздушная закалка» изделий после спекания, которая состоит в том, что изделия после нагрева и выдержки при максимальной температуре окончательного обжига высыпаяют на воздухе на металлический противень.

С одной стороны, закалка фиксирует фазовые соотношения, полученные при высокой температуре, и предохраняет ферриты от окисления на воздухе, а с другой стороны, она приводит к появлению дополнительных напряжений в образцах и делает изделия хрупкими. Неизбежные отклонения в температуре закалки приводят к различию в магнитных свойствах. Чтобы избежать этой операции, обжиг производят в вакуумной печи или в печи с инертным газом, где можно осуществить медленное остывание без окисления.

Кольца прессуют на автоматических прессах при давлении 2—3  $T/cm^2$ . Давление корректируется в зависимости от прочности отпрессованных деталей и их усадки при обжиге.

Аналогичным образом в специальных пресс-формах изготавливаются изделия и более сложной конфигурации, например многодырочные сердечники (трансфлюксоры, биаксы, «лесенки» и т. д.). Для работы в запоминающих устройствах изготавливаются ферритовые пластины небольших размеров с очень большим числом отверстий. Так, например, известны пластины размером  $15 \times 15$  мм, содержащие  $16 \times 16 = 256$  отверстий. Подобные пластины изготавливаются литьем или ультразвуковым сверлением.

Производство металлических сердечников микронного проката в принципе не отличается от производства сердечников из ленты толщиной от 0,02 мм и выше (см. § 12).

Некоторая особенность состоит только в использовании специального оборудования для прокатки ленты на толщину менее 0,02 мм.

Тонкие пленки изготавливаются или испарением магнитного материала в вакууме с последующим осаждением его на поверхность носителя, или методом катодного распыления в атмосфере газа, или гальваническим способом. Наибольшее распространение получил первый способ.

В качестве подложки применяются изолятор (стекло) или проводник (алюминий). Элементы, изготовленные на стекле, получаются более качественными и имеют меньший разброс параметров, но этот способ дороже и сложнее второго.

Для придания пленочным элементам начальной магнитной ориентации в заданном направлении подложка помещается между полюсами электромагнита. Геометрия тонких пленок в значительной степени определяет характеристики этих элементов. Обычно используются плоские и цилиндрические магнитные пленки. В настоящее время применяются также многослойные пленочные магнитные элементы, обладающие рядом специфических преимуществ.

Рассмотрим выпускаемые в настоящее время отечественные материалы с ППГ.

Выпуск ферритовых сердечников с ППГ недостаточно централизован и на эти изделия существуют только временные технические условия [Л. 32].

Сердечники одной и той же марки, но выпускаемые различными предприятиями, могут значительно отличаться по своим характеристикам. В табл. 26 приведены усредненные магнитные характеристики ферритов с ППГ.

Таблица 26

Статические и динамические параметры ферритовых сердечников с ППГ [Л. 33]

Феррит	Типовой размер, мм	$H_c'$ а/см	$B_p'$ квб/см <sup>2</sup>	$K_{пр}$ ( $H_{max} = 5H_c'$ )	$S_w$ , мкк/см	$\mu$	Точка Кюри, °С
ВТ-1	2×1,4×0,9	1,0	23,5	0,92	0,40	35	280
ВТ-2	3×2×1,2	0,61	23,0	0,93	0,45	50	280
ВТ-2	4×2,5×1,3	0,98	21,0	0,93	0,44	30	260
ВТ-5	3×2×1,3	0,12	18,5	0,92	0,35	25	145
ВТ-6	1,4×1,0×0,6	3,0	17,0	0,86	0,40	14	290
ВТ-7	1,4×1,0×0,6	1,50	18,0	0,96	0,40	15	265
К-28	3×2×1,3	1,12	25,0	0,93	0,47	35	280
К-65	3×2×1,2	0,36	23,0	0,95	0,42	55	210
К-65	10×6×2,4	0,25	21,0	0,96	0,47	60	200
К-132	3×2×1,3	0,175	21,0	0,95	0,32	130	150
К-210	1,2×0,8×0,7	1,05	25,0	0,98	0,45	—	310
К-211	2,5×1,8×1,3	0,20	23,0	0,90	0,34	190	140
К-222	3×2×1,5	0,23	24,0	0,96	0,27	55	200
К-241	4×2,5×1,6	0,73	23,0	0,89	0,50	65	280
К-260	2×1,4×0,9	0,64	25,0	0,90	0,45	70	267
К-261	4×2,5×1,5	1,28	21,0	0,92	0,53	20	300
К-272	2×1,4×0,9	0,21	18,0	0,95	0,37	115	140
К-272	4×2,5×1,5	0,16	21,5	0,96	0,32	130	120
К-432	2×1,4×0,9	0,16	19,5	0,91	0,26	280	140
ЛК-16	5×2,6×2	0,08	9,5	0,70	0,33	80	135
ЛК-19	3,5×2,5×1,2	0,175	19,0	0,95	0,30	125	200
Н-44	3×2,25×1,3	0,42	11,0	0,97	0,50	12	215
Н-85	2×1,3×0,7	0,24	12,0	0,96	0,46	45	175
ПП-24	4×2,5×1,8	0,11	22,0	0,92	0,30	340	140
ФП-1	3×2×1,4	0,24	25,0	0,95	0,33	55	190

Временные технические условия распространяются только на ферритовые сердечники марок ВТ-1, ВТ-2, ВТ-6, ВТ-7 и К-28\*. Геометрические размеры сердечников из этих материалов указаны в табл. 27.

Металлические материалы с ППГ изготавливают в настоящее время в соответствии с ГОСТ 10160—62 «Сплавы железонике-

\* В самое последнее время для ряда марок ферритовых сердечников приняты новые обозначения. Число, стоящее перед буквами, соответствует коэрцитивной силе материала в эрстедах. Например, сердечник из материала ВТ-1 обозначается 1,3ВТ.

Таблица 27

## Геометрические размеры изделий из ферритов с ППГ

Марка феррита	Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Высота, мм	Условное обозначение
ВТ-1 ВТ-6 ВТ-7	$1,4 \pm 0,03$	$1,0 \pm 0,02$	$0,6 \pm 0,03$	„1,4×1“
ВТ-1	$2,0 \pm 0,04$	$1,4 \pm 0,03$	$0,9 \pm 0,05$	„2×1,4“
ВТ-1 ВТ-2 ВТ-5 К-28	$3,0 \pm 0,06$	$2,0 \pm 0,04$	$1,3 \pm 0,07$	„3×2“

левые с высокой магнитной проницаемостью». Этот ГОСТ предусматривает выпуск сплавов марок 50НП, 65НП, 34НКМП, обладающих кристаллографической или магнитной текстурой и прямоугольной петлей гистерезиса. В приложении к стандарту указан режим окончательной термической обработки изделий. В табл. 28 приведены магнитные свойства сплавов 50НП, 65НП и 34НКМП после термической обработки. Свойства металлических сердечников микронного проката приведены в табл. 29.

Пленочные магнитные материалы с ППГ находятся в стадии лабораторных исследований, поэтому нормалей на эти элементы нет.

Сравнительная оценка свойств различных групп материалов с ППГ позволяет сделать следующие замечания о выборе материалов для устройств различного назначения.

При создании аппаратуры, работающей в широком температурном диапазоне, необходимо использовать ленточные сердечники. В переключающих устройствах, работающих на частотах в сотни килогерц, целесообразно применять микронные сердечники из сплавов 79НМ (или 79НМА) с толщиной ленты 3 мм и менее, так как эти сердечники имеют наименьшее значение коэффициента перемагничивания. При частотах перемагничивания в десятки килогерц лучше использовать сердечники из сплава 34НКМП с толщиной ленты 10 и 5 мм, которые имеют высокий коэффициент прямоугольности, достигающий до 0,98.

Следует отметить, что из-за сложности технологического процесса микронные сердечники являются сравнительно дорогими элементами, поэтому во всех возможных случаях желательно использовать более технологичные ферритовые сердечники, особенно при применении сердечников в больших количествах.

Таблица 28

## Магнитные свойства сплавов с ППГ после окончательной термической обработки

(По данным ГОСТ 10160—62)

Марка сплава	Толщина или диаметр, мм	Коэрцитивная сила		$B_r/B_{r\max}$ при $H=800$ а/м (10 э)
		а/м	э	
		не более		не менее
50НП	0,02	20	0,25	0,85
	0,05	18	0,23	
50НП-У	0,02	16	0,20	0,90
	0,05	14	0,18	
65НП	0,02—0,04	6,4	0,08	0,90
	0,05—0,08	3,2	0,04	
	0,10—0,18	2,8	0,035	
	0,20—0,30	2,4	0,03	
	0,35—0,50	2,4	0,03	
34НКМП	0,02—0,04	16	0,20	0,90
	0,05—0,08	12	0,15	0,87
	0,10—0,18	8	0,10	0,85
	0,20—0,50	6,4	0,08	0,85

Таблица 29

## Основные статические параметры микронных сердечников [Л. 34]

Марка сплава	Толщина ленты, мм	$H_c$ , э	$B_r$ , гс	$K_{пр}$ ( $H_{\max} = 5H_c$ )	$\mu_{ср}$	$S_w$ , мкк/см
79НМ	2	0,2	7000	0,93	520	0,25
79НМ	3	0,15	7000	0,93	690	0,32
79НМА	3	0,12	6000	0,93	780	0,32
34НКМП	5	0,3	15 000	0,96	560	0,8
34НКМП	10	0,2	14 500	0,98	300	1,5
50НП	5	0,5	14 000	0,92	480	1,1
50НП	10	0,35	14 000	0,94	500	1,6

В запоминающих устройствах целесообразно применять ферриты марок ВТ-1, ВТ-6, ВТ-7 и К-28, а в логических схемах лучше использовать ферриты ВТ-2, ВТ-5 и др. Размеры сердечников во всех случаях желательно брать минимальными и они обычно определяются числом витков обмоток, размещенных на сердечнике, и мощностью, передаваемой через магнитный элемент.

Применение тонких магнитных пленок целесообразно в малогабаритных, быстродействующих и технологичных запоминающих устройствах.

### § 27. ФЕРРИТЫ ДЛЯ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ (СВЧ)

Успехи, достигнутые за последние годы в технике СВЧ, были бы невысказаны без применения ферритов. Только благодаря им удалось создать устройства, обладающие свойством невзаимности, т. е. такие, которые ведут себя по-разному для волн, распространяющихся через них в противоположных направлениях; стало возможным осуществить устройства, параметры которых можно изменять с помощью внешнего управляющего магнитного поля и т. д.

Диапазон СВЧ охватывает интервал частот от сотен до десятков тысяч мегагерц (гигагерц), т. е. диапазон волн длиной от десятков сантиметров до миллиметров.

Для передачи электромагнитной энергии такой частоты применяются волноводы — полые металлические трубы различной конфигурации, чаще всего с прямоугольной или круглой поперечной формой. На рис. 80 представлены основные типы волноводов и структура поля в них. Электромагнитная энергия передается такими волноводами различной формой

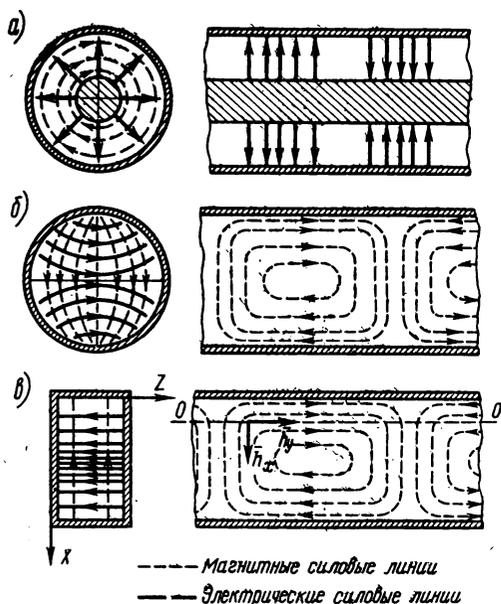


Рис. 80. Основные типы волноводов и структура электромагнитного поля в них:

*a* — коаксиальный, *b* — круглый, *c* — прямоугольный

колебаний, которые характеризуются соответствующей структурой электрического и магнитного полей и поляризацией. *Плоскостью поляризации* называется плоскость, в которой происходят колебания вектора электрического (магнитного) поля, совпадающая с направлением распространения энергии.

Особенности применения магнитных материалов на СВЧ состоят, во-первых в том, что на СВЧ особенно сильно проявляется зависимость свойств магнитного материала от частоты внешнего магнитного поля. Именно на сантиметровых волнах в ферромагнитном материале можно наблюдать вращение плоскости поляризации волны (эффект Фарадея) и другие подобные магнитооптические явления\*. Во-вторых, в том, что ферромагнитный материал, заполняя волновод, является средой, сквозь которую электромагнитная энергия распространяется, т. е. имеет место непосредственная связь магнитного материала и поля. Причем в этом случае характер происходящих явлений определяется не только свойствами магнитного материала, но и свойствами волновода.

Выше было указано, что основная особенность ферритов как магнитного материала состоит в их чрезвычайно высоком удельном электрическом сопротивлении (для СВЧ ферритов порядка  $10^6$ — $10^{10}$  ом·см). Благодаря этому немагнитный ферритовый материал, заполняя волновод, не вносит практически никаких электрических потерь и является как бы прозрачным для электромагнитной энергии, не препятствуя ее распространению. Эта особенность, в свою очередь, придает другое характерное ферритам свойство — сравнительно высокую диэлектрическую проницаемость ( $\epsilon = 6$ — $20$ ). Оба эти свойства существенно влияют на условия распространения электромагнитной волны в феррите.

Важнейшим свойством ферритов, определяющим их уникальное поведение на СВЧ, является магнитная проницаемость. Магнитная проницаемость ферритов в диапазоне СВЧ определяется гироскопическими свойствами электронов.

В § 2 было указано, что под действием постоянного внешнего поля  $\vec{H}_0^{**}$  электроны в атоме совершают дополнительное движение, прецессируя вокруг направления  $\vec{H}_0$ . В результате этого возникает момент  $\vec{\Delta M}$ , действующий навстречу внешнему полю (теорема Лармора). Наложение переменного магнитного поля  $\vec{h}_f$ , перпендикулярного  $\vec{H}_0$ , вызывает прецессию вектора  $\vec{M}_0$  вокруг  $\vec{H}_0$  с частотой  $\omega$ , называемой частотой ферромагнитного резонанса, и приводит к появлению вектора переменной намагни-

\* Магнитооптические явления подробно рассмотрены, например, в [Л. 37].

\*\* В настоящем параграфе индекс «0» означает величины, относящиеся к постоянному полю.

ченности  $\bar{j}$ . Рассматривая спин как элементарную частицу, обладающую электрическим и магнитным моментами, можно описать движение элементарного магнитного момента выражением

$$\frac{d\bar{m}}{dt} = -\gamma [\bar{j} \bar{H}], \quad (73)$$

где  $\bar{m}$  — магнитный момент спина;

$\bar{H}$  — суммарное эффективное поле, действующее на магнитный момент частицы;

$\gamma$  — гиромагнитное отношение, представляющее собой отношение магнитного момента атома к его механическому моменту.

Умножив обе части выражения на число рассматриваемых элементарных частиц в единице объема, получим уравнение Ландау—Лившица

$$\frac{d\bar{M}}{dt} = -\gamma [\bar{J} \bar{H}], \quad (74)$$

где  $\bar{J}$  — макроскопическая намагниченность вещества, т. е. магнитный момент, отнесенный к единице объема.

Более подробный анализ показывает, что однородное переменное поле  $\bar{h}_f$  достаточно малой амплитуды\*, приложенное к намагниченному до насыщения ферриту, создает переменную намагниченность, линейно зависящую от поля

$$\bar{j} = \kappa \bar{h}_f, \quad (75)$$

где  $\kappa$  — магнитная восприимчивость, которая не зависит от амплитуды переменного поля, но зависит от частоты этого поля и величины постоянного подмагничивающего поля.

Наиболее важными особенностями магнитной восприимчивости  $\kappa$  в данном случае являются тензорный характер  $\kappa$  и резонансная зависимость ее компонентов от величины постоянного поля  $\bar{H}_0$  или круговой частоты  $\omega$  переменного поля.

Особый интерес представляет частный случай поперечного магнитного поля с круговой поляризацией. Результаты анализа показывают, что для этого случая магнитная восприимчивость и, следовательно, магнитная проницаемость являются скалярными величинами.

Магнитная проницаемость определяется для двух взаимно противоположных направлений вращения вектора поля следующим выражением:

\* Практически на СВЧ требование малости  $\bar{h}_f$  в большинстве случаев удовлетворяется.

$$\mu_{\pm} = \mu_0 + \frac{\gamma J_0}{\omega_0 \pm \omega}, \quad (76)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная.

Выражение (76) показывает, что прецессирующие спины ферромагнетика оказывают различное воздействие на распространяющуюся волну в зависимости от соотношения между направлениями вращения магнитных моментов и направлением распространения волны и при некоторой частоте  $\omega = \omega_0$  для волны правого вращения имеет место резонанс.

Характер зависимости сохраняется, если считать, что меняется не частота, а поле. Это положение иллюстрируется зависи-

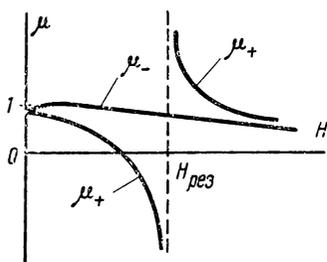


Рис. 81. Зависимости  $\mu_{\pm} = f(H)$

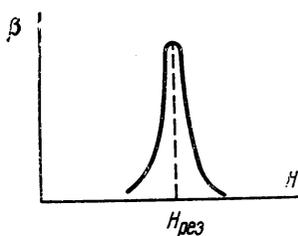


Рис. 82. Зависимость потерь поглощения от напряженности магнитного поля

мостью  $\mu_{\pm} = f(H)$ , изображенными на рис. 81. Величину  $H_{рез}$ , при которой имеет место резонанс, можно вычислить по формуле

$$H_{рез} = \frac{\omega}{\gamma}. \quad (77)$$

Таким образом, свойства феррита зависят от того, насколько близка частота воздействующего переменного поля к резонансной частоте  $\omega_0$ . Именно на СВЧ практически осуществимы условия равенства частоты внешнего воздействующего поля резонансному. Если в волноводе расположить образец феррита и воздействовать на него постоянным магнитным полем, то электромагнитная волна, распространяющаяся по волноводу, будет испытывать различное поглощение в зависимости от величины  $\omega$ . В частности, максимальное поглощение (потери  $\beta$ ) будет при  $\omega = \omega_{рез}$  (рис. 82).

Описанные выше свойства магнитной проницаемости  $\mu_{\pm}$  приводят к ряду явлений, которые используются в технике СВЧ.

Познакомимся с некоторыми устройствами СВЧ, основанными на использовании свойств ферритов.

Рассмотрим круглый волновод с аксиально намагниченным расположенным по его оси цилиндрическим ферритовым стержнем. Предполагается, что ферритовый стержень незначительно искажает структуру поля в волноводе, поэтому исходная линейная волна может быть разложена на две волны круговой поляризации, имеющих противоположное направление вращения. Таким образом, феррит намагничивается постоянным полем перпендикулярно плоскости круговой поляризации переменного поля, поэтому обе составляющие будут распространяться с различными скоростями, вследствие чего результирующая линей-

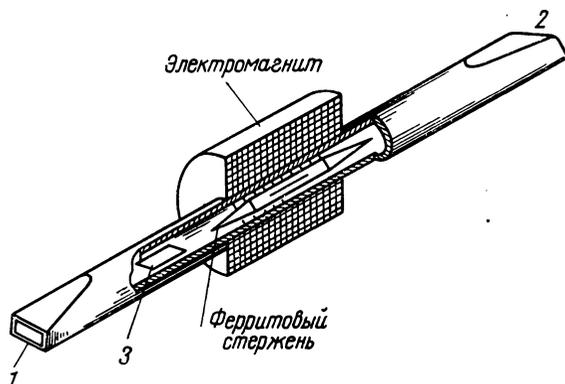


Рис. 83. Схематическое устройство вентиля, основанного на использовании эффекта Фарадея

ная волна на выходе из феррита будет поляризована под некоторым углом к первоначальному направлению. Величина угла поворота  $\Delta\theta_{\text{п}}$  зависит от длины феррита и эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей среды, а направление этого поворота определяется только направлением приложенного поля  $H$  и не зависит от того, распространяется ли электромагнитная волна в направлении магнитного поля или в противоположном направлении. Это явление называется эффектом Фарадея и может быть положено в основу действия целого ряда устройств.

На рис. 83 дана схема вентиля, основанного на использовании эффекта Фарадея. *Вентиль*, или *изолятор*, — устройство, которое беспрепятственно пропускает электромагнитную энергию в одном направлении и не пропускает в противоположном. Вертикально линейно поляризованная волна на входе 1 волновода, пройдя участок с ферритом, окажется повернутой на некоторый угол (например, равный  $45^\circ$ ) и если выход 2 волновода соответствует такой поляризации, то волна беспрепятственно выйдет из

устройства. Волна же, распространяющаяся в обратном направлении, повернется на тот же угол  $45^\circ$  в том же направлении и, пройдя участок с ферритом, окажется повернутой на  $90^\circ$  относительно своего первоначального положения и ориентации входного волновода. В таком случае поляризации волны и волновода не соответствуют друг другу, и энергия не может распространяться в волновод *1*. Электромагнитная волна будет поглощаться поглотительной пластиной *3*, и вход *1* окажется изолированным для этого направления распространения энергии.

На основе эффекта Фарадея могут быть созданы также переключающие, модулирующие и прочие устройства. С точки зрения взаимной ориентации внешнего намагничивающего поля и направления распространения электромагнитной энергии ферритовые устройства делятся на устройства с продольным и поперечным полем. Рассмотренное устройство относится к типу ферритовых устройств с продольным полем.

Не менее широкое применение находят устройства с поперечным полем, выполняемые, как правило, на прямоугольных волноводах. Простейшими из них являются *невзаимный фазовращатель и резонансный вентиль*.

Невзаимный фазовращатель называется так из-за различия (по величине и знаку) фазовых сдвигов, вносимых им для двух противоположных направлений распространения электромагнитной энергии.

Максимальное взаимодействие между электромагнитной энергией и прецессирующими спинами имеет место в том случае, когда внешнее намагничивающее поле перпендикулярно плоскости круговой поляризации СВЧ магнитного поля и направления вращения этого поля и спинов совпадают.

Если рассмотреть картину СВЧ магнитного поля в прямоугольном волноводе (см. рис. 80), которое имеет только компоненты в плоскости  $X-Y$  ( $\vec{h}_x$  и  $\vec{h}_y$ ), то можно увидеть, что существует некая плоскость  $OO$ , в которой они равны, т. е. имеет место круговая поляризация поля (эта плоскость в волноводе называется *плоскостью круговой поляризации*). Поэтому, если ферритовую пластину поместить в плоскости круговой поляризации и намагничивать так, чтобы направление прецессии совпа-

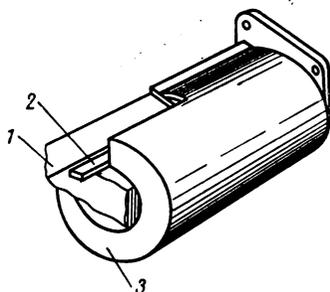


Рис. 84. Схематическое устройство вентиля, основанного на использовании эффекта резонансного поглощения:

1 — волновод; 2 — ферритовая пластина; 3 — постоянный магнит

---

дало с направлением распространения электромагнитной энергии, то будет иметь место сильное взаимодействие и наоборот.

Резонансный вентиль представляет собой прямоугольный волновод с соответствующим образом установленной ферритовой пластиной (рис. 84). Магнитное поле регулируется для получения ферромагнитного резонанса. В этом случае для одного (обратного) направления СВЧ поля, совпадающего с вращением спинов, будет иметь место большое поглощение, для противоположного (прямого) — малое. Такие вентили имеют очень большое *вентильное отношение*, или *выигрыш*, определяемое, как отношение потерь энергии в обоих направлениях  $V = \frac{\beta_{обр}}{\beta_{пр}}$

и достигающее величины порядка нескольких сотен.

Невзаимный, или необратимый, фазовращатель также основан на различии магнитной проницаемости для двух направлений вращения круговой поляризации или направлений распространения (см. рис. 81). Это различие приводит соответственно к увеличению или к уменьшению фазовых постоянных для двух противоположных направлений распространения. Разница по фазе, или так называемый дифференциальный (невзаимный) фазовый сдвиг пропорционален длине участка с ферритом. Устройство с дифференциальным фазовым сдвигом, равным  $180^\circ$ , называется *гиратором*. Фазовращатель характеризуется *добротностью*, равной отношению фазового сдвига к вносимым потерям:

$$Q = \frac{\Delta\varphi}{\beta} \left[ \frac{\text{град}}{\text{дб}} \right].$$

Хорошие фазовращатели имеют  $Q \approx 500-800$ . Величина вносимого дифференциального сдвига зависит от параметров феррита, внешнего магнитного поля и параметров волноводной системы.

С применением ферритов на СВЧ были разработаны еще десятки самых разнообразных устройств, рассмотрение которых не входит в задачи настоящей книги (см. в [Л. 36; 38 и 39]).

Требования, предъявляемые к ферритам для СВЧ, определяются конкретным назначением устройства, в котором этот материал предполагается использовать, и условиями его работы. Это зачастую приводит к тому, что к ферритам, работающим в различных участках диапазона СВЧ, предъявляются требования, существенно различные, а иногда и взаимно противоречащие. Это значительно усложняет требования к ферритам. Ферритовые детали, применяемые в СВЧ, характеризуются:

1) активностью, т. е. величиной минимального намагничивающего поля, необходимого для обеспечения требуемого эффекта (фазового сдвига, поворота плоскости поляризации); желательно, чтобы активность была наибольшей;

2) потерями, которые складываются из электрических и магнитных потерь в феррите; желательно, чтобы потери были минимальными;

3) температурными свойствами, определяющими зависимость магнитных свойств феррита от температуры; желательна стабильность свойств в большем интервале температур.

Исходя из этого, к ферритам предъявляются следующие основные требования:

1) высокое удельное объемное электрическое сопротивление ( $10^8$ — $10^{11}$  ом·см), что обеспечивает небольшие электрические потери;

2) высокая плотность материала, что способствует уменьшению магнитных потерь за пределами ферромагнитного резонанса;

3) высокая активность материала, которую можно характеризовать величиной антисимметричного компонента тензора магнитной проницаемости;

4) высокая температура Кюри, что способствует расширению температурного диапазона;

5) высокая температурная стабильность, что определяет рабочий интервал температур;

6) дополнительные специфические требования, предъявляемые к ферритам конкретным назначением устройства. Например, величина так называемого «порогового» поля для устройств, работающих на очень больших уровнях СВЧ мощности, под которым понимают максимальное магнитное поле высокой частоты, выше которого начинают проявляться нелинейные эффекты в феррите.

В коротковолновой части СВЧ диапазона (при волнах порядка 3—5 см) поставленные требования выполнить сравнительно легко. Поэтому наиболее оснащенным ферритовыми устройствами оказался именно сантиметровый участок диапазона СВЧ, в котором применяют магниймарганцевые, никельмедные и некоторые другие типы ферритов.

По мере увеличения длины волны трудности создания СВЧ ферритов существенно возрастают. Это связано в первую очередь с уменьшением взаимных эффектов при ферромагнитном резонансе и ростом магнитных потерь в феррите, что можно проиллюстрировать следующим примером.

Выигрыш  $B$  для резонансного вентиля определяется формулой

$$B = 2,04 \left( \frac{f [\text{МГц}]}{2\Delta H [\text{э}]} \right)^2, \quad (78)$$

которая показывает, что с уменьшением частоты вентиляльное отношение (выигрыш) быстро падает. Так, например, если задаться шириной кривой поглощения, например, равной 250 э, то по-

лучим следующие значения выигрыша в различных точках диапазона:

$$\text{при } \lambda = 3 \text{ см; } B = 2,04 \left( \frac{10^4}{250} \right)^2 = 3264;$$

$$\lambda = 30 \text{ см; } B = 2,04 \left( \frac{10^3}{250} \right)^2 = 32,64.$$

Это положение может быть исправлено только применением материалов с узкой резонансной кривой.

Дополнительные трудности возникают за счет роста магнитных потерь в ферритах. Это связано с тем, что резонансное поле с увеличением длины волны уменьшается и феррит может оказаться немагнитным до насыщения. При этом возможно перекрытие области резонансных потерь во внешнем поле с областью потерь в малых полях (рис. 85).

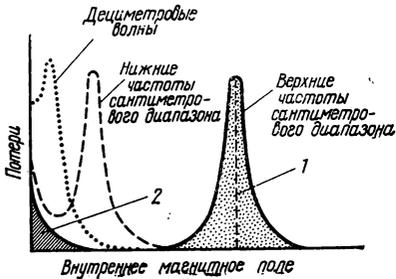


Рис. 85. Зависимость потерь в феррите от внутреннего магнитного поля:

1 — резонансные потери; 2 — потери в слабых полях

Теоретически потери в слабых полях имеют место в не полностью намагниченном материале при частотах до

$$\omega_{\max} = \gamma (H_a + 4\pi J_s), \quad (79)$$

где  $H_a$  — поле анизотропии;  $J_s$  — намагниченность насыщения.

Это условие определяет для длинного края диапазона СВЧ требование выбора феррита с меньшей величиной  $J_s$ .

Таким образом, можно сформулировать следующие требования к ферритам длинноволнового участка СВЧ диапазона:

1) малая ширина резонансной кривой  $2\Delta H$  для получения необходимых величин вентильного отношения;

2) малая величина  $J_s$  для уменьшения потерь в слабых магнитных полях.

Наиболее пригодными ферритами для этих целей являются ферриты-алюминаты и хромиты (например, марки ХМ-1, ХМ-3), обладающие низкой намагниченностью ( $4\pi J_s \approx 500 \text{ гс}$ ).

Заметного улучшения качества ферритов-алюминатов можно добиться введением небольших добавок меди. Это снижает температуру спекания, улучшает воспроизводимость ферритов и повышает температуру Кюри.

Весьма перспективными материалами для длинноволнового участка СВЧ диапазона являются разработанные в последнее время монокристаллы ферритов, отличающиеся узкой резонансной кривой. Например, ширина кривой монокристалла никелевого феррита равна 50 э [Л. 7]. Еще больший интерес представ-

ляют в этом отношении ферриты со структурой гранатов. Поликристаллические гранаты имеют такую же ширину кривой, как и монокристалл никелевого феррита, но более низкую намагниченность насыщения. У монокристаллов иттриевого граната ширина линии равна всего лишь нескольким эрстедам, а иногда и менее эрстеда [Л. 7]. Температура Кюри всех феррогранатов одного порядка и является сравнительно высокой (200—300° С).

При разработке ферритов для миллиметрового участка СВЧ диапазона проблемы приобретают уже иной характер, определяемый спецификой этих условий. Для частот этого участка диапазона и соответствующих напряженностей резонансного поля, которые имеют очень большие значения, доменная структура ферритов вообще исчезает и потери, обуславливаемые их природой, отсутствуют. Основные требования к ферритам в этом случае ограничиваются требованием высокого электрического сопротивления и малой магнитокристаллической анизотропии. Этим требованиям могут удовлетворить многие ферриты, в частности, никельцинковые и марганеццинковые. Присадкой меди к никельцинковым ферритам можно увеличить их плотность, чем значительно снижается анизотропия. Присадкой кобальта, имеющего положительную анизотропию, также можно добиться аналогичного результата.

Основной трудностью для устройств резонансного типа являются реально осуществимые поля, необходимые для достижения резонанса, значения которых достигают величин порядка 10—100 кэс. Интересные возможности в этом направлении открывает использование бариевых ферритов (см. § 23), обладающих сильным внутренним полем анизотропии (до 17 000 э при намагниченности около 5000 гс). Для работы в условиях резонанса на четырехмиллиметровых волнах требуется дополнительное внешнее поле около 8000 гс. Некоторые из этих материалов, обладающие внутренним полем анизотропии до 28 000 э, могут позволить сконструировать устройство для трехмиллиметровых волн.

Технология изготовления ферритов для СВЧ принципиально ничем не отличается от обычной технологии изготовления и обработки ферритов (см. § 14). Лишь одно обстоятельство вносит специфический оттенок в технологию производства ферритов для СВЧ: малейшее неточное выполнение технологического процесса может существенно сказаться на свойствах материала. Например, по данным некоторых зарубежных фирм полезный выход ферритового материала для СВЧ составляет 10—20% в партии. Особенно высокие требования предъявляются к исходному сырью и режимам обжига.

Весьма перспективным для получения деталей больших размеров и с повышенной плотностью является метод гидростати-

ческого прессования. В этом случае шихта загружается в резиновый карман, который помещается в резервуар масляного насоса. Существенными преимуществами этого метода по сравнению с прессованием в пресс-формах является то, что давление на деталь распределяется равномерно и достигает нескольких тысяч атмосфер. Этот метод имеет большое будущее, особенно для изготовления ферритов дециметрового диапазона, где именно и необходимы указанные выше качества.

В связи со все большим применением в технике СВЧ монокристаллов ферритов и ферритов со структурой гранатов, рассмотрим кратко особенности технологии производства этих материалов.

В практике изготовления монокристаллов ферритов применяются два метода: выращивание монокристаллов в расплаве и пламенно-водородный метод (метод Вернейля).

Первый метод заключается в выращивании монокристаллов в расплавленном растворителе. Растворители должны иметь низкую температуру плавления и особую летучесть. В расплавленном состоянии они должны хорошо растворять исходные окислы, но не сам феррит, и легко отделяться от выращенных монокристаллов. Известны различные рецепты подобных растворителей. Технологический процесс заключается в следующем. Шихту составляют из растворителя и исходных компонентов феррита. После тщательного перемешивания она подвергается нагреванию и охлаждению по соответствующему температурно-временному режиму. После охлаждения монокристалл отделяется. Таким образом, могут быть получены образцы размером до нескольких миллиметров.

Второй метод заключается в выращивании монокристаллов в кислородно-водородном пламени кристаллизационного аппарата. В этом случае шихта равномерно подается через зону пламени горелки на жаропрочную подложку-свечу. На свече сначала образуется конус из спеченных частиц, а затем из вершины конуса вырастает монокристалл. По мере роста монокристалла свеча с помощью механизма постепенно опускается. Для выращивания ориентированных монокристаллов на свечу устанавливают затравку в виде соответственно ориентированного осколка монокристалла. Таким образом, можно выращивать более крупные образцы диаметром до 10—15 мм, длиной 50—80 мм и более. Высокое качество получаемых монокристаллов определяется в первую очередь высокой степенью чистоты исходных материалов. Ферриты со структурой гранатов (феррогранаты иттрия) и других редкоземельных элементов (лантанидов) выращиваются как в виде поликристаллических тел, так и в виде монокристаллов. Кристаллы гранатов выращивают в окиси свинца с выдержкой при 1325° С и последующим медленным охлаждением до 900° С.

При обработке готовых ферритовых деталей, которая осуществляется обычными способами (шлифовкой), возникают некоторые специфические трудности. В одном случае требуется обрабатывать ферритовые детали для длинноволновой части СВЧ диапазона с очень большими размерами, например  $50 \times 20 \times 800$  мм. Трудности выполнения такой задачи возникают уже при изготовлении заготовки такой длины — она неизбежно

Таблица 30

## Параметры некоторых марок ферритов для СВЧ

Марка феррита*	$\mu_a$	$\mu_{\max}$	$H_c, \text{э}$	$B^{**} \cdot 100, \text{гс}$	$4\pi J_s, \text{гс}$	$\frac{\epsilon'}{\epsilon_0}$	$\frac{\epsilon''}{\epsilon_0}$	$2\Delta H, \text{э}$	$\theta, \text{°C}$	$\rho, \text{ом}\cdot\text{см}$
31	6	14	10,5	650	—	4,9	0,004	—	300	$10^8$
Д10	5	12	10,0	450	750	9,0	—	400	—	—
ХМ-3	12	25	2,0	500	550	5,1	0,009	240	150	$10^{10}$
НМ-2	55	125	2,5	2600	3000	15,0	0,01	250	520	$10^8$
М-50	85	300	2,5	3600	4200	7,2	0,045	460	400	$5 \cdot 10^8$
П-28	—	—	0,2	2800	3300	11,0	0,005	95	170	$10^7$

\* В настоящее время с целью наведения единообразия в обозначениях СВЧ ферритов вводится новая система обозначения, по которой марка, например 10СЧ1, означает материал СВЧ диапазона, соответствующей цифровому индексу разновидности.

\*\* Значение индукции, соответствующее  $H = 100$  э.

Таблица 31

## Параметры некоторых промышленных образцов ферритовых деталей, применяемых в волноводных устройствах

Тип устройства	Марка феррита	Параметры деталей
Вращатель поляризации	М-77	$\Delta\theta_n = 90^\circ; \beta = 0,3 \text{ дб}$
	И-3	$\Delta\theta_n = 45^\circ; \beta = 0,2 \text{ дб}$
Необратимый фазовращатель	7-ММ 2	$\Delta\varphi = 90^\circ; \beta = 0,2 \text{ дб}; H_0 = 1400 \text{ э}$
	А615С	$\Delta\varphi = 90^\circ; \beta = 0,2 \text{ дб}; H_0 = 700 \text{ э}$
Резонансный вентиль	ММ-5	$\beta_{\text{обр}} \geq 20 \text{ дб}; \beta_{\text{пр}} \leq 0,6 \text{ дб}; H_0 \leq 1300 \text{ э}$
	78	$\beta_{\text{обр}} \geq 22 \text{ дб}; \beta_{\text{пр}} \leq 0,7 \text{ дб}; H_0 \leq 1000 \text{ э}$

деформируется при обжиге. Однако способ крепления ферритовых деталей в устройстве (приклейка, пайка и т. п.) позволяет изготавливать деталь в виде отдельных частей приемлемого размера. В другом случае требуется обрабатывать ферритовые детали для миллиметрового диапазона волн с очень малыми размерами, например  $0,5 \times 1,0 \times 30$  мм. Здесь трудности сопряжены с изготовлением миниатюрной керамической детали с жесткими допусками на размер, достигающими нескольких микрон. В этом отношении весьма перспективным является ультразвуковой способ обработки ферритов, получивший применение в последнее время.

В табл. 30 приведены параметры некоторых марок ферритов для СВЧ, а в табл. 31 — параметры промышленных ферритовых элементов, применяемых в волноводных устройствах.

## § 28. ПРОЧИЕ МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Кроме рассмотренных выше основных групп магнитных материалов, в технике находят применение и некоторые другие, имеющие ограниченные области применения. Подробное их рассмотрение не входит в задачи настоящей книги, поэтому коротко остановимся только на некоторых из них.

**Термомагнитные сплавы.** От этих сплавов требуется большая и желательно линейная зависимость индукции от температуры в рабочем диапазоне (в большинстве случаев приблизительно в интервале  $\pm 60^\circ \text{C}$ ).

Основная область применения термомагнитных сплавов — магнитные шунты в системах с постоянными магнитами. Принцип работы такого шунта заключается в следующем. Созданный постоянным магнитом магнитный поток распределяется между полезным воздушным зазором и магнитным шунтом пропорционально их магнитным проводимостям. Рассмотрим случай повышения температуры, что сопровождается уменьшением потока постоянного магнита. Поскольку проводимость воздушного зазора при этом не меняется, то при отсутствии магнитного шунта полезная индукция также уменьшилась бы. Наличие шунта позволяет обеспечить постоянство индукции в рабочем зазоре, так как при повышении температуры индукция в шунте падает (проницаемость материала уменьшается) и шунт начинает проводить относительно меньшую часть общего потока.

Таким образом, можно компенсировать температурную погрешность, возникающую не только от изменения потока магнита, но и в результате зависимости от температуры и других элементов устройства (сопротивления проводов, упругости пружинок для создания противодействующего момента в электроизмерительных приборах и др.).

Терромагнитные сплавы находят применение и в некоторых других областях: в индукционных печах для поддержания заданной температуры, в реле, момент срабатывания которых зависит от температуры, и т. д.

Поскольку большая зависимость индукции от температуры для ферромагнетиков наблюдается в области, близкой к точке Кюри, то последняя для терромагнитных сплавов должна находиться вблизи от рабочих (комнатных) температур. Из ферромагнитных элементов лучше всего этому соответствует никель ( $\Theta = 350^\circ\text{C}$ ); для железа и кобальта температура Кюри намного выше. Материалы с еще более низкой точкой Кюри могут быть получены введением в никель немагнитных присадок.

Таблица 32

**Магнитные свойства терромагнитного  
Ni—Fe—Cr сплава марки Н38Х14\*  
(ЧМТУ 176/4575—56)**

Температура, °С	$B_{100}^{**}$ , кгс	$\Delta B$ (перепад индукции), кгс
-20	2,1—3,7	—
+20	0,35—2,4	1,8—2,4
+35	0,20—1,6	0,35—1,3

\* Свойства указаны после отжига в контейнере без подсоса воздуха при температуре  $800^\circ\text{C}$  в течение 2 ч.

\*\* Индукция в поле  $H=100$  э.

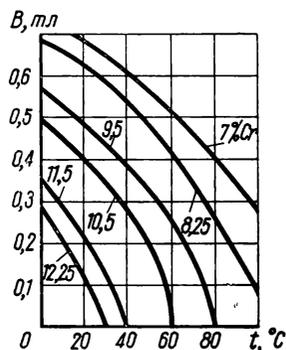


Рис. 86. Кривые зависимости магнитной индукции сплава Ni—Fe—Cr с содержанием 35% Ni от температуры и содержания хрома в поле напряженностью 100 э

Наибольшее применение среди терромагнитных сплавов имеют сплавы никель — хром — железо (компенсаторы). На рис. 86 приведены кривые зависимости магнитной индукции этих сплавов от температуры и содержания хрома. Достоинствами компенсаторов являются полная обратимость свойств в диапазоне изменения температур  $\pm 70^\circ\text{C}$ , высокая воспроизводимость характеристик, хорошая механическая обрабатываемость.

В табл. 32 приведены свойства компенсатора марки Н38Х14.

Кроме компенсаторов, иногда применяют также и некоторые другие сплавы, однако все они имеют существенные недостатки.

Сплавы никель—медь (кальмаллой) обладают сравнительно малой индукцией, поэтому магнитные шунты из этих сплавов должны иметь большое сечение. Сплавы никель—железо (термаллой) под действием отрицательных температур необратимо изменяют свои свойства и, кроме того, имеют резкую зависимость точки Кюри от состава (изменение содержания никеля на

0,25% смещает точку Кюри на  $10^\circ\text{C}$ ), т. е. плохую воспроизводимость характеристик.

Термомагнитные сплавы поставляются в виде лент и полос толщиной, например, 0,8; 1,0; 1,2; 1,4 и 1,5 мм при ширине 20, 25, 30 и 35 мм в нагартованном состоянии. Окончательный отжиг производится на предприятии-изготовителе изделий.

В последнее время в качестве термомагнитных материалов стали применять также ферриты с низкой точкой Кюри.

**Магнитострикционные материалы.** При намагничивании ферромагнитного тела происходит изменение его объема, а также

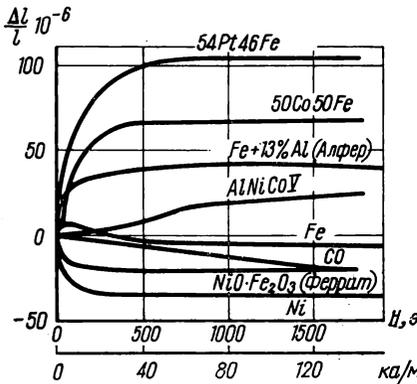


Рис. 87. Зависимость коэффициента магнитострикции от напряженности поля для некоторых материалов

размеров в направлении действия поля (линейный или продольный эффект) и в направлении, перпендикулярном полю (поперечный эффект). Если по стержню протекает намагничивающий его ток, то стержень закручивается (эффект Видеманна). Все эти явления представляют собой магнитостриксию, хотя в большинстве случаев под этим названием подразумевают только продольный эффект (эффект Джоуля).

Магнитостриксию имеет непосредственное техническое применение в магнитострикционных вибраторах (генераторах звуковых и ультразвуковых колебаний. Такие вибраторы используют в технологических установках по обработке ультразвуком (механическая обработка хрупких и твердых материалов, обезжиривание и др.), в эхолотах, дефектоскопах, а также в некоторых радиотехнических схемах и устройствах (взамен кварца для стабилизации частоты, в электромеханических фильтрах и т. д.).

Линейную магнитостриксию обычно оценивают величиной коэффициента магнитострикции

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l}, \quad (80)$$

где  $l$  — длина стержня при отсутствии поля;

$\Delta l$  — изменение длины под действием поля.

Коэффициент магнитострикции  $\lambda$  может быть как отрицательным, так и положительным.

На рис. 87 представлена зависимость коэффициента линейной магнитострикции от напряженности поля для некоторых ма-

териалов. Из приведенных кривых видно, что наибольшей магнитострикцией обладает сплав платины с железом, однако его применение в технике ограничено высокой стоимостью. Редко применяют также железокобальтовые сплавы, что объясняется их малой антикоррозийной стойкостью, которая требуется при работе вибраторов в воде, плохими технологическими свойствами, а также большой стоимостью.

Наибольшее применение в качестве магнитострикционных материалов имеют никель, никелькобальтовые ферриты и резе железокремнистый сплав алфер.

Никель имеет большую абсолютную величину  $\lambda = -35 \cdot 10^{-6}$ . Обычно применяют никель марки Н (ГОСТ 849—56), толщиной 0,1 мм в виде жесткой неотожженной ленты. После вырубки пластины оксидируют нагреванием на воздухе до 800°С в течение 15—25 мин. Образованная таким образом оксидная пленка служит для электрической изоляции пластин при сборке пакета. Никель обладает высокими антикоррозийными свойствами и малым температурным коэффициентом модуля упругости.

В. С. Меськин и Ю. М. Марголин впервые показали, что железоалюминиевый сплав, содержащий 14% Al, имеет  $\lambda$  (положительный) больше, чем никель, и в 12 раз большее электросопротивление. Это позволяет применять в пакетах листы толщиной не 0,1 мм, как для никеля, а в два-три раза толще. В дальнейшем был предложен сплав алфер (13% Al). Недостатками магнитострикционных железоалюминиевых сплавов являются трудность прокатки, хрупкость и повышенная коррозионность.

В последнее время все большее применение получают магнитострикционные ферриты.

---

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ИСПЫТАНИЙ  
МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ\*

## § 29. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

**М**агнитные измерения представляют собой обширную область измерительной техники. Испытания свойств магнитных материалов являются только частью этой области. Методику испытаний и аппаратуру для них в зависимости от назначения можно разделить на три вида:

- 1) для приемно-сдаточных испытаний в соответствии с нормативными документами на магнитные материалы;
- 2) для текущего производственного контроля на отдельных стадиях производства магнитных материалов;
- 3) для научно-исследовательских работ.

В настоящей книге кратко рассмотрены только первые два вида испытаний.

Как следует из предыдущих глав, величинами, которые надо измерять при испытаниях магнитных материалов, в большинстве случаев являются напряженность магнитного поля, магнитная индукция и потери на перемагничивание. Диапазон изменения этих величин, а также условия измерения (температура, частота и др.) для различных групп материалов весьма многообразны. Поэтому для решения указанных задач используются различные методы и аппаратура.

Основными методами определения  $B$  и  $H$  являются баллистический, магнитометрический, электродинамический, индукционный, основанный на эффекте Холла, метод с использованием явления ядерного резонанса, мостовой, осциллографический\*\*; а основными методами для измерения потерь — ваттметровый и калориметрический.

Приведем характеристику каждого из указанных методов.

---

\* Предполагается, что начальные сведения по магнитным и электрическим измерениям например, в объеме [Л. 41], читателю известны.

\*\* Баллистический, мостовой и осциллографический методы являются разновидностями индукционного.

**Баллистический метод.** Этот метод позволяет непосредственно измерять изменение потокосцепления  $\Delta\Psi$ . О величине  $\Delta\Psi$  судят по количеству электричества, протекающего в замкнутом контуре, состоящем в простейшем случае из измерительной катушки и прибора для измерения количества электричества. В качестве последнего применяют баллистический гальванометр.

При этом

$$\Delta\Psi = C_{\Phi}\alpha, \quad (81)$$

где  $C_{\Phi}$  — постоянная баллистического гальванометра по магнитному потоку;

$\alpha$  — первый максимальный отброс указателя, возникший в результате изменения потока.

Для измерения магнитной индукции измерительная катушка должна охватывать образец, прилегая возможно ближе к его поверхности и располагаясь таким образом, чтобы витки были перпендикулярны к направлению магнитного потока. Изменение магнитной индукции

$$\Delta B = \frac{C_{\Phi}\alpha}{(S\omega)_B}, \quad (82)$$

где  $(S\omega)_B$  — произведение средней площади измерительной катушки на число ее витков (постоянная катушки).

В некоторых случаях, например при испытаниях образцов из пермаллоев в защитных каркасах (см. § 30), между образцом и измерительной обмоткой существует воздушный зазор, на поток в котором необходимо вводить поправку. В этом случае

$$\Delta B = \frac{C_{\Phi}\alpha}{(S\omega)_B} - \mu_0 H \left( \frac{S}{S_1} - 1 \right), \quad (83)$$

где  $S_1$  — площадь сечения образца;

$H$  — напряженность магнитного поля.

Изменение напряженности поля  $\Delta H$  подсчитывается по формуле

$$\Delta H = \frac{C_{\Phi}\alpha}{\mu_0 (S\omega)_H}, \quad (84)$$

где  $(S\omega)_H$  — постоянная измерительной катушки для измерения напряженности поля.

При измерении напряженности поля в образце пользуются тем обстоятельством, что касательная составляющая напряженности магнитного поля на границе сред с разными значениями магнитной проницаемости (образец—воздух) непрерывна. Следовательно, измерив  $H$  на поверхности образца, можно считать (с допустимым для большинства практических случаев приближением), что это же поле имеет место в образце.

Обмотку ( $S\omega$ )<sub>H</sub> выполняют в виде плоской катушки, располагая ее перпендикулярно к направлению напряженности магнитного поля на одной из сторон образца и возможно ближе к нему.

Баллистический гальванометр представляет собой лабораторный прибор, требующий стационарной установки (в последнее время появились переносные баллистические гальванометры).

Постоянная по магнитному потоку  $C_{\Phi}$  баллистического гальванометра сложным образом зависит от сопротивления внешней цепи. Поэтому каждый раз перед началом измерений необходимо градуировать гальванометр (определять  $C_{\Phi}$ ), что значительно усложняет процесс измерений. Необходимо также отметить, что показание баллистического гальванометра тем точнее, чем меньше продолжительность импульса по сравнению с периодом собственных колебаний подвижной части гальванометра.

Баллистический метод является классическим методом определения магнитных характеристик в постоянных магнитных полях. Предельную погрешность метода можно оценить приблизительно 0,1—0,2%, а порог чувствительности величиной потока  $10^{-8}$  вб (1 мкс) [Л. 41]. Основным недостатком метода являются большая трудоемкость, невозможность проведения непрерывных измерений, трудность автоматизации.

В ряде случаев вместо баллистического гальванометра может быть использован веберметр (магнитоэлектрический или фотокомпенсационный).

Веберметр является переносным прибором и имеет градуированную в единицах магнитного потока шкалу. Его постоянная существенно зависит от внешнего сопротивления только начиная от некоторого максимально допустимого значения, которое указывается на шкале прибора и обычно составляет десятки ом.

Для измерения магнитных величин к зажимам веберметра подключают измерительную катушку, изменение потокосцепления которой непосредственно и отсчитывается по шкале прибора. Простота эксплуатации обеспечивает применение веберметра в цеховых условиях и при массовых испытаниях.

Точность веберметра зависит от продолжительности импульса. При медленных (секунды и минуты) изменениях магнитного потока веберметр значительно точнее баллистического гальванометра, при быстрых изменениях (доли секунды) — точнее баллистический гальванометр.

По чувствительности к магнитному потоку фотокомпенсационные веберметры и баллистические гальванометры могут быть соизмеримы друг с другом, чувствительность магнитоэлектрических веберметров значительно ниже. Для иллюстрации этого

положения приведем некоторые данные соответствующих приборов.

Фотокомпенсационный микровеберметр (микровольтампер-веберметр) типа Ф18 имеет предел 15 *мквб*, постоянную  $C_{\Phi} = 20 \cdot 10^{-8}$  *вб/дел* и обеспечивает точность измерения 4% при внешнем сопротивлении не свыше 100 *ом*. Известны фотокомпенсационные веберметры с  $C_{\Phi} = 2 \cdot 10^{-8}$  *вб/дел*.

Баллистический гальванометр типа М17/12 имеет  $C_{\Phi} = 80 \times 10^{-8} - 30 \cdot 10^{-8}$  *вб/дел*. Магнитоэлектрический веберметр типа М119 имеет  $C_{\Phi} = 10^{-4}$  *вб/дел* и погрешности 1,5% (при измерительной катушке до 8 *ом*), 2,5% (до 20 *ом*) и 4% (до 30 *ом*).

При сравнении различных приборов по чувствительности к магнитному потоку необходимо учитывать не только значения постоянной, но также допустимое значение сопротивления внешней цепи (измерительной катушки), на которое может быть включен прибор. Чем больше это сопротивление, тем большие величины  $S\omega$  могут иметь измерительные катушки и, следовательно, тем меньшие значения  $B$  и  $H$  для данной  $C_{\Phi}$  можно измерить. В этом отношении баллистические гальванометры имеют значительные преимущества по сравнению с веберметрами.

Отметим также, что самыми дорогими, сложными и дефицитными из рассмотренных приборов являются фотокомпенсационные веберметры, а самыми простыми и дешевыми — магнитоэлектрические веберметры.

**Магнитометрический метод.** Этот метод основан на взаимодействии подвижной магнитной стрелки магнитометра и намагниченного образца\*. По углу отклонения магнитной системы от начального положения определяется магнитный момент  $M$  образца. Далее можно подсчитать  $J$ ,  $V$  и  $H$ .

Метод отличается высокими точностью и чувствительностью. Предельная погрешность метода имеет порядок десятых долей процента [Л. 41], а порог чувствительности примерно  $10^{-3} - 10^{-4}$  *а/м*. Высокая чувствительность и точность метода обеспечили ему широкое применение при измерениях слабых полей (например, поля Земли) и для решения некоторых метрологических задач. В области испытаний магнитных материалов вследствие большой сложности метод находит применение только в качестве коэрцитиметров—приборов для измерения коэрцитивной силы.

**Электродинамический метод.** В этом методе напряженность магнитного поля определяется по углу поворота катушки с известным электрическим током, помещенной в измеряемое поле.

На этом принципе выполнен, например, прибор типа ИМИ-1,

---

\* В последнее время широкое применение получили феррозондовые магнитометры, основанные на другом принципе (см. например, [Л. 4]).

позволяющий измерять поля в пределах от  $8 \cdot 10^4$  до  $130 \times 10^4$  а/м с погрешностью не более 3,5%.

Достоинство метода состоит в том, что шкала указателя может быть отградуирована непосредственно в единицах измеряемой величины (напряженности поля или индукции). Основным недостатком электродинамического метода являются малые точность и чувствительность.

**Индукционный метод.** Метод основан на измерении переменной э. д. с., индуктируемой в катушке при изменении сцепляющегося с ней магнитного потока.

Он может быть использован для измерения как постоянных, так и переменных магнитных полей.

При измерении неизменного во времени потока измерительная катушка вращается в магнитном поле с постоянной скоростью. Устройство, основанное на этом принципе, обычно называют измерительным генератором. В области испытания магнитных материалов они находят применение, в основном, как коэрцитиметры (см. § 32).

Основными недостатками измерительных генераторов являются сложность механического устройства, а также сравнительно невысокая точность измерений (1—2%). Применение компенсационной схемы позволяет повысить точность до 0,1—0,2%, однако это приводит к значительному усложнению подобных устройств [Л. 9].

При измерении переменных во времени полей измерительная катушка является неподвижной. Среднее значение э. д. с.  $E_{\text{ср}}$ , индуктированной в ней вследствие изменения потока, определяется по формуле

$$E_{\text{ср}} = 4\mu_0 f (Sw)_H H_{\text{max}} \quad (85)$$

или

$$E_{\text{ср}} = 4 f (Sw)_B B_{\text{max}}, \quad (86)$$

где  $H_{\text{max}}$  и  $B_{\text{max}}$  — максимальные значения соответственно напряженности магнитного поля и магнитной индукции;

$(Sw)_H$  и  $(Sw)_B$  — постоянные измерительных катушек.

В качестве вольтметров, измеряющих средние значения э. д. с., применяют, в основном, магнитоэлектрические вольтметры в сочетании с фазочувствительными выпрямителями: механическими (вибрационными), полупроводниковыми или ламповыми. Устройства для получения магнитных характеристик с механическими выпрямителями называют обычно феррометрами. Они находят широкое применение для испытания магнитных материалов на промышленной частоте (см. § 30).

Устройства с ламповыми или полупроводниковыми выпрямителями имеют более широкий частотный диапазон, определя-

емый, главным образом свойствами вольтметров средних значений.

Погрешности измерений  $B$  и  $H$  индукционным методом в переменных полях составляют 2—5%.

**Метод, основанный на эффекте Холла.** Метод позволяет непосредственно измерять напряженность как постоянного, так и переменного магнитных полей.

Гальваномагнитный эффект Холла состоит в следующем. Если полупроводник\*, по которому протекает ток  $I$ , поместить в магнитное поле напряженностью  $H$ , направленное перпендикулярно плоскости полупроводника, то в поперечном к току направлении возникнет разность потенциалов

$$E = R \frac{HI}{d} \varphi \left( \frac{l}{b} \right), \quad (87)$$

где  $R$  — постоянная Холла, характеризующая свойства полупроводникового материала;

$d$  — толщина датчика (пластинки из полупроводника);

$\varphi(l/b)$  — коэффициент, зависящий от отношения длины датчика  $l$  к его ширине  $b$ .

Из формулы (87) следует, что, если через датчик Холла пропустить ток  $I = \text{const}$ , то по измеренной величине  $E$  можно судить о величине напряженности поля

$$H = kE, \quad (88)$$

где  $k$  — постоянная величина для данного устройства.

Такой прибор может быть использован для измерения как постоянных, так и переменных магнитных полей (время образования зарядов имеет порядок  $10^{-12}$  сек). Он имеет практически равномерную шкалу, не содержит контактов или других сложных механических узлов, позволяет осуществлять дистанционные непрерывные измерения и автоматизировать их.

В настоящее время имеется довольно много полупроводниковых материалов, из которых изготавливаются датчики э. д. с. Холла. Датчики могут быть двух типов: кристаллические или пленочные. Кристаллические датчики изготавливаются из германия, сурьмянистого индия и некоторых других материалов, а пленочные — из селенида ртути и сурьмянистого индия.

Некоторые данные датчиков Холла, выпускаемых в настоящее время промышленностью, приведены в табл. 33. Из анализа данных таблицы видно, что чувствительность пленочных датчиков меньше, чем кристаллических, но зато они могут быть изготовлены очень малой толщины (что особенно важно, например, при измерении полей в узких зазорах) и имеют лучшую

\* Эффект Холла наблюдается также и для проводников, но для них он весьма мал.

Некоторые данные датчиков Холла, на которые разработана технология промышленного изготовления

Основные параметры	Материал		
	Германий, кристаллический	Сурьмянистый индий, кристаллический	Селенид ртути, пленочный
Входное и выходное сопротивление, <i>ом</i>	50—600	0,1—1,0	5—50
Чувствительность, <i>мкв/э</i> (при мощности рассеивания 0,1 <i>вт/см<sup>2</sup></i> )	50—60	50—60	10—20
Габариты, <i>мм</i>	8×5×0,3 6×4×0,3	8×5×0,3 6×4×0,3	10×5×1,0
Температурный коэффициент сопротивления на 1°С в интервале ±60°С	0,2—0,5	0,5—1,5	0,05—0,1

температурную стабильность. Кроме того, пленочные датчики механически прочны и их изготавливают из дешевых материалов.

В настоящее время интенсивно ведутся работы по исследованию возможностей применения датчиков Холла для различных случаев магнитных измерений (см., например, [Л. 40]).

В СССР на основе эффекта Холла выпускается, например, прибор типа ИМИ-3, который характеризуется следующими данными. Диапазон измеряемых индукций 100—16 000 *гс*; основная погрешность 1,5—2%; датчик выполнен из германия и имеет размеры 2,7 × 2,7 *мм*; прибор имеет два сменных зонда, габариты рабочей части которых 433 × 320 × 290 *мм* и  $\varnothing 10 \times 500$  *мм*; питание осуществляется от сети переменного тока.

**Метод ядерного магнитного резонанса (я. м. р.).** Метод основывается на использовании внутриатомных явлений.

Ядро атома, обладающее собственным магнитным моментом  $M$  и механическим моментом  $J$ , согласно квантовой механики, может принимать в магнитном поле  $H$  лишь определенные ориентации, число которых равно  $(2J + 1)$ . В ядре атома водорода (протоне)  $J = \frac{1}{2}$  и число ориентаций равно двум. Одна из них соответствует параллельному, а вторая — антипараллельному расположению поля и магнитного момента.

Каждая ориентация обладает вполне определенной энергией. С одной стороны, разность энергий  $\Delta E$ , соответствующая двум состояниям ядра атома водорода, равна  $2M_p H$  ( $M_p$  — магнитный момент протона). С другой стороны, энергия, необходимая

для переориентации момента ядра из параллельной в антипараллельную, равна энергии поглощенного кванта  $h\nu$ , т. е.

$$\Delta E = 2M_p H = h\nu, \quad (89)$$

где  $h$  — постоянная Планка;

$\nu$  — частота.

Отсюда

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{4\pi}{h} M_p H = \gamma_p H, \quad (90)$$

где  $\gamma_p = \frac{4\pi}{h} M_p$  — гиромагнитное отношение протона;

$\omega$  — резонансная круговая частота.

Гиромагнитные отношения для ядер различных элементов определяются опытным путем и известны в настоящее время с большой точностью. Так, для ядра водорода  $\gamma_p = 26\,751,3 \text{ э}^{-1} \times \times \text{сек}^{-1}$  или  $\gamma_p = 336,166 \text{ а}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{м}$ , а для ядра лития  $\gamma = 10\,396,1 \text{ э}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1}$  или  $\gamma = 130,641 \text{ а}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{м}$ .

Из формулы (90) следует, что между резонансной круговой частотой  $\omega$  и полем  $H$ , которое действует на ядро, существует линейная зависимость.

Для измерения  $H$  по методу я. м. р. ядродержащий образец в виде ампулы, заполненной соответствующим веществом (при использовании протонного резонанса дистиллированной водой), помещается в измеряемое поле  $H$ .

Образец охватывается обмоткой, питаемой от высокочастотного генератора, частота  $f$  которого известна и может плавно изменяться.

При значении  $f$ , соответствующей уравнению (90), происходит поглощение энергии, необходимое для перехода с одного энергетического уровня на другой. Этот момент может быть зафиксирован с помощью обычных радиотехнических средств (например, электронным осциллографом). Измеряемую величину  $H$  при этом можно определить из уравнения (90).

Точность измерений определяется точностью фиксирования момента резонанса и измерения резонансной частоты. Для полей  $10^2$ — $10^4$  э значение частоты лежит в диапазоне  $10^6$ — $10^8$  гц. Такие частоты обычными приборами (волномерами) могут быть измерены с погрешностью до 0,01%, а специальными методами — до 0,0001%.

Для фиксирования момента резонанса могут применяться различные схемы и приборы. Весьма часто для этой цели применяют способ модуляции высокочастотного поля слабым переменным полем низкой частоты (50 гц). Для этого на образец, кроме катушки высокочастотного контура, накладывается еще модулирующая катушка. Образец и обе катушки заключаются в тонкостенный медный стакан и вместе с высокочастотным кабелем представляют собой зонд к прибору.

В результате модуляции на выходе детектора появляется сигнал низкой частоты, который после усиления подается на вертикальные пластины осциллографа. При синусоидальной горизонтальной развертке, синхронной с модулирующим напряжением, на экране осциллографа можно наблюдать резонансную линию. Нужный сдвиг по фазе между напряжением на горизонтальных пластинах и напряжением модулирующего поля устанавливается фазовращателем.

Так как за период модуляции резонансные условия выполняются дважды, то на экране осциллографа одновременно наблюдается два импульса, в общем случае смещенные один относительно другого, что объясняется, в основном, неоднородностью магнитного поля в пределах объема образца.

Точной настройке в резонанс соответствует симметричное расположение сигналов относительно центра развертки.

Методу я. м. р. присуща высокая точность измерения, в десятки раз превышающая точность почти всех других методов магнитных измерений. Измерители напряженности магнитного поля, основанные на явлении я. м. р., обладают погрешностью от 0,02 до 0,005%.

Следует также отметить, что метод основан на использовании универсальной постоянной (гиромангнитного отношения), поэтому результат измерения практически не зависит от внешних причин. Это придает методу исключительную метрологическую ценность.

Диапазон измеряемых полей измерителей напряженности магнитного поля, выполненных на эффекте я. м. р., составляет  $4 \cdot 10^3$ — $2 \cdot 10^6$  а/м (50—25 000 э).

Отечественной промышленностью выпускаются приборы типа ИМИ-2 с пределами измерений  $2 \cdot 10^4$ — $2 \cdot 10^6$  а/м (250—25 000 э) с погрешностью, не превышающей 0,01%, при условии, что в объеме образца неоднородность не выше 0,02%.

Метод я. м. р. может быть использован так же, как метод «свободной ядерной индукции» для измерения очень слабых полей. Однако такие устройства ввиду своей сложности имеют пока ограниченное применение [Л. 9].

**Мостовой метод.** Метод применяется для определения магнитных характеристик магнитномягких материалов на переменном токе в широком диапазоне частот: от 50 гц до 200 Мгц в слабых полях\*.

Метод основан на том, что по измеренным с помощью моста переменного тока индуктивности  $L_x$  и сопротивлению потерь  $r_{\Gamma}$

---

\* При низких частотах возможны измерения и в сравнительно больших полях.

обмотки с исследуемым магнитным образцом, можно определить свойства материала по формулам (в системе СИ):

$$\mu_1 = \frac{\pi L_x d_{\text{ср}}}{S \omega^2}, \quad (91)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\mu_2}{\mu_1} = \frac{r_{\text{п}}}{\omega L}, \quad (92)$$

$$r_{\text{п}} = r_x - r, \quad (93)$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_2$  — соответственно упругая и вязкая проницаемости потерь (см. § 4);

$L_x$  (гн) и  $r_x$  (ом) — измеренные на мосте индуктивность и активное сопротивление катушки с магнитным сердечником;

$\operatorname{tg} \delta$  — тангенс угла потерь;

$d_{\text{ср}}$  — средний диаметр образца, м;

$S$  — площадь его поперечного сечения, м<sup>2</sup>;

$\omega$  — число витков обмотки;

$r$  — активное сопротивление обмотки, ом;

$r_{\text{п}}$  — сопротивление потерь, ом;

$\omega$  — круговая частота.

Сила тока в намагничивающей обмотке для подсчета напряженности поля может быть определена, например, следующим образом. Измеряют ток в неразветвленной части моста (термоэлектрическим или другим амперметром, показания которого не зависят от частоты) и по известным значениям сопротивлений плеч уравновешенного моста подсчитывают ток в цепи катушки с образцом. В плечо, содержащее  $L_x$  и  $r_x$ , амперметр непосредственно не включают, так как собственное сопротивление прибора не является постоянным и точно неизвестно.

Максимальные значения магнитной индукции  $B_{\text{max}}$  и напряженности магнитного поля  $H_{\text{max}}$  могут быть подсчитаны по формулам:

$$H_{\text{max}} = \frac{\omega I \sqrt{2}}{\pi d_{\text{ср}}} [a/m] \quad (94)$$

и

$$B_{\text{max}} = \frac{L_x I \sqrt{2}}{S \omega} [m.l], \quad (95)$$

где  $I$  — действующее значение тока в цепи обмотки с магнитным сердечником.

Примером мостовой установки, предназначенной для измерения магнитных свойств материалов, может служить установка типа У520. Она представляет собой мост переменного тока, предназначенный для магнитных измерений при частотах 500, 1000, 2400 и 4800 гц. Установка позволяет производить измерения в двух режимах (синусоидальной магнитной индукции или сину-

соидальной напряженности поля). Диапазон измерений по индуктивности 0,001—1,0 *гн* (при частотах 500 и 1000 *гц*) и по сопротивлению (в пределах, соответствующих тангенсу угла потерь в образце) от 0,04 до 0,6. В режиме синусоидальной напряженности поля измерения могут производиться в полях от 0,8 до 80 *а/м* (от 0,01 до 1 *э*). Максимальные значения магнитной индукции в образце (при измерениях в режиме синусоидальной индукции) соответствуют 60—80% индукции насыщения.

Погрешности измерения  $L_x$  и  $r_x$  мостовыми методами зависят от схемы, частотного диапазона, номинального значения измеряемого сопротивления и составляют в среднем 1—3% для измерения индуктивности и 5% и выше для измерения сопротивления потерь.

Особенно широко мостовые методы применяют при определении магнитных характеристик на высоких частотах, для таких материалов, как ферриты, магнитодиэлектрики и пермаллои микронного проката.

**Осциллографический метод.** Этот метод можно рассматривать как разновидность индукционного. Идея осциллографического метода состоит в следующем. На магнитный образец накладывают намагничивающую обмотку  $\omega_n$  и обмотку для измерения индукции  $\omega_b$ . На горизонтальные пластины электронного осциллографа (с электростатическим управлением) подают напряжение, пропорциональное намагничивающему току, например с сопротивления, включенного в цепь последовательно. При этом мгновенное значение напряжения на горизонтальных пластинах пропорционально мгновенному значению намагничивающего поля.

На вертикальные пластины подают напряжение с емкости  $C$ , включенной последовательно с обмоткой  $\omega_b$  и активным сопротивлением  $r$ .

В этом случае напряжение на вертикальных пластинах будет

$$U = -\frac{1}{C} \int i dt = \frac{1}{C} \int \frac{\omega_b S dB}{r} dt = \frac{1}{C} \frac{\omega_b S}{r} B, \quad (96)$$

т. е. его мгновенное значение пропорционально мгновенному значению индукции в образце.

В результате сложения отклонений по горизонтали и вертикали электронный луч будет описывать кривую, изображающую в некоторых масштабах (они могут быть подсчитаны) динамическую петлю гистерезиса.

Осциллографический метод обладает исключительной наглядностью и может быть использован в широком частотном диапазоне. Однако большим недостатком метода является его малая точность. Погрешности измерений  $B$  и  $H$  этим методом оцениваются величиной порядка 7—10%. Точность может быть повышена путем применения специальных электронных схем с

повышенной стабильностью и малыми частотными искажениями.

Перейдем к характеристике основных методов определения потерь.

**Ваттметровый метод** основан на измерении ваттметром полной мощности, затрачиваемой в цепи катушки с магнитным образцом. Потери в образце подсчитываются как разность между показаниями ваттметра и потерями в измерительных приборах и намагничивающей обмотке.

В качестве намагничивающего устройства в этом методе наиболее широкое применение получил прибор Эпштейна, представляющий собой квадратную раму из четырех пустотельных катушек с обмотками. Внутри катушек помещают пакеты, набранные из полос испытуемого материала. Листы пакетов замыкаются между собой «в стык» или «в стык-нахлестку», образуя замкнутую магнитную цепь.

Ваттметровый метод в СССР и в других странах стандартизован для испытания электротехнических сталей (см. § 30).

Потери измеряют при определенных частоте и индукции. Частоту измеряют частотомером, о значении индукции судят косвенно, по показаниям вольтметра, измеряющего напряжение  $U$  питания обмотки аппарата Эпштейна. Если обмотка имеет малое сопротивление, то можно считать, что

$$U \approx E = 4K_{\phi} f \omega S B_{\max}, \quad (97)$$

где  $E$  — электродвижущая сила, уравнивающая приложенное напряжение;

$K_{\phi}$  — коэффициент формы кривой;

$f$  — частота;

$\omega$  — число витков обмотки;

$S$  — сечение образца,  $m^2$ ;

$B_{\max}$  — максимальная индукция, тл.

Задаваясь величиной индукции, можно по формуле (97) подсчитать то напряжение, которое необходимо подвести к обмотке, чтобы обеспечить выбранные условия испытания.

Ваттметровый метод позволяет измерять потери только на низких частотах, не выше нижней части звукового диапазона (до нескольких тысяч герц), что объясняется, в основном, трудностью создания точных высокочастотных ваттметров.

**Калориметрический метод измерения потерь** основан на измерении тепла, выделяемого перемагничиваемым образцом. Основное достоинство метода, по сравнению с ваттметровым, состоит в возможности измерений в сложных режимах намагничивания и в широком частотном диапазоне (до нескольких мегагерц).

Тепло, выделяемое образцом, может быть измерено непосредственно или дифференциальным методом.

Непосредственный метод основан на измерении температуры жидкости, заполняющей калориметр с образцом. Для этой цели применяют термометры с пределами измерения порядка 18—20°С с ценой деления в 0,01°С.

Пределы измеряемых таким методом мощностей составляют от нескольких единиц до нескольких десятков ватт. Относительная погрешность измерения потерь в образце равна приблизительно 1%.

Дифференциальный метод обладает большей чувствительностью, чем непосредственный. Идея дифференциального калориметрического метода заключается в следующем. Установка состоит из двух идентичных калориметров, в один из которых помещают испытуемый магнитный образец, а в другой—заменитель образца из диэлектрика с малыми потерями. На образце имеется намагничивающая обмотка, а на заместителе образца — обмотка, по которой пропускают плавно регулируемый постоянный ток известной величины. В каждый из сосудов помещают батарею терморпар, которые включают навстречу друг другу. Наличие или отсутствие тока в этой цепи контролируется гальванометром. В случае отсутствия тока потери в образце можно вычислить по формуле

$$P = I^2 r, \quad (98)$$

где  $P$  — мощность постоянного электрического тока, выделяемая в калориметрическом сосуде с заместителем образца.

Дифференциальный метод позволяет снизить предел измерения потерь до единицы милливольт при измерениях с погрешностью порядка 2% в широком диапазоне частот.

Для измерения индукции в калориметрическом методе на кольцеобразный образец кроме намагничивающей помещают измерительную обмотку, подключаемую к вольтметру (обычно электронному). Погрешность измерения индукции зависит, в основном, от точности вольтметра и составляет приблизительно 7—10%, а при использовании компенсационных вольтметров погрешность может быть снижена до 2—3% [Л. 9].

Таковы основные методы измерения напряженности магнитного поля, магнитной индукции и потерь. Сделаем некоторые замечания относительно формы образцов для испытания и возможности подсчета напряженности поля.

Для кольцеобразных образцов напряженность поля подсчитывается по формуле (5), что более точно и просто, чем непосредственное измерение  $H$ . Достоинство кольцевых образцов состоит также в том, что они намагничиваются однородно. Однако кольцевые образцы не всегда возможно изготовить, на них трудно накладывать обмотки, а также они не позволяют создавать сильные намагничивающие поля (больше 200—250 э).

Для образцов разомкнутой формы напряженность намагничивающего поля можно подсчитать по формуле (33). Однако при этом необходимо знать внешнее поле  $H_e$ , создаваемое, например, соленоидом, и размагничивающее поле  $H_o$ , которое из-за сложности определения коэффициента размагничивания, подсчитать трудно\*. Поэтому для образцов разомкнутой формы в большинстве случаев предпочитают напряженность поля не подсчитывать, а измерять.

Во многих случаях испытания магнитных материалов проводят в пермеаметрах — устройствах, дополняющих магнитную цепь разомкнутого образца до замкнутой. Основное требование, предъявляемое к пермеаметру, заключается в возможно малом магнитном сопротивлении, которым можно было бы пренебречь в расчетах, считая, что вся м. д. с. затрачивается на намагничивание образца. Пермеаметр также улучшает однородность намагничивания образца.

Конструкций пермеаметров известно много, некоторые из них будут описаны ниже.

### § 30. ИЗМЕРЕНИЯ СВОЙСТВ НИЗКОЧАСТОТНЫХ МАГНИТНОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ

Выше было указано, что к низкочастотным магнитномягким материалам относятся технически чистое железо (низкоуглеродистая электротехническая сталь), электротехнические стали и пермаллой (пермаллой микронного проката относятся к высокочастотным материалам).

Магнитные параметры, подлежащие измерениям при приемно-сдаточных испытаниях, указаны в соответствующих стандартах на материалы (см. табл. 4, 5, 6, 7 и 10). Для получения кривых намагничивания стандарты рекомендуют применять баллистический, а для измерения потерь — ваттметровый методы.

**Испытания технически чистого железа** предусматривают проверку в качестве основного магнитного параметра, отклонение от которого служит причиной брака, коэрцитивной силы. Проверка хода кривой намагничивания и максимальной магнитной проницаемости, хотя и предусмотрена ГОСТ 3836—47, но ухудшение этих свойств не может служить причиной забракования материала.

Коэрцитивная сила измеряется баллистическим методом в открытой цепи на образцах длиной 400 мм и шириной 20 мм, вырезанных из листа поперек направления прокатки и подвергнутых термической обработке (повторному отжигу) при максимальной напряженности поля 200 э.

---

\* Для образцов с отношением длины к диаметру больше 500—100 поправка на коэффициент размагничивания составляет десятые доли процента и ею в большинстве случаев можно пренебречь.

При измерении магнитной индукции образец складывается из отдельных полос, число которых выбирают так, чтобы площадь поперечного сечения образца была не менее  $0,5 \text{ см}^2$ . Образцы после вырезки отжигаются.

Допускается также применять кольцевые образцы с наружным диаметром  $120 \text{ мм}$ , внутренним диаметром  $90 \text{ мм}$  и площадью поперечного сечения не менее  $0,5 \text{ см}^2$ .

Магнитную индукцию рекомендуется измерять в пермеетрах.

Максимальную магнитную проницаемость находят на участке кривой намагничивания от  $0,5$  до  $3 \text{ э}$ . Определяя координаты  $B_{\rho_{\text{max}}}$  и  $H_{\rho_{\text{max}}}$  точки перегиба кривой  $B = f(H)$  на этом участке, подсчитывают

$$\rho_{\text{max}} = B_{\rho_{\text{max}}} / H_{\rho_{\text{max}}}.$$

**Испытания электротехнических сталей** по магнитным параметрам в соответствии с ГОСТ 802—58 и ГОСТ 9925—61 можно полностью осуществить на установке типа У578.

Установка снабжена кнопочным управлением и позволяет определять следующие величины:

1) магнитную индукцию на основной кривой намагничивания при напряженностях магнитного поля  $H$ , равных  $0,002$ ;  $0,004$ ;  $0,008$ ;  $0,03$ ;  $0,05$ ;  $0,1$ ;  $0,2$ ;  $0,5$ ;  $0,7$ ;  $1$ ;  $2$ ;  $5$ ;  $10$ ;  $25$ ;  $50$ ;  $100$  и  $300 \text{ а/см}$ ;

2) полные удельные потери при перемагничивании стали с частотой  $50 \text{ гц}$  и максимальных значениях индукции  $B$ , равных  $10$ ;  $15$  и  $17 \text{ кгс}$ , отнесенных к синусоидальному изменению индукции;

3) полные удельные потери при перемагничивании стали с частотой  $400 \text{ гц}$  и максимальных значениях индукции, равных  $7,5$  и  $10 \text{ кгс}$ , отнесенных к синусоидальному изменению индукции.

В § 10 было произведено деление электротехнических сталей на три группы (в соответствии с ГОСТ 802—58 и ГОСТ 9925—61). Рассмотрим особенности испытаний каждой из этих групп.

Для сталей, применяемых в энергетическом электромашиностроении, измеряют  $B$  при  $H$ , равном  $10$ ;  $25$ ;  $50$ ;  $100$  и  $300 \text{ а/см}$  и потери  $P$  на частоте  $50 \text{ гц}$  при максимальных значениях индукции  $B$ , равных  $10$ ,  $15$  и  $17 \text{ кгс}$  (см. табл. 5).

При гарантии заводом-изготовителем значения  $B_{10}$  испытания этой характеристики может не производиться. Для сильных полей ( $H = 25$ ;  $50$ ;  $100$  и  $300 \text{ а/см}$ ) испытания производятся для двух значений, указанных потребителем, а при отсутствии указания — при  $B_{25}$  и  $B_{50}$ .

Потери  $P$  испытывают для горячекатаных сталей при одном значении  $B$ , указанном потребителем, а если его нет, то при  $B = 10\,000 \text{ гс}$  или  $B = 15\,000 \text{ гс}$ ; для холоднокатаных текстуро-

ванных сталей — для двух значений  $B$  (10 000, 15 000 или 17 000 гс) по указанию потребителя или при  $B = 15 000$  гс.

Образцы для испытаний изготавливают следующим образом. Из партии листов или рулонов одной марки, одного размера и одного отжига, предъявленных к приемке, отбирают равномерно по высоте стопы контрольные листы (при поставке холоднокатаной стали в рулонах контрольные полосы отбираются от наружных и внутренних витков). Количество контрольных листов зависит от сорта стали и составляет не менее четырех листов от партии.

Из контрольных листов нарезают далее прямоугольные полосы длиной 500 или 250 мм и шириной 30 мм. Половину полос из горячекатаных и малотекстурованных сталей нарезают вдоль, а вторую половину — поперек прокатки. Дальнейшей обработке (отжигу) полосы не подвергаются. Полосы из текстурованных сталей нарезают только вдоль прокатки на расстоянии не менее 5 мм от кромки и подвергают отжигу для снятия наклепа. В дальнейшем из этих полос собирают пакеты для испытаний.

Измерение индукции в слабых полях при  $H = 10$  а/см производится на установке У578 баллистическим методом в пермеамetre, входящем в комплект установки. Образец для испытаний представляет собой пакет массой в 1,25 кг, собранный из полос.

Все остальные магнитные параметры, нормированные для этой группы сталей, определяют дифференциальным баллистическим и дифференциальным ваттметровыми методами в аппарате Эпштейна—Лонкицена.

Принципиальная схема дифференциального баллистического метода приведена на рис. 88. На рисунке *I* и *II* представляют собой соответственно «нормальный» и испытуемый образцы из однотипного материала. Магнитные свойства нормального образца заранее известны (их можно определить, например, абсолютным баллистическим методом).

Каждый из образцов в соответствии с ГОСТ 802—58 и ГОСТ 9925—61 представляет собой квадратный замкнутый магнитопровод массой в 10 кг, составленный «в стык» из четырех пакетов по 2,5 кг. Полосы стали в испытуемых пакетах изолируются одна от другой бумажными прокладками толщиной 0,03—

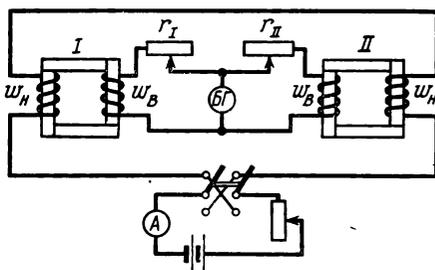


Рис. 88. Принципиальная схема для получения кривых намагничивания дифференциальным баллистическим методом

0,05 мм (допускается проводить испытания без бумажной изоляции, но при слабой перевязке пакетов).

Каждый из пакетов помещается внутрь пустотелой катушки с двумя обмотками: намагничивающей  $w_H$  и измерительной  $w_B$ . В цепь измерительных обмоток включен баллистический гальванометр  $БГ$ . Сами обмотки  $w_B$  включены так, чтобы индуцируемые в них при замыкании или размыкании цепи намагничивающего тока э. д. с. вызывали отклонение подвижной части  $БГ$  в противоположные стороны;  $r_I$  и  $r_{II}$  представляют собой магазины сопротивлений. При измерениях на магазине  $r_I$  устанавливают сопротивление, численно равное магнитной индукции нормального образца (или равное  $10^n \cdot B_I$ ) при данной напряженности поля. Далее подбирают на магазине  $r_{II}$  такое сопротивление, для которого отброс  $БГ$  при коммутировании намагничивающего тока равен нулю.

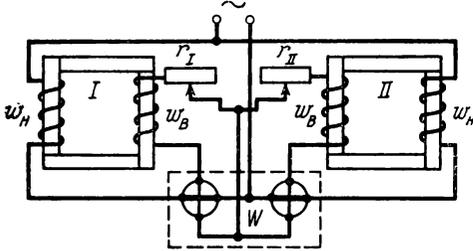


Рис. 89. Принципиальная схема для измерения потерь дифференциальным ваттметровым методом

В этом случае из условия равенства количеств электричества в обеих частях схемы можно написать, что

$$\frac{w_B \Delta \Phi_I}{r_I + r_{w_B}} = \frac{w_B \Delta \Phi_{II}}{r_{II} + r_{w_B}}, \quad (99)$$

где  $\Phi_I$  и  $\Phi_{II}$  — изменение потоков в каждом ярме;  
 $r_{w_B}$  — сопротивление обмотки  $w_B$ .

Считая, что  $r_{w_B}$  значительно меньше  $r_I$  и  $r_{II}$ , а также, что площади сечения обоих образцов одинаковы, имеем

$$\frac{B_I}{r_I} = \frac{B_{II}}{r_{II}}. \quad (100)$$

Так как по условию проведения испытаний  $r_I$  было выбрано численно равным  $B_I$ , то полученное значение  $r_{II}$  численно представляет собой  $B_{II}$ , измеренное в тех же единицах, что и  $B_I$ .

Принципиальная схема измерения потерь дифференциальным методом представлена на рис. 89. Она отличается от рис. 88 только тем, что в данном случае в качестве измерительного прибора включен не баллистический гальванометр, а дифференциальный ваттметр  $W$ . Этот прибор представляет собой как бы два ваттметра, подвижные катушки которых жестко укреплены на общей оси и поворачивают ее в разные стороны.

При равенстве мощностей, подводимых к каждой из частей такого ваттметра, подвижная часть будет неподвижна.

При выполнении некоторых дополнительных условий и при отсутствии отклонения подвижной части ваттметра сопротивление  $r_{\Pi}$  пропорционально измеряемым потерям  $P$  в испытуемом образце (см., например, [Л. 41]).

Достоинство дифференциального метода по сравнению с абсолютным состоит в исключительной простоте осуществления процесса измерения.

В комплект установки типа У578 входят аппарат Эпштейна—Лонкицена и регулировочные устройства постоянного и переменного тока для его питания.

Для сталей, применяемых в средних полях повышенной частоты (400 гц), измеряют  $B$  при  $H$ , равном 0,4; 0,8; 2; 4; 5; 10 и 25 а/см, а также полные потери на частоте 400 гц при индукциях  $B$ , равных 7,5; 10 и 15 кгс (см. табл. 6).

Образец для испытаний сталей марок Э340 и Э44 этой группы (ГОСТ 802—58) представляет собой квадратный замкнутый магнитопровод в 1 кг, составленный из четырех пакетов по 250 г. После нарезки полосы из текстурованных сталей отжигают.

Для измерения потерь пакеты соединяются между собой «в стык», а для получения кривой намагничивания «в нахлестку» с обеих концов полосы. Поэтому образцы для измерения полных потерь и определения кривой намагничивания имеют разные габариты, что требует применения для их испытаний различных по величине намагничивающих устройств.

В установке типа У578 кривую намагничивания для этих образцов получают баллистическим методом в намагничивающем устройстве по типу аппарата Эпштейна; удельные потери — абсолютным ваттметровым методом в аппарате Эпштейна для образцов, имеющих массу, равную 1 кг («малый аппарат Эпштейна»).

Для сталей марок Э340, Э350, Э360 этой группы, выпускаемых в рулонах (ГОСТ 9925—61), при определении основной кривой намагничивания от каждой партии отбирают два образца кольцевой формы. Размеры образца выбирают так, чтобы удовлетворялось следующее условие: отношение среднего диаметра к радиальной ширине не менее восьми, а форма поперечного сечения близка к квадратной. Масса образца составляет приблизительно 100 г, а площадь поперечного сечения около 1,0 см<sup>2</sup>. Образцы подвергают отжигу в атмосфере аммиака, водорода или в вакууме ( $10^{-2}$  —  $10^{-3}$  мм рт. ст.). Измерения производят баллистическим методом.

Для сталей, применяемых в малых или в средних полях, измеряют только магнитную индукцию при заданных значениях напряженности поля (см. табл. 7).

Измерения производят на полосовых образцах ( $250 \times 30$  мм) в намагничивающем устройстве по типу аппарата Эпштейна баллистическим методом.

Кроме установки типа У578, предназначенной для определения магнитных свойств электротехнической стали по ГОСТ 802—58 и ГОСТ 9925—61, подобные измерения можно проводить и в других устройствах.

Стандарт разрешает, кроме баллистического и ваттметрового методов, пользоваться и другими методами, однако указанные два метода являются арбитражными при контрольных испытаниях.

Прогрессивным методом, допускаемым стандартом для приемно-сдаточных испытаний, является измерение свойств сталей в целых листах, без изготовления образцов.

В разработке этого метода большая заслуга принадлежит сотрудникам Института физики металлов Уральского филиала АН СССР и Верх-Исетского металлургического завода Р. И. Янусу, А. Д. Соколову, В. В. Дружинину и др.

Испытания в целых листах позволяют исключить расход материала на образцы (около 0,4% от всего количества изготавливаемых сталей), значительно упрощают процесс производства измерений, делают принципиально возможным решение задачи организации контроля в потоке и его автоматизацию.

Измерение потерь производится, как и в предыдущих случаях, на основе ваттметрового метода. Принципиально новой является конструкция намагничивающего устройства. Аппарат представляет собой два плоских соленоида, каждый из которых рассчитан на помещение двух листов стали размерами  $1200 \times 750$  мм. Соленоиды короче листов на 40 мм. На торцах соленоидов имеются ярма, которые замыкают выступающие из верхнего и нижнего соленоидов листы, образуя замкнутую магнитную цепь. Одно ярмо жестко связано с соленоидами, а второе (подвижное) на время заправки листов в соленоиды опускается ниже их уровня.

Точность определения потерь в таком устройстве приблизительно такая же, как и в аппарате Эпштейна—Лонкицена\*.

На аппарате для определения удельных потерь в целых листах можно также снимать основную кривую намагничивания на переменном токе. Амплитудные значения напряженности поля определяются по намагничивающим ампервиткам, причем амплитуда тока определяется по э. д. с., индуцируемой во вторичной обмотке катушки взаимной индуктивности. Амплитуда ин-

---

\* Дружинин В. В. [и др.]. Аппарат для измерения удельных потерь и магнитной индукции электротехнической стали на целых листах. «Вестник электропромышленности», 1958, № 7.

дукции определяется измерением среднего значения э. д. с., индуцируемой в измерительной обмотке на образце.

Имеются и другие аппараты для измерения магнитных свойств в целых листах.

Баллистический метод определения основной кривой намагничивания, хотя и предусмотрен в стандартах на электротехнические стали как главный, при приемно-сдаточных испытаниях во многих случаях не может удовлетворить потребителя. Это объясняется тем, что, как это было показано в § 10, магнитные свойства в постоянных, и в переменных полях существенно различны (см. например, рис. 25).

Свойства электротехнических сталей в переменных полях низкой частоты (50 гц) можно измерить с помощью феррометра.

Примером такого устройства может служить установка типа У542, позволяющая определять максимальные значения напряженности поля и магнитной индукции, максимальные значения первых гармоник напряженности поля и магнитной индукции, магнитную проницаемость и потери. Пределы измерения напряженности поля — 0,01—100 а/см; пределы измерения магнитной индукции 50—17 000 гс. Погрешность определения  $B$  и  $H$  не более 5%. Феррометр позволяет также наблюдать кривую гистерезисного цикла на экране электронного осциллографа и по данным петли определять магнитные величины.

Вопросы измерения свойств электротехнических сталей в переменных полях подробно рассмотрены, например, в [Л. 4; 9 и др.].

**Измерение магнитных свойств пермаллоев** в соответствии с ГОСТ 10160—62 производится баллистическим методом на одном образце от каждой толщины данной плавки.

Образцы для испытания изготавливаются только из холоднокатаных материалов (до окончательной термической обработки). Для испытаний лент толщиной менее 0,15 мм образцы изготавливаются в виде навиваемых из лент колец, толщиной 10—12 мм с отношением среднего диаметра к радиальной толщине 5—10, масса образцов должна быть не менее 12 г; для толщины 0,15—1 мм образец собирается из штампованных колец; для толщины свыше 1 мм образец вытачивается.

Далее образцы проходят термическую обработку\*, укладываются в защитные каркасы, поверх которых накладываются измерительная и намагничивающая обмотки, и поступают на измерения.

Начальная проницаемость должна определяться методом экстраполяции, причем минимальное магнитное поле при измерении должно быть: для сплавов с 34—65% никеля не более

\* Режим термической обработки указан в приложении к ГОСТ 10160—62.

0,4 а/м (5 мэ); для сплавов с 70—85% никеля не более 0,08 а/м (1 мэ).

За индукцию насыщения (техническое насыщение) принимается индукция, измеренная: для сплавов с 34—65% никеля в полях 4000—4800 а/м (50—60 э) и для сплавов с 70—85% никеля в полях 640—800 а/м (8—10 э).

### § 31. ИЗМЕРЕНИЯ СВОЙСТВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ МАГНИТНОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ

К высокочастотным магнитномягким материалам относятся ферриты, магнитоэлектрики и пермаллои микронного проката.

Основными измеряемыми параметрами для этих материалов являются начальная магнитная проницаемость  $\mu_a$ , тангенс угла потерь  $\operatorname{tg}\delta$ , коэффициенты потерь  $\delta_n$ ,  $\delta_f$ ,  $\delta_{\text{п}}$  и температурный коэффициент магнитной проницаемости  $TK_{\mu}$ . Определение этих параметров сводится к измерению индуктивности  $L$  и сопротивления потерь  $r$  обмотки с исследуемым образцом и последующим расчетам (см. формулы 91—93).

Для определения  $\mu_a$  и  $\operatorname{tg}\delta$  главным образом используются в диапазоне до 1 Мгц мостовые методы (Т-образные мосты — до 200 Мгц), в диапазоне 50—100 Мгц — резонансные методы и свыше 100 Мгц — коаксиальные линии, волноводы и резонаторы\*.

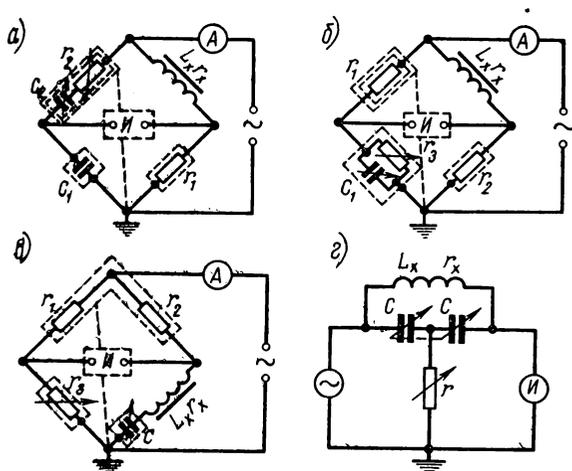


Рис. 90. Некоторые мостовые схемы, применяемые в магнитных измерениях

\* Измерения в коаксиальных линиях, волноводах и резонаторах кратко рассмотрены в § 34.

Выбор мостовых схем определяется частотой, требуемой точностью, свойствами испытуемого материала (величинами  $L$  и  $r$ ) и т. д. Некоторые из наиболее часто применяемых в магнитных измерениях мостовых схем приведены на рис. 90, а их характеристики — в табл. 34.

Таблица 34

## Характеристики некоторых мостовых схем для магнитных измерений [Л. 9]

Название схемы	Частотный диапазон применения	Уравнения равновесия		Погрешность измерений
		измеряемая индуктивность $L_x$	измеряемое сопротивление $r_x$	
Мост Овена (рис. 90, а)	50 гц—10 кгц	$C_1 r_1 r_2$	$r_1 \frac{C_1}{C_2}$	5%
Мост Максвелла—Вина (рис. 90, б)	100 гц—100 кгц	$\frac{C_1 r_1 r_2}{-r_x (c-d)^*}$	$\frac{r_1 r_2}{r_3 - \omega L (c-d)^*}$	50 гц—20 кгц 5% 20—100 кгц 10%
Резонансный мост (рис. 90, в)	20 кгц—1 Мгц	$\frac{1}{\omega^2 C L r_3^{**}}$	$r_3 \frac{\text{tg} \delta_c^{***}}{\omega C}$	$\frac{\Delta L}{L} : 1\%$ $\frac{\Delta r}{r} : 5\%$
Т-образный мост (рис. 90, г)	0,5—200 Мгц (ориентировочно)	$\frac{2}{\omega^2 C}$	$\frac{1}{r \omega^2 C^2}$	< 2%

\*  $c$  и  $d$  — углы плеч  $r_1$  и  $r_2$  при частоте измерения.

\*\*  $L r_3$  — эквивалентная индуктивность магазина сопротивлений при частоте испытаний.

\*\*\*  $\text{tg} \delta_c$  — тангенс угла потерь конденсаторов магазина емкостей.

При работе с мостовыми схемами, изображенными на рис. 90, а, б и в, требуется предварительное симметрирование схемы, сущность которого заключается в том, что вначале схема уравновешивается при закороченных зажимах для включения катушки с испытуемым сердечником. Кроме того, для этих схем необходимо обеспечить тщательное электростатическое экранирование (на рис. 90 электростатические экраны и их включение показаны пунктиром). В этом отношении имеют преимущество Т-образные схемы (рис. 90, г), в которых наличие общей точки генератора и индикатора облегчает экранирование и дает возможность не применять предварительного симметрирования схемы.

---

Верхний предел частотного диапазона применения мостовых схем ограничивается наличием остаточных реактивностей элементов плеч моста, а также емкостными и индуктивными связями между ними.

Примером высокочастотной мостовой установки, предназначенной для испытания магнитных материалов в диапазоне частот 20 кГц — 1 МГц, может служить установка типа УИММ-2, разработанная во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева\*.

Мостовая схема работает на принципе последовательного резонанса (рис. 90, в). Погрешность измерений в указанном диапазоне частот составляет для  $L$  — не выше 1%, для  $r$  — не выше 5%. Расчет значений магнитной проницаемости и тангенса угла потерь производится по формулам (91) — (93), а  $H_{\max}$  и  $B_{\max}$  — по формулам (94) и (95).

На частотах свыше 1 МГц наибольшее применение имеет резонансный метод, основанный на измерении добротности контура, состоящего из катушки с испытуемым сердечником и конденсатора переменной емкости. Измерив резонансную емкость  $C$  контура и его добротность  $Q$ , подсчитывают индуктивность и сопротивление катушки с сердечником по формулам:

$$L = \frac{1}{\omega^2 C}; \quad (101)$$

$$r = \frac{\omega L}{Q}. \quad (102)$$

Приборы, предназначенные для измерения  $Q$ , называют измерителями добротности (куметрами).

Основной частью куметра является колебательный контур, состоящий из обмотки с исследуемым сердечником и образцового конденсатора переменной емкости. Контур питается от высокочастотного генератора, создающего колебания известной частоты  $f(\omega)$ . Напряжение на контуре измеряется ламповым вольтметром. Момент резонанса (значение емкости  $C$ ) фиксируется при максимальном значении этого напряжения.

В качестве примеров свойств куметров, выпускаемых промышленностью, укажем технические характеристики приборов типа КВ-1 и УК-1.

Куметр типа КВ-1 имеет диапазон рабочих частот от 50 кГц до 50 МГц; пределы измерения добротности от 20 до 625; пределы измерения индуктивности от 0,1 мкГн до 0,1 Гн; погрешности измерения добротности при частотах 30 МГц — не более 5%, при частотах от 30 до 50 МГц — не более 10%; погрешность градуировки генератора по частоте 1%.

---

\* Чернышева Н. Г. Установка для испытаний образцов ферромагнитных материалов в диапазоне частот 20 кГц — 1 МГц. Труды ВНИИМ. Стандартгиз, 1960, вып. 43 (103).

Куметр типа УК-1 имеет диапазон рабочих частот от 30 до 200 Мгц; пределы измерения добротности от 80 до 1200; погрешность градуировки генератора по частоте 1%; погрешность измерения добротности до 100 Мгц — 10%.

Достоинство куметров по сравнению с мостовыми схемами, кроме возможности измерений при более высоких частотах, состоит также в большей простоте измерений, что позволяет применять куметры при массовых измерениях в условиях цеха.

Основным недостатком куметра является малая точность, особенно при определении  $\text{tg}\delta$ . Обычно погрешность таких измерений составляет более 10%. Специальными методами проведения измерений на куметре удается уменьшить эту погрешность\*, но тогда теряется одно из главных достоинств этого метода — простота. Куметры не позволяют также расширить измерения в области низких частот, что объясняется трудностями измерения очень малых индуктивностей и активных сопротивлений на этих частотах.

Недостатком куметра является еще и то, что он не позволяет измерять напряженность намагничивающего поля и фактически все измерения сводит к области слабых полей, причем величина напряженности поля разная для разных частот.

При измерениях мостовым или резонансным методами чаще всего используют кольцевые образцы, которые обеспечивают простоту подсчета напряженности намагничивающего поля (по формуле 5) и однородность намагничивания.

Кольцевой образец намагничивается с помощью равномерно навитой на образец многовитковой обмотки или одновитковой обмотки, проходящей через центр образца.

Многовитковая обмотка позволяет измерять малые индуктивности, но ее применение ограничивается относительно низкими частотами. Это объясняется тем, что наличие междувитковой емкости, емкости между витками и образцом, а также некоторые другие причины приводят к возникновению трудно учитываемых дополнительных погрешностей. Поэтому на повышенных частотах (3—100 Мгц) применяют одновитковое намагничивание, основанное на использовании проволочной прямоугольной рамки в качестве обтекаемого током проводника. При этом кольцевой образец располагается коаксиально на одной из ее сторон.

Достоинствами таких измерений являются простота подготовки образца к измерениям, однородность поля в нем и малая собственная емкость между проводом и сердечником. Недостатками метода являются необходимость учета сопротивления потерь витка и невозможность создания больших полей.

---

\* См., например, Грохольский А. Л. Исключение погрешности измерителя добротности типа КВ-1. «Измерительная техника», 1960, № 10.

Дальнейшее развитие метода одновиткового намагничивания состоит в применении высокочастотного пермеаметра, выполняемого в виде коаксиального держателя, в центре которого помещается испытуемый кольцеобразный образец (рис. 91).

Высокочастотный пермеаметр можно рассматривать как трансформатор. В качестве первичной обмотки служит обмотка на тороидальном ферритовом сердечнике 2. Вторичной обмоткой (короткозамкнутым витком) является латунный стакан 1, охватывающий первичную обмотку и испытуемый кольцевой образец 3. Стакан с помощью прижимного приспособления 5 замыкается металлической пластиной 4.

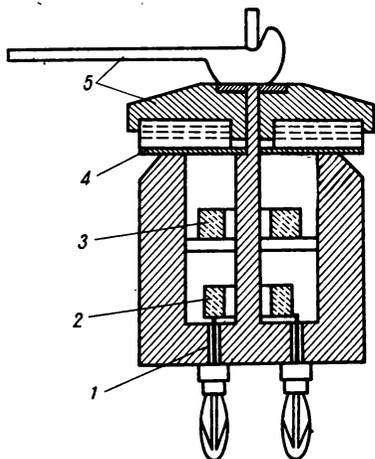


Рис. 91. Схематический разрез высокочастотного пермеаметра

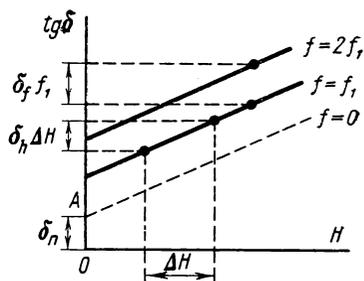


Рис. 92. Графический метод определения потерь

Для определения магнитной проницаемости и тангенса угла потерь первичная обмотка пермеаметра включается в одно из плеч высокочастотного моста или на куметр. Производится три замера полного сопротивления первичной обмотки: при разомкнутой вторичной обмотке, при замкнутой вторичной без испытуемого образца, при замкнутой вторичной при наличии образца.

По полученным данным рассчитываются составляющие комплексной магнитной проницаемости и тангенс угла потерь [Л. 4].

Высокочастотные пермеаметры позволяют испытывать магнитные материалы на частотах до 200 Мгц с относительно высокой точностью. Дополнительные погрешности, обусловленные, например, потерями в стенке держателя за счет отражения от его поверхности можно учитывать расчетным путем. При ка-

либровке прибора по эталонным образцам погрешность может быть уменьшена до 1%\*.

Выше были рассмотрены методы определения магнитной проницаемости и тангенса угла потерь. Для определения коэффициентов потерь  $\delta_h$ ,  $\delta_f$  и  $\delta_n$  пользуются графическим методом, предложенным Иорданом.

Метод основан на том, что в области слабых полей существует линейная зависимость между тангенсом угла потерь и напряженностью магнитного поля, тангенсом угла потерь и частотой, т. е.

$$\operatorname{tg} \delta = \delta_h H + \delta_f f + \delta_n.$$

Для разделения составляющих потерь по Иордану необходимо определить тангенс угла потерь при нескольких частотах и при нескольких значениях напряженности магнитного поля. Представив полученные значения в виде графика  $\operatorname{tg} \delta = \varphi(H)_{f=\text{const}}$  так, как это сделано на рис. 92, можно увидеть, что:

1) изменение тангенса угла потерь при изменении частоты на 1 гц при постоянном значении напряженности поля представляет собой коэффициент потерь на вихревые токи  $\delta_f$ ;

2) изменение тангенса угла потерь за счет изменения напряженности поля на единицу при постоянной частоте характеризуется собой коэффициент потерь на гистерезис  $\delta_h$ ;

3) отрезок  $OA$ , полученный при пересечении оси  $\operatorname{tg} \delta$  прямой, соответствующей  $\operatorname{tg} \delta$  при  $f = 0$  (прямую получают экстраполяцией), равен коэффициенту потерь на последствие  $\delta_n$ .

Следует отметить, что погрешности определения коэффициентов потерь значительно выше погрешности определения  $\operatorname{tg} \delta$  и составляют обычно 10—20% и более.

Сделаем некоторые замечания относительно измерения температурного коэффициента магнитной проницаемости  $TK_\mu$ . В соответствии с формулой (44) можно написать, что

$$TK_\mu = \frac{\mu_{t_2} - \mu_{t_1}}{\mu_{t_1} (t_2 - t_1)} = \frac{L_{t_2} - L_{t_1}}{L_{t_1} (t_2 - t_1)}, \quad (103)$$

где  $L_{t_1}$  и  $L_{t_2}$  — индуктивности соответственно при температурах  $t_1$  и  $t_2$ .

Для измерения индуктивностей пользуются описанными методами или любым другим, обеспечивающим достаточно точное измерение малых изменений индуктивностей при нагревании. Образцы для измерений помещают в термокамеру, позво-

\* Высокочастотный пермеаметр для испытания ферритовых сердечников. Экспресс-информация. Сер. «Контрольно-измерительная техника», вып. 34 (№ 130—133), 1958, IX.

ляющую регулировать и поддерживать температуру с точностью  $0,2-0,5^{\circ}\text{C}$ .

Погрешность определения  $T\kappa_{\mu}$  зависит от точности измерения и стабильности температуры образца, изменения площади витков обмотки и собственной ее емкости с температурой и других причин. Обычно эта погрешность составляет  $10-40\%$ .

Требования, предъявляемые к измерению свойств некоторых высокочастотных магнитных материалов, приведены в табл. 35.

В заключение отметим, что вопросы измерения свойств магнитных материалов на высоких частотах разработаны пока еще значительно меньше, чем измерения в постоянных или низкочастотных полях. Разработка этих вопросов представляет собой одну из важнейших задач современной электроизмерительной техники.

Таблица 35

Требования, предъявляемые к измерению свойств некоторых высокочастотных магнитных материалов

Группа и марка материала	Определение начальной магнитной проницаемости $\mu_a$			Определение $T\kappa_{\mu}$	
	Условия испытаний	Погрешность измерения, %	Рекомендуемая аппаратура	Условия испытаний	Погрешность измерения, %
Ферриты 5ВЧ, 13ВЧ, 13ВЧ1	$f=1,5 \text{ Мгц}$ , $H \leq 10 \text{ мэ}$	3	Измеритель добротности типа КВ-1	$f > 100 \text{ кгц}$ , $H=5 \text{ мэ}$	40 (для 200НН1 20)
Ферриты 50ВЧ, 100НН, 200НН1	$f=0,5 \text{ Мгц}$ , $H \leq 5 \text{ мэ}$	3			
Ферриты других марок ( $\mu_a > 200$ )	$f=1 \text{ кгц}$ ; $H \leq 5 \text{ мэ}$	3	Мосты переменного тока	$f=1 \text{ кгц}$ , $H=5 \text{ мэ}$	20
Кольца из альсифера	$f=1 \text{ кгц}$	1		$f=1 \text{ кгц}$	10

### § 32. ИЗМЕРЕНИЯ СВОЙСТВ МАГНИТНОТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Характеристиками магнитнотвердого материала являются размагничивающий участок гистерезисной петли и кривые возврата. Получение указанных характеристик требует применения сложной аппаратуры и большой затраты времени.

Поэтому в большинстве случаев испытаний, особенно в заводских условиях, ограничиваются определением  $B_r$  и  $H_c$  или измерением остаточного магнитного потока. Точка  $(BH)_{\max}$  ввиду отсутствия достаточно простой аппаратуры проверяется редко.

ГОСТ 9575—60 требует стопроцентного контроля магнитных свойств, однако практически это осуществляется только для особо ответственных типов магнитов. Массовые типы контролируются выборочно (2% от каждой плавки).

Размагничивающий участок гистерезисной петли получается обычно баллистическим методом в пермеамetre сильных полей. Типичной аппаратурой, применяемой для этой цели, является установка У-541 для испытания магнитотвердых материалов с коэрцитивной силой до 1500 э.

На рис. 93 представлен пермеамetre, входящий в комплект установки. Пермеамetre состоит из намагничивающих катушек 1, ярма 2, передвижных вкладышей 3, Т-образных полюсных наконечников 4 и зажимного механизма 5, с помощью которого можно перемещать одну половину ярма для установки об-

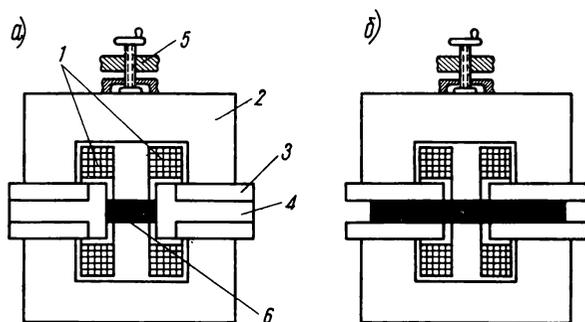


Рис. 93. Схематическое изображение пермеаметра установки типа У-541.

разца б. При испытании короткие образцы (длиной от 20 до 50 мм) помещаются между Т-образными наконечниками (рис. 93, а). Длинные полосовые образцы (длиной 100—350 мм) зажимаются непосредственно между вкладышами (рис. 93, б).

Для измерения индукции на образец накладывается измерительная обмотка  $\omega_B$ . Для измерения напряженности поля непосредственно на поверхности образца помещается входящая в комплект установки измерительная катушка  $\omega_H$ . В момент измерения  $H$  катушка с помощью отбрасывающего устройства удаляется с поверхности образца. Намагничивающее поле имеет величину до 7500 э (при длине образца 20 мм).

Импульсы тока, полученные в обмотке  $\omega_B$  в результате изменения индукции  $\Delta B$  или в обмотке  $\omega_H$  при изменении напряженности поля на величину  $\Delta H$ , измеряются баллистическим гальванометром. Погрешность определения индукции и напряженности поля не превышает  $\pm 3\%$ .

**Измерение остаточной индукции.** Для измерения остаточной индукции  $B_r$  необходимо выполнить условие  $H = 0$ . Это не всегда соответствует выключенному току в намагничивающих катушках, что объясняется подмагничивающим действием пермеаметра. Поэтому при определении  $B_r$  проверяют с помощью чувствительного потенциометра отсутствие поля на поверхности магнита. Если поле не равно нулю, то в намагничивающих обмотках создают ток такой величины, чтобы поставленное условие выполнялось. Однако, если не требуется высокая точность, считают, что  $H=0$  при отсутствии намагничивающего тока.

При массовых испытаниях магнитов в заводских условиях  $B_r$  определяется следующим образом. На нейтральное сечение

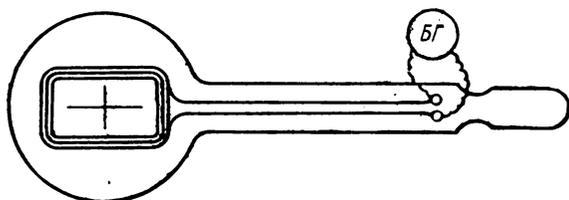


Рис. 94. Приспособление для измерения  $B_r$  баллистическим методом

магнита помещается измерительная катушка с известным значением  $S\omega$ . Для удобства измерительная катушка монтируется в ручке с окном, сделанным по форме сечения магнита (рис. 94). Концы обмотки подключаются к флюксметру.

Магнит с надетой на него катушкой помещают между полюсами намагничивающего устройства (пермеаметра или специального электромагнита), включают намагничивающий ток, выключают его, затем измеряют суммарное изменение потока при выдергивании магнита из намагничивающего устройства и последующего сдергивания с нейтрального сечения измерительной обмотки. При этом магнитное состояние меняется от  $B_r$  до  $B_A$ , соответствующему рабочей точке магнита в разомкнутой цепи, и от  $B_A$  до  $B = 0$ .

К недостаткам метода следует отнести то, что большие магниты трудно выдергивать из намагничивающего устройства, а в магнитах сложной формы не всегда можно обеспечить возможность сдергивания измерительной катушки с нейтрального сечения.

**Измерение коэрцитивной силы.** Измерение коэрцитивной силы в замкнутой магнитной цепи связано с известными трудностями, главная из которых заключается в возникновении погрешности от влияния ярма; кроме того, этот метод является очень тру-

доемким. Достоинство метода заключается в том, что он позволяет измерять «истинное» значение коэрцитивной силы  $H_c$  ( $BH_c$ ).

Измерение коэрцитивной силы в разомкнутой цепи может быть выполнено сравнительно просто и поэтому широко применяется при массовых испытаниях магнитов. Однако в данном случае измеряют не  $BH_c$ , а  $JH_c$ , что является недостатком метода.

Для материалов с коэрцитивной силой меньше 200 э разницей между  $BH_c$  и  $JH_c$  можно пренебречь. Можно ввести поправки для подсчета  $BH_c$  по измеренному значению  $JH_c^*$ .

Устройства, предназначенные для измерения коэрцитивной силы в разомкнутой цепи, называются коэрцитиметрами. Наибольшее время имеют коэрцитиметры, основанные на использовании баллистического или индукционного метода. В последнем случае устройство называют измерительным генератором.

Схематическое устройство коэрцитиметра, основанного на использовании баллистического метода, показано на рис.

95. Он состоит из намагничивающей катушки 1, обмотка которой включена в цепь постоянного тока. В центр катушки помещают испытуемый образец 2, на который надевают измерительную обмотку 3, соединенную с баллистическим гальванометром БГ.

Образец предварительно намагничивается до насыщения. Для этой цели можно использовать или намагничивающую катушку коэрцитиметра или, если поле катушки недостаточно, специальное намагничивающее устройство.

После помещения образца в соленоид ток в последнем подбирают таким образом, чтобы при сдвигании катушки (или выдергивании магнита из катушки) подвижная часть БГ осталась неподвижной. Направление тока в обмотке соленоида должно быть выбрано при этом таким образом, чтобы поля катушки и образца были направлены навстречу друг другу. При нулевом отбросе поле в катушке равно коэрцитивной силе образца. Поскольку поле соленоида пропорционально току в его обмотке, то шкала амперметра может быть проградуирована в единицах  $H_c$ .

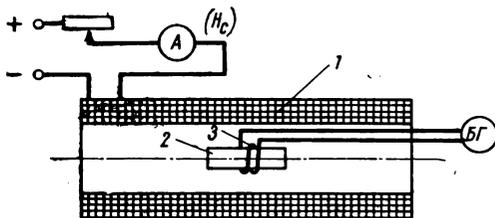


Рис. 95. Схематическое изображение коэрцитиметра, основанного на баллистическом методе

\* Ягола Г. К. и Чернышев Е. Т. Определение коэрцитивной силы в разомкнутой магнитной цепи. Труды ВНИИМ, вып. 18 (34), 1938.

При массовых испытаниях магнитов ток в катушке устанавливается по образцовому магниту, а в цепь измерительной обмотки может быть включен переносный прибор (микроамперметр с нулем посередине) и в зависимости от того, в какую сторону получается отброс при выдергивании испытуемого магнита, производится отбраковка.

Схематическое устройство измерительного генератора представлено на рис. 96. Он отличается от коэрцитиметра, основанного на использовании баллистического метода, только индикаторным устройством, устроенным следующим образом.

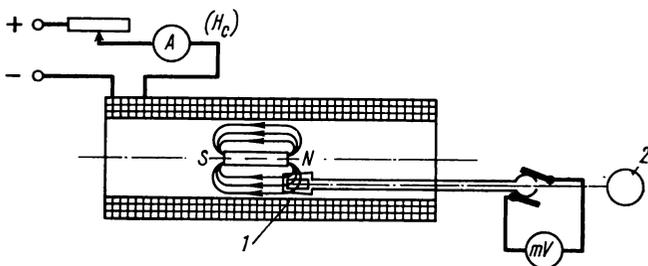


Рис. 96. Схематическое изображение измерительного генератора

В поле соленоида помещена измерительная катушка *1*, которая приводится в быстрое вращение с постоянной скоростью синхронным двигателем *2*. Обмотка катушки подключена с помощью коллектора и щеток к нулевому индикатору — гальванометру с двусторонней шкалой. Витки обмотки расположены так, что при ее вращении в поле соленоида без образца э. д. с. не возникает.

Если теперь в соленоид поместить намагниченный образец таким образом, чтобы оси катушки *1* и образца были смещены, то вследствие наличия в поле магнита поперечной составляющей в обмотке возникнет э. д. с., которая станет равной нулю при равенстве абсолютных величин коэрцитивной силы  $H_c$  и поля соленоида.

**Измерение остаточного магнитного потока.** В большинстве случаев измерение остаточного магнитного потока производится сравнением с потоком образцового магнита.

На рис. 97 представлена дифференциальная схема по магнитному потоку с применением датчика Холла. В этой схеме датчик э. д. с. Холла *1* реагирует на разность магнитных потоков, образованных измеряемым *2* и образцовым *3* магнитами, включенными через ярмо *4*. Неравенство потоков вызывает по-

явление э. д. с., знак которой (при питании датчика постоянным током) или фаза (при питании датчика переменным током) показывает, какой из магнитов дает поток, больший по величине.

Для измерения абсолютной величины остаточного потока можно воспользоваться баллистическим методом. При этом на нейтральном сечении магнита располагают измерительную обмотку, соединенную с флюксметром. Сдергивая обмотку с образца, можно измерить остаточный поток.

Во многих случаях измерение только  $B_r$ ,  $H_c$  или остаточного потока недостаточно для характеристик постоянного магнита, а получение размагничивающей кривой баллистическим методом слишком сложно.

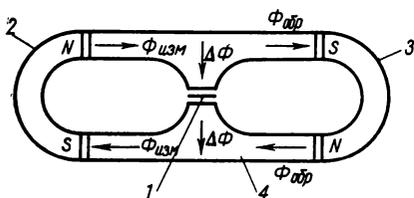


Рис. 97. Дифференциальная схема измерения остаточного магнитного потока

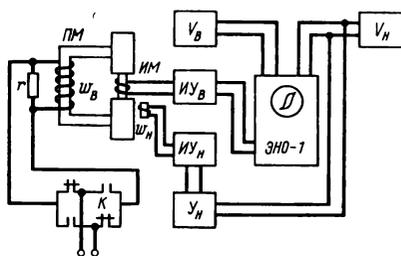


Рис. 98. Блок-схема ферротестера для испытания постоянных магнитов

Желательно иметь устройство, с помощью которого можно было бы измерять размагничивающую кривую с записью характеристики на бумаге, фотопленке, экране осциллографа или подачей данных измерений в автомат для разбраковки магнитов.

Такого рода устройства, называемые феррографами, в последнее время интенсивно разрабатываются. Их особенность заключается в том, что контроль осуществляется не в постоянных полях, а в полях с частотой в несколько герц.

На рис. 98 приведена блок-схема подобного устройства, названного ферротестером для испытания постоянных магнитов\*. Ферротестер предназначен для испытания постоянных литых магнитов с длиной 3—10 см, сечением 1—10 см<sup>2</sup>, в полях до 500 000 а/м при зазоре 5 см.

Принцип работы ферротестера заключается в следующем. Испытуемый магнит зажимается между полюсами пермеаметра ПМ. Предварительно на образец наматывается измерительная катушка индукции  $\omega_B$ . Сверху на магнит помещается измерительная катушка поля  $\omega_H$ . Контакт К служит для изменения

\* Ферротестер разработан в Новочеркасском политехническом институте.

направления тока в обмотке пермеаметра. При этом в измерительных катушках индукции и поля наводятся э. д. с. соответственно  $E_B$  и  $E_H$ , которые подаются на интегрирующие усилители электронного устройства. Напряжение с выхода интегрирующего усилителя  $IУ_B$  усиливается усилителем постоянного тока и подается на вертикальные отклоняющие пластины осциллографа. Напряжение с выхода интегрирующего усилителя  $IУ_H$ , усиленное усилителем постоянного тока  $У_H$ , подается на горизонтальные отклоняющие пластины осциллографа. Таким образом, на экране осциллографа получаем зависимость  $B = f(H)$  при перемагничивании образца с частотой 1—2 гц.

Электронные пиковые вольтметры  $V_B$  и  $V_H$  отмечают максимальные значения магнитной индукции и напряженности поля. Погрешность измерений  $B$  и  $H$  не превышает  $\pm 7\%$ .

Кроме определения указанных выше характеристик постоянных магнитов, в ряде случаев необходимо решать и более частные задачи: измерять индукцию в зазоре магнитной системы, распределение м. д. с. по длине магнита и магнитопровода, потоки рассеяния, исследовать вопросы стабильности и температурные зависимости.

### § 33. ИЗМЕРЕНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ С ППГ

При изготовлении сердечников с ППГ целесообразно первую оценку производить по гистерезисной петле, используя баллистический метод. Этим методом можно определить значения максимальной и остаточной индукций, величину коэрцитивной силы, коэффициент прямоугольности и точку Кюри. Баллистический метод дает возможность получить основную кривую намагничивания, частные циклы, предельную петлю гистерезиса и температурные характеристики.

Из-за недостаточной чувствительности гальванометра статические характеристики ферритовых сердечников с наружным диаметром менее 3 мм обычно снимаются с нескольких образцов одновременно. Применяя фотокомпенсационный микровольтметр (см. § 29), можно получить индивидуальные характеристики для сердечников малых размеров.

Осциллографический метод позволяет наблюдать и фотографировать семейство частых циклов, предельную петлю гистерезиса, подбирать идентичные сердечники, определять значения  $B_r$ ,  $B_{max}$ ,  $H_c$ ,  $K_{пр}$  и определять величину магнитной проницаемости на различных участках петли гистерезиса.

Недостатком осциллографического метода является невысокая точность измерений, особенно при определении коэффициента прямоугольности. В основном это объясняется наличием фазовых искажений в каналах вертикального и горизонтально-

го усиления, что особенно сказывается при работе прибора в широком частотном диапазоне. Например, для измерения с точностью до 5% динамической коэрцитивной силы величиной 0,5—1 а/см фазовый сдвиг между сигналами обоих усилителей должен быть не более 5° [Л. 44]. Чем уже и круче петля перемагничивания, тем более жесткие требования должны предъявляться к частотным характеристикам усилителя.

Баллистический и осциллографический методы измерений имеют тот недостаток, что измерения производятся в статическом режиме или при синусоидальном изменении намагничивающего поля.

Наиболее полное представление о характеристиках ферромагнетика с ППГ можно получить при его перемагничивании в импульсном режиме, что соответствует его применению в реальных схемах. Поэтому импульсные методы испытаний ферромагнетиков с ППГ получили наибольшее распространение [Л. 45].

При детальном исследовании свойств ферромагнетика с ППГ обычно производится снятие зависимости инверсного времени перемагничивания  $1/\tau_{\Phi}$  и амплитуды выходного сигнала  $e_{\text{вых}}$  от величины намагничивающего импульсного поля  $H_{\text{max}}$ . Снимая эти две зависимости, необходимо так поставить опыт, чтобы явление наблюдалось «в чистом виде». В противном случае аппаратный эффект может настолько исказить картину, что получающиеся зависимости будут в основном определяться не характеристикой сердечника, а параметрами измерительной аппаратуры.

Подобные установки должны удовлетворять следующим требованиям:

1) прямоугольные разнополярные импульсы тока должны быть сдвинуты во времени;

2) амплитуда каждого импульса должна регулироваться в широких пределах и независимо друг от друга;

3) намагничивающее поле должно достигать установленного значения за временной интервал, пренебрежимый по сравнению с временем перемагничивания;

4) длительность каждого импульса должна быть больше максимального времени перемагничивания испытуемого образца;

5) внутреннее сопротивление источника переключающих токов во всем диапазоне изменения их амплитуды должно оставаться во много раз большим, чем сопротивление, вносимое проверяемым сердечником.

Обычно испытания сердечников производятся на стендах, которые позволяют создавать программы перемагничивающих импульсов различной полярности, амплитуды, порядка и частоты следования. Такие стенды разработаны и применяются во

многих организациях. Наибольшую известность получили стенды «С-1» и «С-2», разработанные в Институте точной механики и вычислительной техники АН СССР [Л. 46].

Блок-схема простейшей измерительной установки для испытаний материалов с ППГ приведена на рис. 99, а.

Перемагничивание сердечников осуществляется разнополярными импульсами поля с амплитудой  $H_{\max}$ , создаваемыми намагничивающими токами во встречно включенных обмотках  $w_1$ .

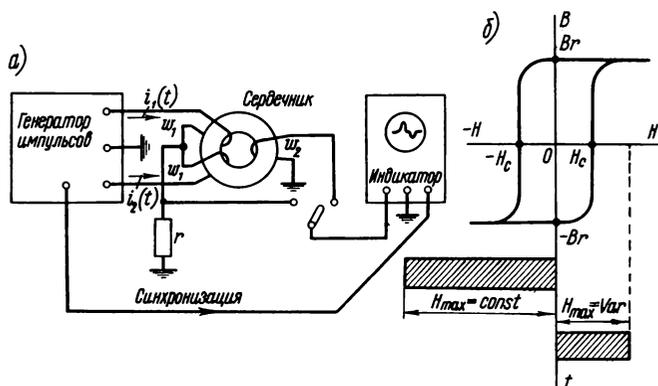


Рис. 99. Блок-схема установки для получения динамических характеристик материалов с ППГ

Для измерения величины переключающего поля используется измерительное сопротивление  $r$ . Один из импульсов устанавливается достаточной амплитуды для того, чтобы перемагничивание осуществлялось из состояния  $B_r$  при любой величине импульса тока противоположной полярности (рис. 99, б).

Параметры импульсов тока, частотная характеристика и скорость развертки осциллографа определяются диапазоном изменения намагничивающего поля  $H_{\max}$  и временем переключения сердечника  $\tau_{\Phi}$ . Амплитуда и скорость нарастания импульсов  $H(t)$  должны быть достаточно большими, чтобы обеспечить динамический режим перемагничивания, при котором влияния статического поля, а также формы тороидального образца были минимальными. Установка позволяет получать зависимости

$$1/\tau_{\Phi} = f_1(H_{\max}) \text{ и } e_{\text{вых}} = f_2(H_{\max}).$$

С помощью графической аппроксимации этих характеристик определяются два важных динамических параметра: поле старта  $H_{\text{ст}}$  и коэффициент переключения  $S_w$  (рис. 100).

Так как требования, предъявляемые к сердечникам, предназначенным для работы в запоминающих устройствах, существенно отличаются от требований, предъявляемых к сердечникам переключающих и логических схем, то соответственно различны и программы испытаний этих сердечников.

Сердечники запоминающих устройств, работающие в режиме перемагничивания совпадающими во времени полуточками или третями токов, не должны существенно изменять свое магнитное состояние при воздействии этих токов в отдельности. Поэтому программа переключающих импульсов должна строиться таким образом, чтобы она позволяла оценить устойчивость исследуемых сердечников к токам полувозбуждения.

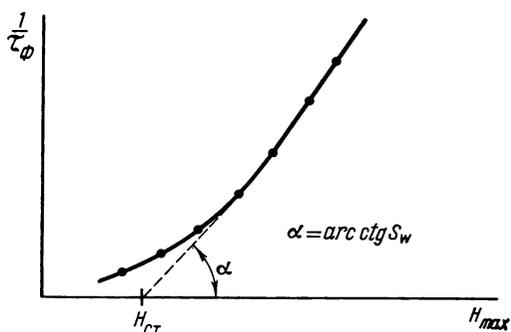


Рис. 100. Графический метод определения поля старта  $H_{ст}$  и коэффициента переключения  $S_w$

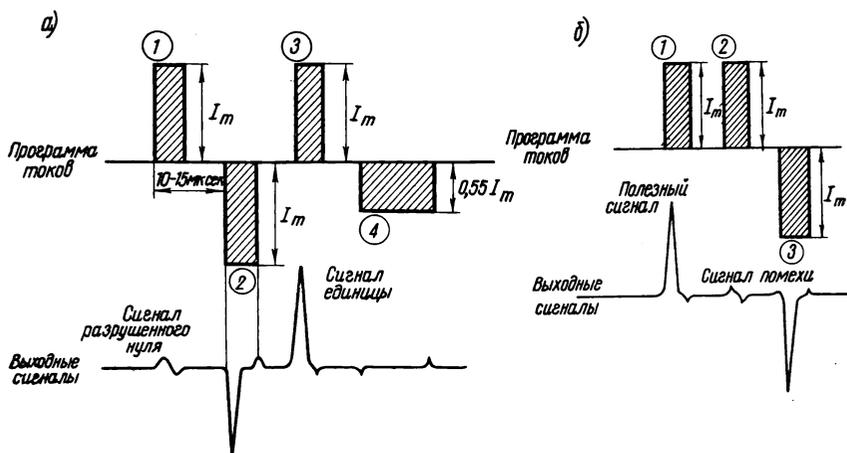


Рис. 101. Программа проверки ферритовых сердечников, предназначенных для работы в запоминающих устройствах (а) и в устройствах переработки дискретной информации (б)

На рис. 101, а приведена программа импульсной проверки на испытательном стенде «С-1» ферритовых сердечников, предназначенных для работы в магнитных запоминающих устройствах. Величина амплитуды перемагничивающих токов опреде-

ляется маркой испытуемого сердечника и должна поддерживаться с точностью порядка 5%. Длительность переднего фронта импульсов тока должна лежать в пределах 0,25—0,3 мксек. Продолжительность импульсов тока 1, 2 и 3 устанавливается в пределах 5—6 мксек, а продолжительность импульса 4—15 мксек.

Импульс 4 может быть заменен серией импульсов меньшей продолжительности. Интервал времени между передними фронтами соседних импульсов в пачке 10—15 мксек. Пачки формируются с частотой 4—6 кГц.

Для сердечников, предназначенных для работы в устройствах переработки дискретной информации (в переключающих и логических схемах), основным требованием является высокое отношение полезного сигнала, получаемого при переходе сердечника из одного состояния остаточной индукции в противоположное состояние индукции насыщения, к сигналу помехи, возникающему при изменении индукции в сердечнике от максимального значения до остаточного. Программа испытательных импульсов, позволяющая определить величину полезного сигнала и сигнала помехи, представлена на рис. 101, б. Требования к импульсам тока, входящим в программу, примерно такие же, как и рассмотренные выше.

Импульсные характеристики, снятые при одних условиях, могут оказаться непригодными для расчета других схем и для выбора режимов в других условиях. Недооценка этого обстоятельства часто приводит к серьезным ошибкам при конструировании устройств, содержащих ферромагнетики с ППГ, когда измерения и отбор сердечников осуществляются на установке с мощными токовыми генераторами, а работа сердечников происходит в схемах меньшей мощности при худшей форме токов. Поэтому необходимо производить отбор сердечников на установках, выходные цепи которых близко приближаются к реальным условиям работы исследуемых сердечников.

Кроме измерительных стендов, позволяющих детально исследовать свойства материалов с ППГ, большое значение при использовании этих материалов имеют установки, предназначенные для цехового контроля сердечников, их подбора по одному или нескольким параметрам и т. п. В связи с тем, что количество сердечников, требующих контроля, очень велико, подобные устройства чаще всего выполняют автоматическими.

В качестве параметров, по которым осуществляется сортировка в различных устройствах, принимаются выходное напряжение, коэффициент квадратности, изменение потока и ряд других. Определение всех этих параметров сводится к точному определению амплитуд импульсов.

Такая разбраковка осуществляется на автоматах, производящих сортировку сердечников на 3—5 групп. Так как в настоящее время для ферритов одной партии выходное напряжение изменяется незначительно, то при разбраковке на небольшое число сортов приходится производить многократную сортировку сердечников, что снижает производительность автоматов.

Блок-схема подобного автомата\*, представляющего собой электронное измерительное устройство для автоматической разбраковки ферритовых сердечников на 15 групп, приводится на рис. 102.

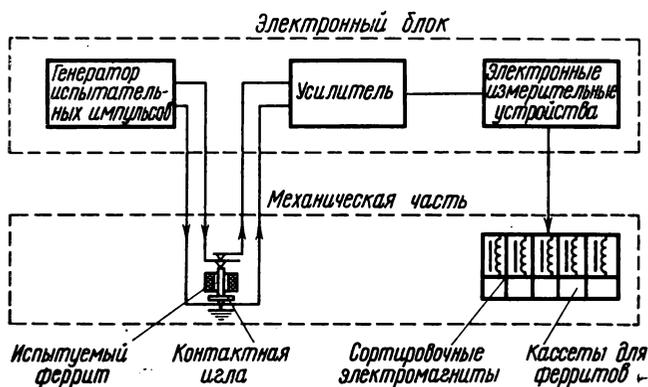


Рис. 102. Блок-схема автомата для разбраковки ферритовых сердечников с ППГ

Ферриты засыпаются в бункер, откуда с помощью транспортирующего устройства направляются к контактной игле. Сердечник пронизывается иглой, через которую затем проходит испытательная программа токовых импульсов. Электродвижущая сила, наводимая на игле, усиливается и анализируется по амплитуде электронным измерительным устройством. Измерительное устройство управляет электромагнитами сортировки, подключая выбранный электромагнит к источнику питания.

Наиболее тщательная разбраковка требуется для сердечников, работающих в запоминающих устройствах матричного типа. На описанном автомате подобная разбраковка осуществляется в два этапа. На первом этапе ферриты сортируются по выходному напряжению, на втором этапе — по квадратурности. Программы перемагничивающих токов автомата на первом и втором этапах напоминают программы, приведенные, соответственно, на рис. 101, а, б.

\* Офенгенден Р. Г. и Серман В. З. Автомат для сортировки ферритовых сердечников. Сб. «Вопросы вычислительной техники», ГИТТЛ, 1961.

Рассмотренные выше приборы и методы для измерения свойств материалов с ППГ относятся к сердечникам из ферритов и тонких металлических лент. Определение магнитных свойств тонких ферромагнитных пленок связано со значительными трудностями. Остаточные потоки ферритового сердечника и пленочного элемента примерно с одинаковыми габаритными размерами отличаются в несколько сотен раз. Это обуславливает малую величину выходного сигнала, снимаемого при перемагничивании пленочного элемента. Простым увеличением коэффициента усиления усилителя задачу осциллографирования получаемого сигнала решить не удается, так как требуется применение усилителей с коэффициентом усиления, равным миллиону. В таких усилителях существенно сказываются их собственные шумы, и они склонны к самовозбуждению.

Поэтому обычно при исследовании ферромагнитных пленок на пленочный элемент накладывается многovitковая обмотка, содержащая несколько сотен витков и более. Импульсные испытания тонких пленок проводятся по методике, близкой к исследованию ферромагнитных сердечников с ППГ.

#### § 34. ИЗМЕРЕНИЯ СВОЙСТВ ФЕРРИТОВ ДЛЯ СВЧ

Основными параметрами, характеризующими свойства ферритов на СВЧ, являются компоненты тензора магнитной проницаемости  $\mu$  и диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ . Техника измерения этих параметров сложна, связана с громоздким расчетным аппаратом и, что самое существенное, переход от полученных величин к интегральным, результирующим параметрам ферритовых деталей, применяемых в конкретных устройствах, затруднителен и не отличается высокой точностью. Поэтому обычно основными являются измерения параметров ферритовых вкладышей в реальных волноводных конструкциях. К таким измерениям относятся измерения угла поворота плоскости поляризации, затухания электромагнитной энергии при прохождении через феррит, фазового сдвига и некоторых других параметров.

Поскольку результирующее взаимодействие феррита с распространяющейся через него электромагнитной волной зависит не только от самого феррита, но и от параметров волноводной системы, а также от геометрии ферритового вкладыша, то полученная таким образом информация весьма ограниченно характеризует феррит как материал. Всегда существует вероятность того, что, сделав отрицательное заключение о феррите, не определили оптимальную геометрию устройства.

Методы и аппаратура, применяемые для измерений на СВЧ, очень своеобразны [Л. 48]. В настоящей книге нет возможности

подробно рассматривать эти вопросы, поэтому ограничимся только некоторыми примерами, которые позволят получить общее представление об этой области измерений.

**Измерение угла поворота плоскости поляризации  $\Delta\theta_n$  (град)** осуществляется по измерению ориентации эюры поля электромагнитной волны, прошедшей через участок волновода с ферритом. Измерения производят на установке, принципиальная блок-схема которой изображена на рис. 103.

Для обеспечения требуемой точности измерений порядка  $\pm 2^\circ$  специальные элементы круглого волновода и переходы должны обладать хорошей симметричностью и не вносить заметных отражений в тракт. С этой же целью в схему вводятся развязывающие вентили.

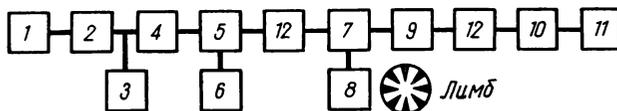


Рис. 103. Блок-схема установки для измерения угла поворота плоскости поляризации:

1 — СВЧ генератор; 2 — вентиль; 3 — волномер; 4 — аттенюатор; 5 — измерительная линия; 6 — индикатор; 7 — волновод с испытуемым ферритом; 8 — электромагнит; 9 — вращающийся волновод с лимбом; 10 — детекторная секция; 11 — индикатор; 12 — переход с прямоугольного на круглый волновод

При измерениях может быть использована стандартная аппаратура: в трехсантиметровом диапазоне — генератор типа 51-И или ГС-624; волномер типа 35-ИМ; измерительная линия типа ИВЛУ-140 или 33-И; индикатор типа 28-И; измеритель малой мощности типа ВИМ-1; измеритель большой мощности типа ИМ-4; прочие элементы из комплекта измерительной аппаратуры типа 52-И. В десятисантиметровом диапазоне может быть использован генератор типа ГС-38 или ГСС-27; волномер типа ВСТ-10; измерительная линия типа Р1-11; индикатор типа 28-И; измеритель малой мощности типа ИММ-5; измеритель большой мощности типа ИМ-4; прочие элементы из комплекта измерительной аппаратуры типа ЭО-1.

Вначале (до установки испытуемого образца), поворачивая вращающийся волновод 9 с детекторной секцией, замечают положение  $\theta_1$ , соответствующее максимальным показаниям индикатора 11. Затем, установив испытуемый образец и нужное подмагничивающее поле, определяют новое положение  $\theta_2$ , соответствующее максимальной амплитуде электрического поля. Величина угла поворота плоскости поляризации определяется разностью отсчетов по лимбу

$$\Delta\theta_n = \theta_2 - \theta_1.$$

Хорошие ферриты обеспечивают угол поворота, равный  $45^\circ$ , при подмагничивающем поле порядка десятка эрстед и менее и потерях  $0,1—0,2$  дб.

**Измерение затухания**  $\beta$  (дб) осуществляется определением затухания электромагнитной волны, прошедшей через участок волновода с ферритом и производится на установке, принципиальная блок-схема которой изображена на рис. 104, методом сравнения или замещения с помощью калиброванного аттенюатора. При измерениях используется стандартная измерительная аппаратура, указанная выше.

Вначале (без измеряемого образца феррита) с помощью калиброванного аттенюатора 9 устанавливают и отмечают по индикатору 11 некоторый начальный уровень мощности. Затем устанавливают волновод с ферритом, требуемое намагничивающее поле и с помощью того же аттенюатора 9 восстанавливают

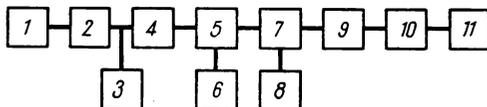


Рис. 104. Блок-схема установки для измерения потерь:  
1 — СВЧ генератор; 2 — вентиль; 3 — волномер; 4 — аттенюатор;  
5 — измерительная линия; 6 — индикатор; 7 — волновод с испытуемым ферритом; 8 — электромагнит; 9 — калиброванный аттенюатор; 10 — детектор; 11 — индикатор

начальные показания индикатора 11. Величину потерь определяют по разности показаний  $\beta = \beta_1 - \beta_2$  аттенюатора 9. Измерительная линия используется для контроля отражений от феррита с целью учета потерь на отражение  $\beta_0$ , которые определяют по формуле

$$\beta_0 = 10 \lg (1 - \Gamma),$$

где  $\Gamma$  — коэффициент отражения от феррита по мощности.

Схема позволяет измерять средние и высокие потери от  $0,5—1,0$  дб и выше.

Для измерения малых потерь порядка  $0,1—0,2$  дб идея метода остается той же, т. е. сравнение сигналов, проходящих через пустой волновод и волновод с ферритовым образцом, но для повышения чувствительности применяются балансные или дифференциальные схемы. Такая схема, например, изображена на рис. 105.

В этой схеме на дифференциальном трансформаторе 13 происходит вычитание сигналов, поступающих из плеча III и из идентичных плеч I и II, поочередно подключаемых с помощью переключателей 9. В начале измерения (до установки испытуемого образца) при изображенном на рисунке положении I переключателей 9, схему балансируют с помощью аттенюаторов 4. Затем, установив измеряемый образец, нужное подмагничи-

вающее поле и заметив показания индикатора 11, переключают переключатели 9 в положение II. Далее с помощью калиброванного аттенюатора 12 определяют измеряемые потери. Схема обеспечивает точность измерений не ниже 3—5%.

**Измерение фазового сдвига  $\Delta\varphi$  (град)** осуществляется сравнением фазы электромагнитной волны, проходящей через волновод с ферритом, с постоянной фазой волны произвольной точки тракта до испытуемого волновода. Измерения могут осуществляться двумя способами: в режиме бегущей волны и в режиме стоячей волны\*.

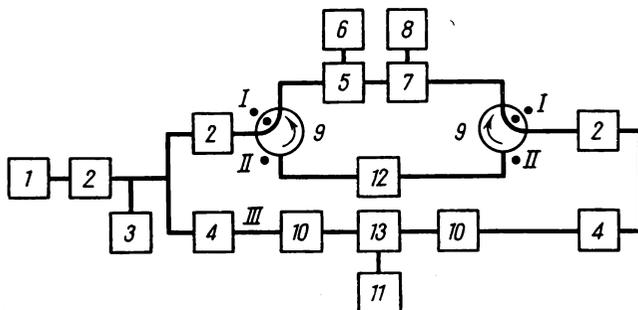


Рис. 105. Блок-схема установки для измерения малых потерь:

1 — СВЧ генератор; 2 — вентиль; 3 — волномер; 4 — аттенюатор; 5 — измерительная линия; 6 — индикатор; 7 — волновод с испытуемым ферритом; 8 — электромагнит; 9 — переключатель; 10 — детекторная секция; 11 — индикатор; 12 — калиброванный аттенюатор; 13 — дифференциальный трансформатор

В первом случае измерения производят на установке, принципиальная блок-схема которой изображена на рис. 106.

В измерительной линии 5, нагруженной на согласованную нагрузку 10, устанавливается бегущая волна, поле которой характеризуется постоянной амплитудой и линейным изменением фазы, равным

$$\Delta\varphi = \frac{360}{\lambda_{\text{в}}} \Delta l \text{ [град. эл]}, \quad (104)$$

где  $\frac{360}{\lambda_{\text{в}}}$  — фазовая постоянная, град. эл/см;

$\lambda_{\text{в}}$  — волноводная длина волны, см;

$\Delta l$  — перемещение вдоль линии, см.

На детекторе 9 измерительной линии происходит смешение сигналов, поступающих непосредственно от генератора, помимо

\* Режим бегущей волны соответствует работе генератора на согласованную нагрузку, когда в линии распространяется только одна волна, «бегущая» в сторону нагрузки. В противоположность этому режим, при котором в линии имеют место отражения, т. е. распространяются две взаимно противоположные волны, называется режимом стоячей волны.

участка с ферритом и прошедшего участок волновода с ферритом. В начале измерения до установки в волновод испытуемого образца феррита, перемещая зонд измерительной линии, по минимальной индикации определяют положение точки, в которой фазы складываемых сигналов будут противоположными. Затем, установив феррит и требуемое подмагничивающее поле, отыскивают новое положение этой точки. Смещение  $\Delta l$  этой точки дает искомый сдвиг фазы волны, прошедшей через феррит.

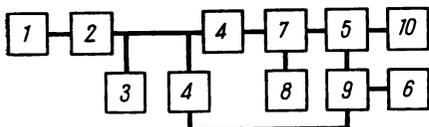


Рис. 106. Блок-схема установки для измерения сдвига фазы методом бегущей волны:

1 — СВЧ генератор; 2 — вентиль; 3 — волномер; 4 — аттенюатор; 5 — измерительная линия, переделанная для фазовых измерений; 6 — индикатор; 7 — волновод с испытуемым ферритом; 8 — электромагнит; 9 — детектор измерительной линии; 10 — согласованная нагрузка

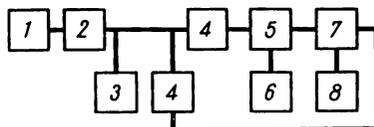


Рис. 107. Блок-схема установки для измерения сдвига фазы методом стоячей воды:

1 — СВЧ генератор; 2 — вентиль; 3 — волномер; 4 — аттенюатор; 5 — измерительная линия; 6 — индикатор; 7 — волновод с испытуемым ферритом; 8 — электромагнит

Второй способ рекомендуется тогда, когда отсутствует специально переделанная для фазовых измерений измерительная линия или такая переделка вообще нежелательна, например в миллиметровом диапазоне.

В этом случае измерения производят на установке, блок-схема которой изображена на рис. 107. В измерительной линии 5, питаемой с обоих концов сигналами, один из которых проходит участок с ферритом, происходит их сложение и устанавливается стоячая волна. Методика измерения идентична методике режима бегущей волны, а искомый фазовый сдвиг определяется выражением

$$\Delta\varphi = 2 \frac{360}{\lambda_b} \Delta l \text{ [град. эл.]} \quad (105)$$

Обозначения в выражении (105) те же, что и в (104), а коэффициент 2 вызван удвоением скорости изменения фазы, определяемым наличием двух волн. Для повышения точности все отсчеты по измерительной линии производятся методом «вилки». Точность измерения составляет 2—4°.

**Измерение магнитной и диэлектрической проницаемостей, тангенса угла магнитных и диэлектрических потерь, ширины резонансной кривой и величины порогового поля.** Известно много методов измерения этих параметров, но наибольшее распространение получили волноводные и резонаторные методы измерения. Принцип их заключается в том, что исследуемый мате-

риал заполняет частично или полностью волновод или резонатор. Измерения сводятся к измерениям таких высокочастотных параметров, как волновое сопротивление, постоянная распространения, коэффициент отражения, собственная частота резонатора и др.

Усовершенствованием этой методики явилось применение для измерения параметров ферритов стандартных измерителей диэлектриков, например типа З6-И.

**Измерения параметров ферритов на высоком уровне СВЧ мощности** является обязательным для всех ферритов, используемых в устройствах, работающих при повышенной мощности. Принципы измерения остаются в основном теми же. Но так как стандартная измерительная аппаратура для измерений на высоком уровне мощности отсутствует, то в схеме применяются так называемые направленные ответвители, которые ответвляют в измерительную цепь очень незначительную часть мощности основного тракта (например,  $10^{-6}$ ).

**Измерение температурных параметров, статических магнитных параметров и влияния механических факторов на свойства ферритов.** Важными параметрами, определяющими качество феррита, являются его температурные свойства. Эти свойства не только непосредственно определяют условия работы феррита с точки зрения температуры окружающей среды, но и играют решающую роль для устройств высокого уровня мощности, в которых ферритовые вкладыши находятся в особо тяжелых условиях из-за значительной величины рассеиваемой в них СВЧ мощности.

Измерение зависимости свойств ферритов для СВЧ от температуры осуществляются обычными методами с помощью образцов из исследуемого материала, например, в форме колец, помещаемых в специальный термостат.

Эти измерения, в противоположность большей части предшествующих измерений, предоставляют достоверные сведения о свойствах самого материала. Однако, как и в случае измерения высокочастотных параметров, обязательно проводятся температурные исследования ферритовых деталей в реальных конструкциях. Это замечание относится и к проведению прочих климатомеханических испытаний ферритов.

В заключение можно отметить, что перечисленные параметры и их измерения далеко не исчерпывают область измерений свойств ферритов для СВЧ. Значительное число параметров, например, параметры ферромагнитного и естественного резонанса, магнитокристаллографической анизотропии, компонент тензора магнитной и диэлектрической проницаемости, являются предметом обширной области специальных измерений свойств СВЧ ферритов. Однако в большинстве случаев разработок практически ограничиваются измерениями, рассмотренными выше.

## ЛИТЕРАТУРА

### Основная

1. Справочник по электротехническим материалам. Под ред. Н. П. Богородицкого и В. В. Пасынкова. Ч. II. Госэнергоиздат, 1960.
2. Бозорт Р. Ферромагнетизм (перев. с англ.). Изд-во иностр. лит-ры, 1956.
3. Займовский А. С. и Чудновская Л. А. Магнитные материалы. Госэнергоиздат, 1957.
4. Кифер И. И. Испытания ферромагнитных материалов. Госэнергоиздат, 1962.
5. Меськин В. С. Ферромагнитные сплавы. ОНТИ НКТП СССР, 1937.
6. Поливанов К. М. Ферромагнетики. Госэнергоиздат, 1957.
7. Рабкин Л. И. Высокочастотные ферромагнетики. Физматгиз, 1960.
8. Рейнбот Г. Технология и применение магнитных материалов (перев. с нем.). Госэнергоиздат, 1963.
9. Чернышев Е. Т. [и др.]. Магнитные измерения на постоянном и переменном токе. Стандартгиз, 1962.

### Дополнительная

#### К введению

10. Аркадьев В. К. Электромагнитные процессы в металлах. Ч. I и II. Госэнергоиздат, 1934 и 1936.
11. Белов К. П. Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнетиках. ГИТТЛ, 1957.
12. Боровик Е. С. и Мильнер А. С. Лекции по ферромагнетизму. Изд-во Харьковского университета, 1960.
13. Вонсовский С. В. Современное учение о магнетизме. Гостехиздат, 1953.
14. Магнитные свойства металлов и сплавов (перев. с англ.). Изд-во иностр. лит-ры, 1961.
15. Вонсовский С. В. и Шур Я. С. Ферромагнетизм. Гостехиздат, 1948.
16. Тамм И. Е. Основы теории электричества. Гостехиздат, 1956.

#### К главе I

17. Дружинин В. В. Магнитные свойства электротехнической стали. Госэнергоиздат, 1962.
18. Жетвин Н. П. [и др.]. Технически чистое железо. Metallurgizdat, 1962.

19. Жуков В. А. Технология производства радиоаппаратуры. Госэнергиздат, 1959.
20. Рабкин Л. И. [и др.]. Технология ферритов. Госэнергиздат, 1962.
21. Рабкин Л. И. и Шольц Н. Н. Магнитоэлектрики и феррокаатушки. Госэнергиздат, 1948.
22. Розенблат М. А. Магнитные усилители. «Советское радио», 1960.
23. Смит Я. и Вейн Х. Ферриты (перев. с англ.). Изд-во иностр. лит-ры, 1962.
24. Смоленский Г. А. и Гуревич А. Г. Полупроводниковые ферромагнетики. Сб. «Полупроводники в науке и технике», Изд-во АН СССР, 1958.
25. Стрелец П. Л. Технология изготовления и термической обработки ленточных тороидальных сердечников из магнитномягких материалов. Судпромгиз, 1957.

## К главе II

26. Белевцев А. Т. Технология электроприборостроения. Ч. II. «Технология электроэлементов». Изд. МЭИ, 1962.
27. Довгалецкий Я. М. Сплавы для постоянных магнитов. Металлургиздат, 1954.
28. Кантер А. С. Постоянные магниты. Энергиздат, 1938.
29. Лившиц Б. Г. и Львов В. С. Высококоэрцитивные сплавы. Металлургиздат, 1960.

## К главе III

### (материалы с ППГ)

30. Лосев Д. П. [и др.]. Элементы и узлы бесконтактных телемеханических устройств. Судпромгиз, 1962.
31. Балашов Е. П. Проектирование магнитных элементов и устройств электронных вычислительных машин. Изд. ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина), 1964.
32. Сметанина В. М. Временные технические условия на ферритовые сердечники с прямоугольной петлей гистерезиса. Изд. ИТМ и ВТ АН СССР, 1960.
33. Пирогов А. И. и Шамаев Ю. М. Характеристики ферритовых сердечников с прямоугольной петлей гистерезиса (справочник). Изд. МЭИ, 1962.
34. Бардиж В. В. [и др.]. Статические и импульсные свойства микронных сердечников с прямоугольной петлей гистерезиса. Изд. ИТМ и ВТ АН СССР, 1961.

### (ферриты для СВЧ)

35. Гуревич А. Г. Ферриты на сверхвысоких частотах. Физматгиз, 1960.
36. Микаэлян А. Л. Теория и применение ферритов на сверхвысоких частотах. Госэнергиздат, 1963.
37. Фриш С. Э. и Тиморева А. В. Курс общей физики. Т. III. Физматгиз, 1961.
38. Фокс А. Д. [и др.]. Свойства ферритов и их применение в диапазоне СВЧ. «Советское радио», 1956.
39. Некоторые применения ферритов в антенно-волноводной технике. Сб. переводов. Под. ред. А. Л. Микаэляна. «Советское радио», 1958.

## К главе IV

40. Новые методы и аппаратура для испытания ферромагнитных материалов. Труды института комитета стандартов, мер и измерительных приборов при СМ СССР, Москва — Ленинград, 1962, вып. 64 (124).

41. Электрические измерения. Общий курс. Под. ред. А. В. Фремке. Госэнергоиздат, 1963.
42. Энциклопедия измерений, контроля и автоматизации. Т. 1. Госэнергоиздат, 1962.
43. Чечерников В. И. Магнитные измерения. Изд-во МГУ, 1963.
44. Пилькевич Л. А. Приборы для измерения характеристик ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса, применяемых в электронных цифровых вычислительных машинах. Сб. «Вопросы вычислительной техники», ГИТТЛ, 1961.
45. Иоффе А. Ф. и Филинов Е. Н. Измерение параметров ферритовых сердечников с прямоугольной петлей гистерезиса. Госэнергоиздат, 1963.
46. Стенд «С-1». Описание и инструкция по эксплуатации. Изд. ИТМ и ВТ АН СССР, 1959.
47. Визун Ю. И. Прибор для изучения импульсных свойств магнитных сердечников (стенд «С-2»). Сб. «Магнитные элементы устройств вычислительной техники». Изд-во АН СССР, 1961.
48. Тишер. Ф. Техника измерений на сверхвысоких частотах. Физматгиз, 1963.
49. Гущина З. М. [и др.]. Доклады III Всесоюзного совещания по физике и физико-химическим свойствам ферритов. Сб. «Ферриты». Изд. АН БССР, 1960.

#### Основные нормативные документы на магнитные материалы

1. ГОСТ 3836—47. Сталь низкоуглеродистая электротехническая тонколистовая. Срок введения 1/I 1948 г.
  2. ГОСТ 802—58. Сталь электротехническая тонколистовая. Срок введения 1/VII 1958 г.
  3. ГОСТ 9925—61. Лента холоднокатаная рулонная из электротехнической стали. Срок введения 1/I 1963 г.
  4. ГОСТ 10160—62. Сплавы железоникелевые с высокой магнитной проницаемостью. Срок введения 1/VII 1963 г.
  5. Ферриты. Каталог. Ленсовнархоз, 1962.
  6. ГОСТ 8763—58. Кольца из альсифера. Срок введения 1/I 1959 г.
  7. ГОСТ 6862—54. Сталь сортовая для постоянных магнитов. Срок введения 1/VII 1954 г.
  8. ГОСТ 9575—60. Магниты литые постоянные. Срок введения 1/VII 1961 г.
  9. ГОСТ 4402—48. Магниты литые постоянные (для авиационных магнетов и приборов). Срок введения 1/I 1949 г.
  10. Каталог завода «Электроконтакт» на металлокерамические и металлопластические магниты, 1961.
  11. Прейскурант № 01—01 на чугун и ферросплавы, 1960.
  12. Прейскурант № 01—03 на качественную сталь, 1960.
  13. Прейскурант № 25—01, оптовые цены на магнитные сплавы.
-

## О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие . . . . .	Стр. 3
Введение . . . . .	5
§ 1. Величины, характеризующие поведение тел в магнитном поле, и единицы измерения . . . . .	5
§ 2. Краткие сведения по теории ферромагнетизма . . . . .	8
§ 3. Ферримагнетизм и материалы типа ферритов . . . . .	16
§ 4. Кривые намагничивания. Петля гистерезиса . . . . .	21
§ 5. Влияние некоторых факторов на магнитные свойства . . . . .	29
§ 6. Общая классификация магнитных материалов . . . . .	35

*Глава I. Магнитномягкие материалы*

§ 7. Классификация магнитномягких материалов . . . . .	37
§ 8. Общие требования, предъявляемые к магнитномягким материалам . . . . .	40
§ 9. Технически чистое железо . . . . .	42
§ 10. Электротехнические стали . . . . .	47
§ 11. Пермаллои . . . . .	64
§ 12. Некоторые технологические вопросы, связанные с применением электротехнических сталей и пермаллоев . . . . .	74
§ 13. Магнитномягкие ферриты . . . . .	79
§ 14. Общие вопросы технологии ферритов и получение магнитномягких ферритов . . . . .	93
§ 15. Магнитодиэлектрики . . . . .	101
§ 16. Прочие магнитномягкие материалы . . . . .	109

*Глава II. Магнитнотвердые материалы*

§ 17. Классификация магнитнотвердых материалов . . . . .	110
§ 18. Требования, предъявляемые к магнитнотвердым материалам . . . . .	112
§ 19. Стабильность постоянных магнитов . . . . .	115
§ 20. Намагничивание постоянных магнитов . . . . .	120
§ 21. Сплавы на основе системы Fe—Ni—Al. Свойства и технические характеристики . . . . .	124
§ 22. Технология изготовления литых магнитов и особенности их механической обработки . . . . .	136

§ 23. Магниты из порошков . . . . .	142
§ 24. Мартенситные стали . . . . .	152
§ 25. Прочие материалы для постоянных магнитов . . . . .	155

**Глава III. Магнитные материалы специального назначения**

§ 26. Магнитные материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ) . . . . .	158
§ 27. Ферриты для сверхвысоких частот (СВЧ) . . . . .	170
§ 28. Прочие магнитные материалы . . . . .	182

**Глава IV. Некоторые вопросы испытаний магнитных материалов**

§ 29. Общие вопросы магнитных измерений . . . . .	186
§ 30. Измерения свойств низкочастотных магнитномягких материалов . . . . .	199
§ 31. Измерения свойств высокочастотных магнитномягких материалов . . . . .	206
§ 32. Измерения свойств магнитнотвердых материалов . . . . .	212
§ 33. Измерения свойств материалов с ППГ . . . . .	218
§ 34. Измерения свойств ферритов для СВЧ . . . . .	224
Литература . . . . .	230

---

**Алексей Алексеевич Преображенский**

**МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Редактор *В. В. Данилова*

Художник *Л. М. Чернышев*

Технический редактор *С. В. Швецов*

Корректор *К. М. Ликоренко*

---

Т-08181 Сдано в набор 28/X—64 г. Подп. к печ. 10/VII—65 г.  
Формат 60×90<sup>1/16</sup> Объем 14,75 печ. л. 14,05 уч.-изд. л.  
Изд. № ОТ-133 Тираж 13 000 экз. Заказ 1856 Цена 68 коп.  
Сводный тематический план 1965 г. учебников для вузов  
и техникумов. Позиция 698

Москва, И-51, Неглинная ул., 29/14.

Издательство «Высшая школа»

---

Московская типография № 8 Главполиграфпрома  
Государственного комитета  
Совета Министров СССР по печати,  
Хохловский пер., 7.

88 K. 0. 1.