



## 2.2. О теории электромагнетизма и магнитных свойствах вещества

Вспомним основные этапы развития физического учения об электромагнетизме. Простейшие явления электричества и магнетизма были известны еще в древности, хотя вначале эти два природных явления казались совершенно независимыми. Даже такой ученый, как У. Гильберт, полностью разграничивал их в 1600 году. Он много сделал в области магнетизма, открыв земной магнетизм, существование двух магнитных полюсов и их неотделимость друг от друга. Позже, в XVII и XVIII вв., проводились многочисленные опыты с наэлектризованными с помощью трения телами, построены первые электрические машины трения. Было установлено, что существует два типа зарядов – положительные и отрицательные (+ и –), открыта электропроводность металлов, изобретен первый электрический конденсатор – Лейденская банка, которая позволила накапливать достаточно большие количества электрического заряда. Далее, Франклин высказал первую последовательную научную гипотезу об электрических явлениях в металлах, о природе их электропроводности. Он объяснил электрическую природу молнии в земной атмосфере, изобрел громоотвод.

Во второй половине XVIII века появились первые измерительные приборы – электроскопы и электрометры. Г. Кавендиш в 1773 году и Ш. Кулон в 1785 году экспериментально установили закон взаимодействия между точечными электрическими зарядами – закон Кулона. Кулон также определил взаимодействие между точечными полюсами магнитных спиц и ввел понятие магнитного заряда. Итальянские ученые Гальвани и Вольта исследовали «животное электричество», что в конце концов привело к изобретению гальванического элемента, который именовался «вольтовым столбом» – это был первый источник электрического тока. Русский ученый Петров в 1802 году построил гальванический элемент большой мощности и открыл явление *вольтовой дуги*. Дэви в Англии путем электролиза получил из водных растворов щелочей металлические щелочные химические элементы натрия и калия.



В 1826 году немецкий физик Ом сформулировал свой знаменитый закон, определяющий зависимость силы электрического тока от напряжения в электрической цепи, и ввел понятие электрического сопротивления, а Джоуль и Ленц независимо друг от друга вывели закон о выделении тепла в проводнике с током.

Но наиболее фундаментальное открытие в XIX веке, которое впервые со всей ясностью показало внутреннюю связь электричества и магнетизма, было сделано в 1820 году датским физиком Эрстедом, обнаружившим действие электрического тока на магнитную стрелку. Тем самым он показал, что вокруг проводника с электрическим током создается магнитное поле, как и в пространстве вокруг магнита. Тогда же французский физик А. Ампер установил свой закон взаимодействия электрических токов и впервые высказал идею, что свойства постоянных магнитов можно объяснить, если предположить, что в них циркулируют *молекулярные токи*. Таким образом, все магнитные явления свелись по существу к особому проявлению электрических токов, т.е. эффекту от движения электрических зарядов, а не от каких-то «магнитных зарядов». Открытия Эрстеда и Ампера можно считать рождением *единой науки электромагнетизма*, науки не о двух различных явлениях, а о едином явлении природы.

В 30-х и 40-х гг. XIX столетия большой вклад в развитие электромагнетизма внес знаменитый английский физик Майкл Фарадей, в своих исследованиях уже рассматривая электрические и магнитные явления с единой точки зрения. Он доказал, в дополнение к открытию Эрстеда, что не только электрический ток создает магнитное поле, но и переменный магнитный поток создает электрическое поле. Фарадей открыл явление *электромагнитной индукции*, которое состояло в появлении электродвижущей силы (ЭДС) индукции в проводящем электрическом контуре, помещенном либо в переменное магнитное поле, либо, если контур движется, в магнитное поле, при условии, что магнитный поток через площадь этого контура меняется по величине. Возникший электрический ток называется индукционным. Электродвижущая сила индукции в замкнутом электрическом контуре, согласно установленному Фарадеем в 1831 году закону, равна производной по времени  $t$  от магнитного потока  $\Phi$ , пронизывающего этот контур, т.е.

$$\text{ЭДС} = - (1/c)d\Phi/dt. \quad (2.1)$$



Здесь элементарный магнитный поток  $d\Phi$  равен произведению нормальной составляющей вектора магнитной индукции  $\mathbf{B}$  на элемент поверхности  $d\mathbf{S}$ :  $d\Phi = \mathbf{B}_{\parallel} d\mathbf{S}$ . Магнитный поток  $\Phi$  через конечную поверхность, охватываемую электрическим контуром, равен интегралу от этого произведения по всей поверхности  $\mathbf{S}$ :

$$\Phi = \int \mathbf{B}_{\parallel} d\mathbf{S}.$$

Знак минус в правой части уравнения (2.1) определяет направление индуцированного электрического тока в контуре в соответствии с правилом Ленца: направление наведенного индукционного тока всегда таково, что создаваемое им магнитное поле противоположно изменению магнитного поля, которое вызвало индукцию.

Электромагнитная индукция лежит в основе многих практических применений электромагнетизма: динамомашин и электрического мотора, преобразующих механическую энергию в электромагнитную и обратно, трансформаторов, изменяющих напряжение, и т.д. В 1837 году Фарадей открыл электрическую поляризацию в непроводящих телах – диэлектриках. В 1845 году им были обнаружены два типа магнитных свойств тел – *диамагнетизм* и *парамагнетизм*. В первом случае тела, называемые диамагнетиками, приобретают магнитный момент, отрицательный по отношению к внешнему магнитному полю, его создающему. Во втором случае тела, которые называли парамагнетиками, наоборот, приобретают положительный магнитный момент по отношению к намагничивающему полю.

Фарадей, по существу, дал понятие электрического и магнитного *полей*, а также представление об электрических и магнитных *силовых линиях* как линиях напряжения в эфире. В дальнейшем проводились исследования электромагнитных явлений Ф. Нейманом, У. Томсоном, В. Вебером, Ф. Кольраушем и другими. В них впервые в качестве универсального отношения электростатических единиц измерения к электромагнитным была введена величина  $c$ , которая потом оказалась равной скорости света, что указывало, как уже говорилось выше, на глубокую внутреннюю связь явлений электромагнетизма и света.

Свое дальнейшее развитие и, в известном смысле, завершение электродинамика получила в 1861–1873 гг. в зна-



менитых теоретических работах Дж. Максвелла, предложившим систему дифференциальных уравнений электромагнитного поля, названных его именем, с помощью которых можно было решать различные задачи электромагнетизма. Подчеркнем, что Максвелл, следуя Фарадею, рассматривал явления электромагнетизма как некую механическую форму движения в эфире.

Одним из важных следствий его уравнений явилось предсказание о существовании электромагнитных волн и их тождественности со светом. В работах Г. Герца в 1886–1889 гг. была на опыте доказана справедливость этого важного вывода теории Максвелла. Тем самым была доказана реальность электромагнитной теории Фарадея-Максвелла и ее объяснения природы световых волн как электромагнитной. Г. Маркони в Италии и А. Попов в России применили полученный вывод теории электромагнетизма на практике, изобретя беспроволочный телеграф – началась эра радиосвязи.

Подробнее остановимся на вопросе о том, что представляет собой *магнетизм* как один из важнейших элементов современной технической цивилизации человеческого общества. В связи с этим заметим, что магнитные свойства вещества присущи буквально всему, что окружает нас в природе, в технике и в домашнем обиходе. В природе мы встречаемся с магнетизмом, начиная с элементарных микрочастиц материи, обладающих магнитными свойствами (вспомним магнетон Бора!), и кончая безграничными космическими просторами, заполненными электромагнитным полем, одной из основных компонент которого является магнитное поле. В технике и науке огромное число аппаратов и машин не обходятся без существенного участия магнитных деталей.

Универсальность магнитных свойств движущейся материи, их тесная связь с внутренней атомной и субатомной структурой вещества и объясняет то большое место, которое магнетизм занял в современном естествознании и в общественной практике человеческого общества. Именно изучение магнитных свойств атомных и субатомных микрочастиц и их магнитных полей позволяет использовать данные свойства как источник информации о внутреннем строении и самих микрочастиц, и их коллективов – макроскопических тел. Кроме того, эта универсальность открыла большие возможности и для применения магнетизма в технике, во-первых, для создания технических магнитных материалов и, во-вторых,



для получения детальной информации о других немагнитных физико-химических свойствах тел, менее доступных для непосредственного изучения, что лежит в основе методов магнитноструктурного анализа, магнитной дефектоскопии и магнитных измерений.

Если задать любому человеку, знакомому с физикой лишь по школьному курсу, вопрос – что такое магнетизм? – то у него сразу возникнут в памяти картинки подковообразных магнитов, магнитной стрелки компаса, полосатые осадки очень мелких железных опилок, обрисовывающих силовые линии магнитной индукции у полюсов постоянных магнитов, правила правой и левой руки и тому подобное. Они далеко не исчерпывают такого сложного явления природы, каким является магнетизм, и не в состоянии помочь глубокому научному разъяснению этого интереснейшего и важнейшего явления, прочно утвердившемуся в современной человеческой цивилизации, особенно в эпоху научно-технической революции, произошедшей в начале XX века.

Чтобы лучше и нагляднее понять огромное значение, которое приобрел магнетизм в жизни человека, представим себе на мгновение, что материя потеряла напрочь свои магнитные свойства. Во всем мире была бы полностью парализована вся энергетика, поскольку вышли из строя все электрические генераторы и электромоторы, действие которых основано на использовании магнитных материалов и магнитных свойств вещества. Пропала бы вся проволочная электро-связь; замолкли бы телефоны, радиоприемники, не действовали телевизоры; остановились бы сразу электропоезда, трамваи, тепловозы, автомашины, т.е. практически вышел из строя весь транспорт; перестали работать компьютеры. Современная цивилизация замерла, и человечество было бы отброшено в своем развитии на сотни лет назад.

Приведем некоторые данные из теории магнетизма и некоторые яркие практические возможности его применения.

Остановимся на объяснении магнитных свойств *макромател*. Выше уже отмечалось, что большинство веществ по своим магнитным свойствам делится на диамагнетики и парамагнетики, слабо магнитные вещества. Магнетизм проявляется в них только тогда, когда на них действует внешнее магнитное поле. Их намагниченность или результирующий магнитный момент  $M$ , отнесенный или к единице объема ( $1 \text{ см}^3$ ) или к единице массы ( $1 \text{ г}$ ), который возникает при



этом, оказывается прямо пропорциональным величине напряженности магнитного поля  $H$ , т.е.

$$M = \chi H,$$

где коэффициент  $\chi$  называется магнитной восприимчивостью. У диамагнетиков она отрицательна ( $\chi < 0$ ), а у парамагнетиков – положительна ( $\chi > 0$ ). По величине восприимчивость слабо магнитных тел очень мала и лежит, как правило, в интервале  $10^{-4}$ – $10^{-6}$ . Лишь в редких случаях она может быть большей, например, в парамагнитном соединении  $\text{CoCl}_2$ ,  $\chi = 1,2$ , причем магнитная восприимчивость слабо зависит от магнитного поля, и то только в очень сильных магнитных полях.

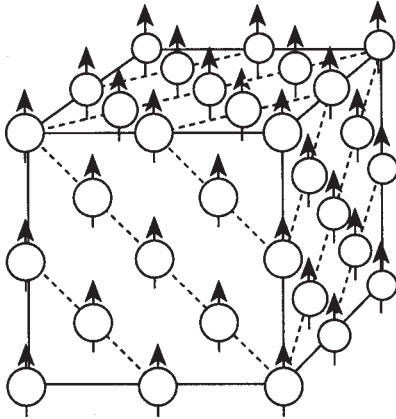
Наряду со слабыми магнетиками существует большой класс сильно магнитных веществ. Они имеют большое значение в науке и особенно стали незаменимыми в технике. К этой группе магнетиков в первую очередь относятся *ферромагнетики*: прежде всего три химических элемента из знакомых уже нам *3d* переходных металлов: железо, никель и кобальт (отсюда и название: железо по-латински – феррум). Ферромагнетиками являются также редкоземельные металлы: гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий и тулий, а также огромное число различных сплавов и соединений с участием указанных химических элементов и без их участия (так называемые Гейслеровы сплавы, например,  $\text{MnPt}_3$  или  $\text{AlCMn}_3$  и др.), и некоторые соединения циркония (например,  $\text{ZrZn}_2$  и др.) и актинидов (например,  $\text{UH}_3$  и др.).

Ферромагнетизм – магнитоупорядоченное атомное состояние вещества, когда все атомные носители магнитного момента оказываются ориентированными параллельно, т.е. обладают самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью. В железе, никеле, кобальте, гадолинии и множестве ферромагнитных сплавов и соединений этот спонтанный магнитный порядок оказывается *коллинеарным*, т.е. все атомные магнитные моменты взаимно параллельны и ориентированы вдоль одного направления, как показано на *рис. 48*. Но могут быть и неколлинеарные магнитоупорядоченные атомные магнитные структуры, например, спиральные или синусоидальные и т.п.

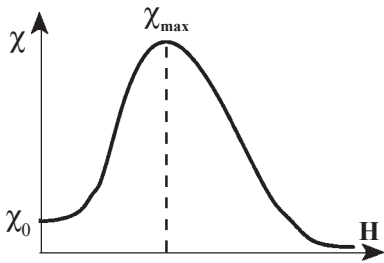
Магнитная восприимчивость ферромагнетиков положительна ( $\chi > 0$ ) и достигает значений порядка  $10^4$ – $10^5$  и, кроме того, сильно зависит от магнитного поля (*рис. 49*). При



нулевым магнитном поле  $H = 0$  мы имеем так называемую начальную восприимчивость  $\chi_0$ .



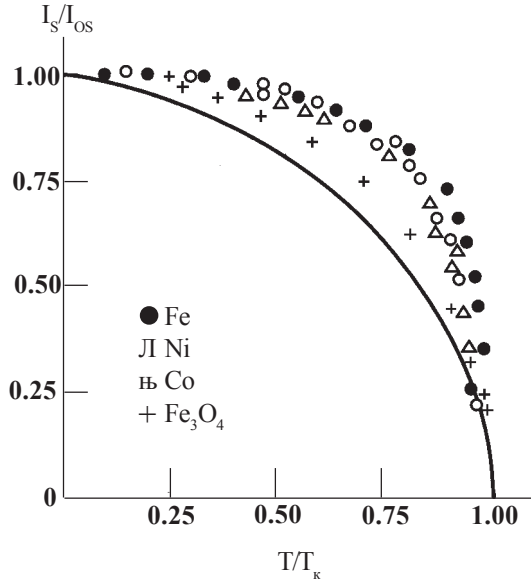
**Рис. 48.** Типичная картина атомной магнитной структуры ферромагнетика. Все атомные магнитные моменты (стрелки) взаимно параллельны и направлены в одну сторону (случай коллинеарной магнитной структуры).



**Рис. 49.** Зависимость магнитной восприимчивости типичного ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля  $H$ .

С увеличением поля восприимчивость растет, достигает максимума  $\chi_{max}$  и затем вновь падает, а при очень сильных полях она становится столь же незначительной, как и у слабых магнетиков. Типичные значения начальной и максимальной восприимчивостей, например, для железа равны соответственно:  $\chi_0 = 1100$  и  $\chi_{max} = 22000$ . Магнитная восприимчивость ферромагнетиков зависит также от температуры, имея резкий максимум вблизи точки Кюри  $T_k$  (закон Гопкинсона). Последняя отвечает той температуре, при которой спонтанная намагниченность  $I_s$ , вообще сильно зависящая от температуры (рис. 50), обращается в нуль.

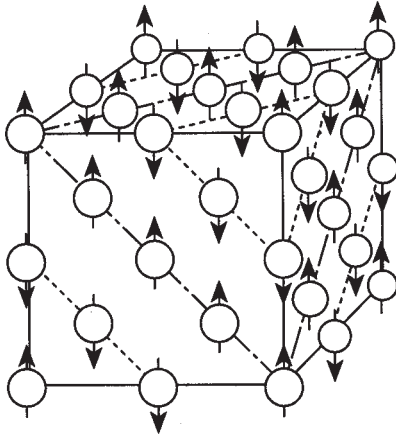
Выше точки Кюри ферромагнетик в большинстве случаев превращается в парамагнетик с температурной зависимостью магнитной проницаемости, подчиняющейся закону Кюри-Вейсса. Но в некоторых случаях, например, в ряде



**Рис. 50.** Температурная зависимость относительной величины  $I_S/I_{OS}$  самопроизвольной намагниченности. Жирная кривая – теоретическая, опытные точки даны для железа Fe, никеля Ni, кобальта Co и соединения  $Fe_3O_4$ .

ферромагнитных редкоземельных металлов выше  $T_K$  возникает другая магнитоупорядоченная магнитная структура, так называемый *антиферромагнетик*. Для такого магнитного упорядочения характерна не параллельная ориентация атомных магнитных моментов, которую мы имеем в ферромагнетиках, а состояние вещества, когда атомные магнитные моменты соседних узлов кристаллической решетки вещества ориентируются антипараллельно. Поэтому в целом намагниченность кристалла оказывается равной нулю.

На *рис. 51* показана типичная антиферромагнитная структура для двух коллинеарных эквивалентных магнитных подрешеток. Антиферромагнитный порядок также сильно зависит от температуры и пропадает при определенной температуре, которая, в отличие от точки Кюри ферромагнетиков, называется точкой Нееля  $T_N$ . Типичные значения для точки Нееля около 100 или несколько десятков градусов Кельвина. Например, у тербия  $T_N = 230$  К, у соединения  $CoSO_4$   $T_N = 18$  К и для  $NiO$   $T_N = 73,2$  К.



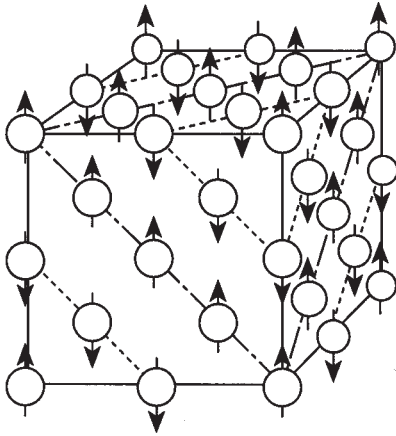
**Рис. 51.** Типичная картина атомной магнитной структуры антиферромагнетика. Атомные магнитные моменты (стрелки) образуют две магнитные подрешетки (штриховая и штрихпунктирная линии) с антипараллельными направлениями намагниченности – коллинеарная структура, случай полного компенсированного антиферромагнетизма

Заметим, что точки Кюри для типичных ферромагнетиков, как правило, – очень высокие температуры, например, для железа  $T_K = 1043$  К, для кобальта  $T_K = 1445$  К, для никеля  $T_K = 508,8$  К, но могут быть и низкие точки Кюри, например у тупия  $T_K = 25$  К.

Кроме ферромагнетизма и антиферромагнетизма, еще выделяют явление *ферримагнетизма*, которое наблюдается главным образом в так называемых *ферритах* – химических соединениях окиси железа  $Fe_2O_3$  с окислами других металлов.

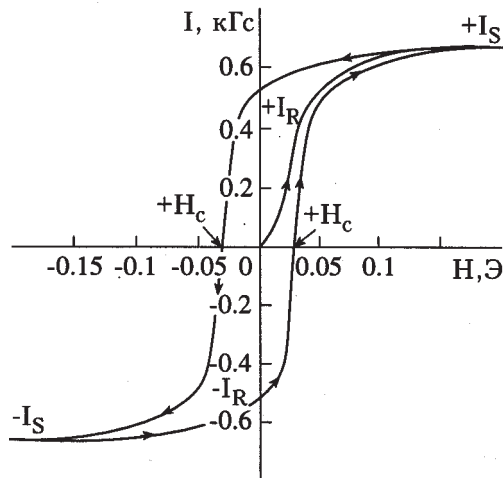
Ферримагнетизм – это магнитоупорядоченное состояние вещества, когда атомные носители магнетизма образуют две или более магнитные подрешетки со спонтанными магнитными моментами  $M_p$ , направленными навстречу друг другу, но не равными по абсолютной величине. Простейшая модель ферримагнитной упорядоченности вещества показана на рис. 52 для случая двух магнитных подрешеток с различными значениями атомных магнитных моментов. Для ферримагнетиков также существует точка Кюри, и это явление можно рассматривать как наиболее общий случай атомного магнитного порядка. В случае ферромагнетизма мы имеем одну магнитную подрешетку, а в случае антиферромагнетизма – полную компенсацию намагниченностей всех магнитных подрешеток.

Намагниченность  $I$  и магнитная индукция  $B = H + 4\pi I$  (в ед. CGS) растут с ростом поля  $H$  нелинейно (рис. 53) и в



**Рис. 52.** Типичная картина атомной магнитной структуры ферримагнетика. Атомные магнитные моменты (стрелки) образуют две различные магнитные подрешетки (штриховая и штрихпунктирная линии) с неравными, но противоположно направленными намагниченностями (стрелки, направленные вниз, длиннее, чем направленные вверх), случай коллинеарного ферримагнетизма.

полях порядка 100 Э и меньших достигают предельного значения магнитного насыщения  $I_S$  и предельного значения индукции насыщения  $B_S$ . Величина намагниченности как функции поля  $H$ , т.е.  $I(H)$ , зависит от «магнитной предыстории» образца, что делает зависимость намагниченности от поля



**Рис. 53.** Типичная зависимость намагниченности от внешнего магнитного поля – кривая намагниченности  $I(H)$  и петля гистерезиса мягкого магнитного материала (супермаллоя).  $I_S$  – намагниченность насыщения.  $I_R$  – остаточная намагниченность,  $H_c$  – коэрцитивная сила.



неоднозначной, т.е. имеет место *магнитный гистерезис* (петля гистерезиса изображена на графике *рис. 53*). При  $H = -H_C$  намагниченность обращается в нуль, такое обратное поле называется *коэрцитивной силой*. Намагниченность и индукция на петле гистерезиса при нулевом поле  $H=0$  называются соответственно *остаточной намагниченностью* и *остаточной индукцией* и обозначаются как  $I_R$  и  $B_R$ .

Необходимым условием появления любого магнитного порядка (независимого от наличия внешнего магнитного поля) является прежде всего наличие в веществе спиновых или орбитальных атомных магнитных моментов. При этом различают четыре основных случая:

1. Металлические кристаллы чистых металлов, сплавов или соединений на основе переходных химических элементов с недостроенными  $d$ -оболочками (в первую очередь,  $3d$ -оболочка металлов группы железа).

2. Редкоземельные металлы (РЗМ) и их сплавы с недостроенными  $4f$ -оболочками.

3. Неметаллические кристаллические соединения при наличии в числе их компонент хотя бы одного  $d$ - или  $f$ -химического элемента.

4. Сильно разбавленные растворы переходных  $d$ - или  $f$ -металлов в диамагнитной металлической матрице.

Во всех перечисленных случаях появление магнитного порядка обусловлено так называемым *обменным* взаимодействием.

В отсутствие внешнего магнитного поля ферромагнетик в целом, как правило, не имеет результирующей намагниченности даже при температурах ниже точки Кюри, когда спонтанная намагниченность отлична от нуля, что связано с требованием минимума энергии системы.

Ферромагнитный образец при  $T < T_K$  в нулевом внешнем магнитном поле спонтанно разбивается на малые, но все же макроскопические области, так называемые *ферромагнитные домены*, которые обладают спонтанной намагниченностью. Но векторы их намагниченностей по всему объему образца так распределены по направлениям, что их векторная сумма равна нулю, и весь образец оказывается размагниченным. Гипотеза спонтанного разбиения ферромагнетиков на домены была высказана еще в 1907 году французским физиком Пьером Вейссом, а ее теоретическое обоснование



дали в 1935 году советские физики Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц.

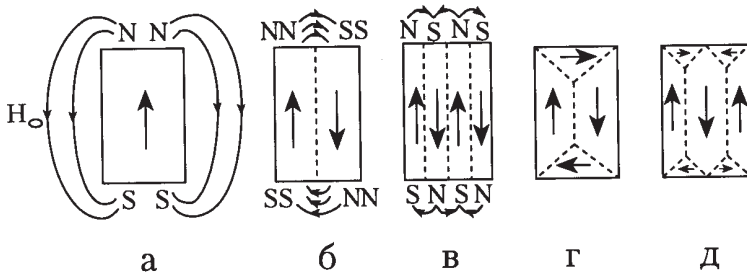
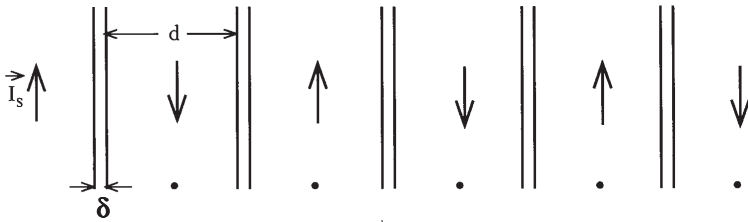


Рис. 54 а-д. Разбиение ферромагнитного образца на домены.

В простейшем случае доменная структура представляет собой чередующиеся слои с взаимно противоположными направлениями намагниченности. На рис. 54а показано, что при однородной результирующей спонтанной намагниченности образца вокруг него возникает магнитное поле, обладающее большой положительной энергией. Если разбить образец на домены (рис. 54 б, в), то чем их будет больше, тем слабее будет и магнитное поле вне образца, и, следовательно, тем меньше будет его энергия. Может возникнуть такая структура доменов (рис. 54 г, д), когда магнитный поток целиком замыкается внутри образца за счет появления *вторичной поверхностной структуры*, и вне образца магнитное поле практически исчезает, кроме очень небольших мест, где на поверхность выходят следы граничных слоев между доменами. Сам процесс образования ферромагнитных доменов есть результат конкуренции двух типов взаимодействия – обменного и магнитного. Первое – близкодействующее, оно стремится установить атомные магнитные моменты параллельно и потому ответственно за однородную спонтанную намагниченность доменов. Второе – магнитное взаимодействие – дальнедействующее, оно стремится расположить векторы спонтанной намагниченности домена так, чтобы в сумме магнитный момент образца был бы равен нулю (при отсутствии внешнего магнитного поля). Между доменами существуют *переходные слои* (границы или стенки) конечной толщины, в которых намагниченность непрерывно меняет свое направление – от направления в одном домене к направлению ее в соседнем (рис. 54е).

Размеры доменов (их толщина)  $d$  значительно больше толщины их граничных слоев  $\delta$  ( $d > \delta$ ). При некоторых критических малых размерах ферромагнитных образцов разбиение их на домены может становиться энергетически невыгодным, что происходит из-за положительной энергии, идущей на образование граничных слоев. Когда эта энергия становится сравнимой или даже большей, чем



**Рис. 54е.** Соотношение размеров ( $d$ ) ферромагнитных доменов и толщины слоев ( $\delta$ ) между ними.

энергия поля, возникающего в пространстве около спонтанно намагниченной малой ферромагнитной частицы, то такие мелкие ферромагнитные частицы оказываются при  $T < T_K$  однородно спонтанно намагниченными, т.е. находятся в так называемом *однодоменном* состоянии.

Кривые намагниченности и петли гистерезиса в ферромагнетиках определяются изменением объемов доменов с различной ориентацией в них спонтанной намагниченности, близкой к ориентации и далекой от ориентации внешнего намагничивающего магнитного поля. Такое изменение объемов доменов происходит за счет смещения граничных слоев между доменами. Кроме того, происходят и процессы вращения векторов спонтанной намагниченности в доменах, не совпадающих по ориентации с направлением вектора напряженности магнитного поля. Поэтому магнитную восприимчивость ферромагнетиков можно приближенно представить как сумму:

$$\chi = \chi_{\text{см}} + \chi_{\text{вр}},$$

где  $\chi_{\text{см}}$  ее часть, определяемая процессами смещения, а  $\chi_{\text{вр}}$  — процессами вращения. Опыт показывает, что  $\chi_{\text{см}} > \chi_{\text{вр}}$  в слабых полях, а в сильных полях после крутого подъема кривой  $I(H)$   $\chi_{\text{вр}} > \chi_{\text{см}}$ .

В ферромагнетиках, в особенности в ферромагнитных монокристаллах, резко проявляется явление *магнитной анизотропии* — неодинаковость магнитных свойств тел по различным направлениям кристалла. Причина магнитной анизотропии лежит в анизотропном характере магнитного взаимодействия между атомными носителями магнитного момента. Это явление в монокристаллических образцах ферромагнетиков проявляется в наличии кристаллических *осей легчайшего намагничивания*, т.е. осей симметрии кристалла, вдоль которых и ориентируются векторы спонтанной намагниченности в доменах. Теория кривых намагничивания в области процессов вращения в ферромагнитных монокристал-



лах количественно разработана, начиная с известных работ советского физика Н.С. Акулова.

За последнее время огромное значение приобрели *технические магнитные материалы* на основе ферромагнетиков – такие вещества, магнитные свойства которых обуславливают их широкое применение в электротехнике, автоматике, телемеханике, приборостроении (постоянные магниты, статоры и роторы электрических генераторов и электромоторов, детали запоминающих устройств и т.п.). Они разделяются на две большие группы: *магнитно-твердые* материалы и *магнитно-мягкие* материалы.

Первые из них (их также называют магнитно-жесткими или высококоэрцитивными) характеризуются высокими значениями коэрцитивной силы  $H_c$  (от десятков до несколько тысяч Эрстед), высокими значениями остаточной индукции  $B_R$  (порядка двух десятков тысяч Гаусс) и остаточной намагниченности  $I_R$  и, наконец, высокими значениями максимальной магнитной энергии на размагничивающем участке петли гистерезиса  $(BH)_{max}$ . Особенно большое распространение получили за последнее время сплавы РЗМ с переходными металлами группы железа и другими добавками, например, соединения  $Co$ ,  $Sm$  и другие. При нагреве до температур, близких к точке Кюри и выше, или резких механических нагрузках жесткий материал может потерять свои свойства, перейдя в устойчивое размагниченное состояние.

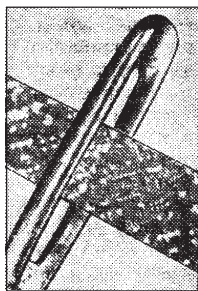
Магнитно-мягкие материалы характеризуются высокими значениями магнитной проницаемости. Начальная проницаемость  $\chi_0$  у них находится в интервале  $10^2$ – $10^5$ , а максимальная  $\chi_{max}$  в интервале  $10^5$ – $10^6$ . Коэрцитивная сила, напротив, очень мала и составляет всего лишь величины от  $10^{-2}$  до  $10^{-1}$  Э. Потери энергии на магнитный гистерезис тоже небольшие – от 10 до  $10^4$  эрг/см<sup>3</sup> за цикл перемагничивания. Наиболее распространенные магнитно-мягкие материалы изготавливаются на основе железоникелевого сплава – пермаллой, или железо-никель-кобальтового сплава – пермендюр. Особенно важным листовым магнитно-мягким материалом является сплав железа с кремнием (~3% Si) – это так называемая трансформаторная или динамная сталь. Ее годовое производство во всем мире составляет много миллионов тонн.

В современной технике используются разнообразные магнитные материалы с различными комплексами физико-

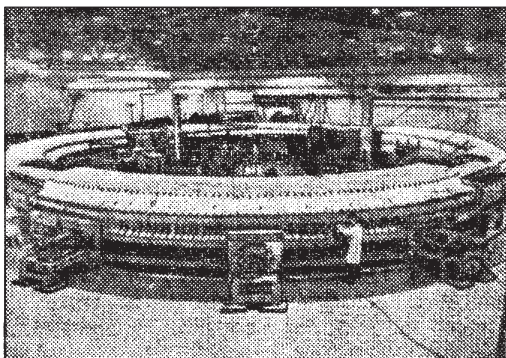


химических свойств, пригодные для решения самых разнообразных задач современной сложной техники. В качестве наглядной демонстрации диапазона такого разнообразия можно указать, что, например, значения коэрцитивных сил в уже используемых техникой магнитных материалах находятся в диапазоне от величин меньших  $10^{-3}$  Э до нескольких десятков и даже сотен тысяч Эрстед, а максимальные восприимчивости могут отличаться в  $10^6$  раз.

Наглядным примером широты диапазона в применении магнитных материалов может служить сравнение размеров магнитных деталей от самых малых до самых больших. Если мы возьмем миниатюрный магнитный узел в устройстве компьютера, то он может подобно тонкой нитке пройти через ушко обычной штопальной иголки, как это показано на *рис. 55а*. Используемые в современной магнитно-измерительной технике так называемые миниатюрные феррозондовые катушечки оказываются меньше спичечной головки (*рис. 56*). В то же время, как видно из *рис. 55б*, мы имеем дело с огромными магнитными системами, используемыми в ускорителях микрочастиц. Иногда их размеры сверхгигантские, достигающие, как это имеет место в упоминавшемся ускорителе микрочастиц *LEP*, трех десятков километров.



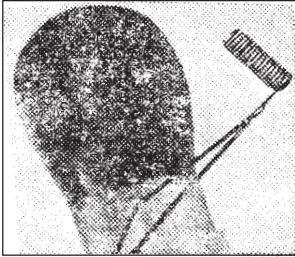
*а*



*б*

**Рис. 55 а.** Фотография, дающая наглядное представление о миниатюрности радиоэлектронных схем с использованием магнитных материалов.

**б.** Общий вид гигантского магнита-ускорителя микрочастиц в Брукхавене (США).



*Рис. 56. Сердечник феррозонда в сравнении с величиной спичечной головки.*

Ввиду того, что основная масса технических изделий (в первую очередь машиностроения) изготавливается из ферромагнитных материалов (железо и сталь), открывается широкая возможность для применения магнитного контроля качества их структуры, т.е. магнитно-структурного анализа. Заметим, что магнитный контроль не требует разрушения проверяемых изделий, он является ярким примером *неразрушающего метода контроля* структуры проверяемых изделий и поэтому может пригодиться для сплошного контроля всех выпускаемых деталей, а не для выборочного.

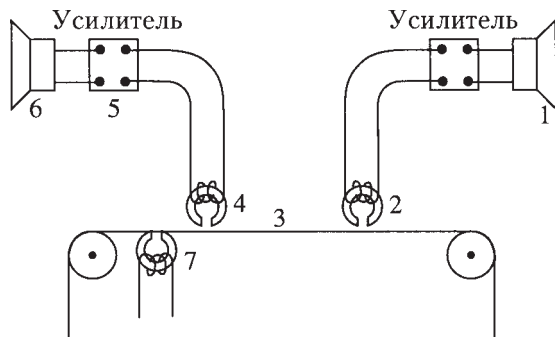
Магнитный метод измерений может быть широко использован для обнаружения различных дефектов в деталях различных ферромагнитных изделий, для так называемой *магнитной дефектоскопии*. В его основе лежит измерение магнитных полей рассеяния, которые возникают у поверхности проверяемого изделия благодаря изменению у дефектных мест образца магнитного поля, прикладываемого к нему, что позволяет определять не только наружные, но и внутренние дефекты в изделиях без их разрушения. Магнитная дефектоскопия приобрела весьма широкое и успешное распространение. Важно, что в ней для измерения часто весьма слабых полей рассеяния от дефектов используются точнейшие способы современной магнитной измерительной техники.

Весьма интересны технические применения магнетизма в акустике. Прежде всего следует упомянуть *метод магнитной записи* и *воспроизведения звука*, с чем знакомо большинство людей, поскольку не только в технике, но и в быту получили широкое распространение магнитофоны. В них используется остаточная намагниченность магнитно-жесткого материала с достаточно большой коэрцитивной силой. Запись звука, его воспроизводимость, а также стирание звука производится с помощью магнитных головок. Послед-



ние имеют вид тороидальных магнитов с очень тонким зазором для записи и воспроизведения звука и более широким зазором для стирания звука.

На *рис. 57* приведена схема установки магнитной звукозаписи. При записи в обмотку записывающей головки 2 поступает электрический звуковой сигнал частоты от микрофона 1. Магнитное поле, возникшее при этом в зазоре головки 2, замыкается через частицы ферромагнитного порошка в ленте 3, причем порошинки намагничиваются до состояния остаточной намагниченности различным образом в соответствии с записываемым звуком. Таким образом, записываемый сигнал сохраняется сколь угодно долго в виде остаточной намагниченности магнитного носителя в ленте.



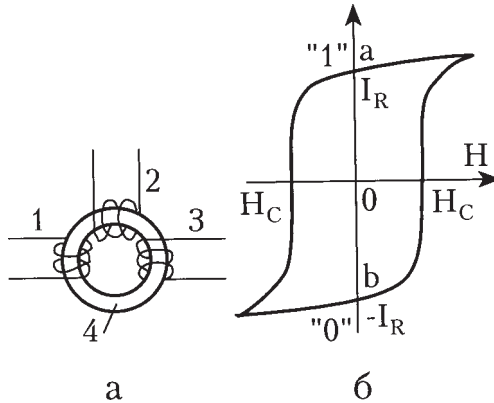
*Рис.57. Схема устройства для магнитной звукозаписи и воспроизведения звука.*

При воспроизведении звука магнитная лента движется мимо зазора у воспроизводящей магнитной головки 4. Магнитное поле узкого участка ленты замыкается через магнитопровод головки 4, возбуждая в нем магнитный поток, который повторяет в точности по форме ранее записанный звуковой сигнал с помощью головки 2. Индуцируемая при этом в обмотке головки 4 э.д.с. после усилителя 5 приводит в действие репродуктор 6. Если лента не подвергается каким-либо воздействиям, то запись сохраняется сколь угодно долго. Для подготовки ленты к новой записи ее помещают в убывающее по амплитуде переменное магнитное поле ультразвуковой частоты, создаваемое переменным током, поступающим в обмотку стирающей головки 7, что приводит к размагничиванию носителей записи и она стирается, лента



готова к новой записи. Такой метод звукозаписи, благодаря своей простоте и высокому качеству, используется очень широко.

В качестве другого примера приведем применение полупроводникового ферромагнитного материала (феррита с почти прямоугольной петлей гистерезиса) для *магнитного запоминающего устройства*. На *рис.58* изображены общая схема элемента памяти и его петля магнитного гистерезиса.



**Рис.58.** Схема ячейки запоминающего устройства на ферритовых магнитных сердечниках (колечках) и петля гистерезиса ферритмагнитного материала сердечника. Двоичная система: «1» – точка *a* и «0» – точка *b* на петле гистерезиса.

Если по выходной обмотке ферритового колечка 4 пропустить импульс электрического тока, то в нем создается остаточная намагниченность  $I_R$  (см. точку *a* на петле гистерезиса), так магнитный элемент «запоминает» полученный им сигнал. На колечке также нанесена обмотка 2 для считывания записанной информации. Если в обмотку поступает импульс тока такого направления, что колечко при этом перемагничивается, то в материале колечка создается остаточная намагниченность  $-I_R$ , соответствующая точке *b* на петле гистерезиса. Тогда в выходной обмотке 3 возникает сильный импульс тока за счет заметного изменения магнитного потока в ферритовом колечке при его перемагничивании. Если в считывающую обмотку кольца поступает импульс тока с магнитным полем, параллельным намагниченности колечка,



то изменение потока магнитной индукции в выходной обмотке практически не возникает. При считывании с любого элемента памяти получается только два ответа: да или нет, соответственно наличию или отсутствию импульса в выходной обмотке колечка, т.е. имеет место двоичная форма записи. Фактически в компьютерах содержится много колечек, но принцип работы у них такой же. Употребляются вместо колечек также ферритовые пластинки с множеством отверстий, через которые продернуты металлические провода. При пропускании по ним электрического тока происходит такая же запись по двоичной системе. В настоящее время в качестве магнитных элементов употребляют также тонкие ферромагнитные пленки.

Кроме мягких и высококоэрцитивных магнитных материалов, следует еще упомянуть о *магнитострикционных* материалах, из которых изготавливаются излучатели и приемники ультразвука и звука более низких частот. В этих устройствах используется явление *магнитострикции*, т.е. изменение размеров ферромагнитных тел при их намагничивании и размагничивании. Наряду с прямым магнитострикционным эффектом существует и *обратный* магнитострикционный эффект, который заключается в том, что если намагниченный ферромагнетик подвергнуть воздействию внешних напряжений, вызывающих механические деформации образца, то в нем будет происходить изменение его намагниченности.

Одним из наиболее важных применений прямого и обратного магнитострикционных эффектов являются так называемые *магнитострикционные преобразователи*. Основной частью такого преобразователя является магнитострикционный *вибратор*, в котором энергия переменного магнитного поля, создаваемого переменным электрическим током, преобразуется в энергию механических колебаний вибратора. Если же на сердечник вибратора действуют переменные механические напряжения, например, от ультразвуковых колебаний окружающей среды – воды или воздуха, то из-за изменения намагниченности сердечника, возникающего при этом, в обмотке вибратора индуцируется переменная э.д.с., и мы имеем дело с *приемником*. Наибольшее применение магнитострикционные преобразователи получили в качестве, например, эхолотов, предназначенных для определения глубин моря. Они также используются для обнаружения различных



тел на дне моря: затонувших судов, стай рыб и т.п. В электро- и радиотехнике широко используются магнитострикционные реле и фильтры, датчики механических напряжений или деформаций в деталях различных технических устройств – фермах мостов, подъемных кранов, различных деталей самолетов и т.п.

В последнее время на сцену вышел еще один класс магнитно-мягких материалов – *аморфные ферромагнетики*. Характерным признаком для них из-за беспорядоченного распределения атомов в пространстве, т.е. отсутствия кристаллической упорядоченной решетки, является отсутствие магнитной анизотропии. Опыт же показывает, что между магнитной анизотропией и мягкостью магнитного материала существует обратная связь, поэтому аморфные материалы – весьма хорошие кандидаты для создания мягких магнитных материалов.

Магнетизм также нашел интересные применения и в геологии, геофизике и горнодобывающей промышленности. Так, одним из эффективных методов поиска новых залежей железных руд является метод *магнитной разведки*. Из-за намагничивания железной рудной массы в недрах Земли, даже в слабом земном магнитном поле эта намагниченность накладывается на общее земное магнитное поле, в связи с чем у поверхности Земли над залежью железной руды возникает так называемая магнитная аномалия. Такая аномалия была обнаружена, например, еще в конце прошлого века вблизи Курска на одном из самых богатых разрабатываемых железнорудных месторождений в России. Теперь магнитная разведка железных руд ведется даже с самолетов и с искусственных спутников Земли.

В горном деле применяются *магнитные сепараторы*, которые используют для обогащения полезных ископаемых. В измельченной, добытой из рудника железосодержащей руде, наряду с ценным, т.е. содержащим железо компонентом имеется и пустая порода. Измельченная руда проходит через пространство с сильным магнитным полем, создаваемым каким-либо внешним источником – постоянными магнитами или электромагнитами, в котором и происходит отделение ценной компоненты от пустой породы.

Магнетизм также привел к рождению пограничной области знания между физикой магнитных явлений и геологией, так называемого *палеомагнетизма* или «древнего магнетиз-



ма», где изучается направление остаточной намагниченности в различных вулканических и осадочных породах земной коры. Дело в том, что при извержении вулканов лава, обладающая высокой температурой, выбрасывается в расплавленном состоянии. При ее охлаждении все находящиеся в ней ферромагнитные соединения проходят через точки Кюри. При этом даже в сравнительно слабом магнитном поле Земли они могут легко намагнититься, поскольку магнитная восприимчивость ферромагнетиков вблизи точки Кюри высока даже в очень слабых полях. Направление остаточной намагниченности, которая сохраняется сколь угодно долго, если не происходит повторного нагрева выше точки Кюри, сохранит «в консервированном виде» существовавшую во время и месте извержения ориентацию земного магнитного поля. Таким образом, по направлению остаточной намагниченности вулканических магнитных пород можно судить об ориентации земного магнитного поля в прошлые времена, т.е. составить для даты извержения вулкана соответствующую историческую геомагнитную картину.

Аналогичная ситуация имеет место и при осаждении осадочных пород земной коры, которые находятся в процессе осаждения в мелкодисперсном состоянии. Тонкий ферромагнитный порошок в этих породах находится в спонтанно намагниченном однодоменном состоянии. В процессе осаждения однодоменные частички под влиянием земного магнитного поля будут ориентироваться вдоль направления земного магнитного поля. Поэтому остаточная намагниченность осадочных пород также зафиксирует ориентацию земного магнитного поля, существовавшего в период интенсивного отложения пород. Возраст же горных пород, как осадочных, так и вулканических, можно определить из других геологических методов или с помощью радиоактивных измерений. С использованием палеомагнитных исследований удалось установить, что, например, северный магнитный полюс Земли за последние пятьсот лет совершил весьма солидное и сложное путешествие, двигаясь чуть ли не от самого экватора до своего современного «северного» местоположения.

В связи с проблемами физики магнитных явлений следует еще остановиться на вопросе получения и использования очень сильных и сверхсильных магнитных полей с напряженностями до десятков и сотен тысяч эрстед. Пионером в получении сильных магнитных полей с  $H$  до 500 кЭ был



русский физик академик П.Л. Капица, который тогда работал в Кембридже в лаборатории Э. Резерфорда. Для получения таких полей он использовал короткое замыкание электрического тока от большого генератора переменного тока на маленькую катушку из одного витка. Это замыкание длилось очень короткое время, равное одному полупериоду тока, что составляло несколько тысячных долей секунды.

Стационарные сильные магнитные поля можно прежде всего получать с помощью постоянных магнитов. Они могут создавать постоянные магнитные поля с напряженностями до 10–30 кЭ. Но здесь, к сожалению, возникают две большие технические трудности, связанные с огромной плотностью электрического тока, которая необходима для создания сверхсильных магнитных полей с помощью соленоидов.

Первой технической проблемой является проблема необходимого охлаждения магнитных соленоидов из-за огромного выделения тепла, в силу эффекта Джоуля-Ленца. Вторая трудность возникает из-за появления большой механической силы, которая действует между витками соленоида с электрическим током со стороны создаваемого ими сильного магнитного поля. При полях уже, например, в 250 кЭ давление достигает предела прочности меди, из которой обычно изготавливаются провода для обмотки соленоидов, и медная обмотка соленоида начинает растекаться, словно жидкость. Поэтому удержать соленоид от разрушения при попытке создать с его помощью магнитное поле с напряженностью в один миллион Эрстед не менее трудно, чем сохранить его от взрыва тринитротолуола. Поиски выхода из создавшегося положения привели к использованию в конструкции соленоидов вместо медных проводов проводов из сверхпроводящих материалов, в которых нет выделения тепла Джоуля-Ленца. Еще в 1911 году в Голландии Х. Камерлинг-Оннес обнаружил, что при температурах, близких к абсолютному нулю температур, некоторые металлы не оказывают сопротивления протекающему по ним электрическому току, для них тепло Джоуля-Ленца равно нулю. Однако это полезное свойство исчезало, если такое сверхпроводящее тело находилось в своем магнитном поле, созданном пропускаемым по нему электрическим током или внешнем магнитном поле даже сравнительно небольшой интенсивности порядка десятков и сотен Эрстед.



Только в 1960 году были открыты сверхпроводники, которые сохраняли свои сверхпроводящие свойства до действия на них магнитных полей с напряженностями до 100–200 кЭ, что позволило создавать без потерь энергии на преодоление электрического сопротивления стационарные магнитные поля с большими  $H$ . В настоящее время проводятся усиленные исследования по комплексному использованию медных и сверхпроводящих соленоидов, особенно в связи с открытием так называемых высокотемпературных сверхпроводников.

«Наступление» на проблему получения сильных магнитных полей в соленоидах с медной обмоткой в МИТ начал в 1936 году Биттер. Его специальный метод конструкции соленоидов с такой обмоткой позволил создать источники стационарных магнитных полей как у него в лаборатории МИТ, так и у других исследователей в США и других странах, с  $H$  до 400–500 кЭ.

Весьма интересным является еще один метод получения импульсных сверхсильных магнитных полей, который у нас в России был инициирован работами А.Д. Сахарова и его сотрудников. Он состоит в том, что внутри цилиндра создается, например, сильное импульсное магнитное поле, и в этот момент взрывают расположенную заранее вокруг цилиндра взрывчатку. Тогда поперечное сечение магнитного потока внутри цилиндра резко уменьшается, а напряженность магнитного поля соответственно резко увеличивается. Таким образом, удалось получить сверхсильные магнитные поля с напряженностями до 25 миллионов Эрстед и производить в них некоторые физические опыты. Главным недостатком данного метода, как и у всех импульсных методов, является его кратковременность. Укажем, что в Космосе самые огромные магнитные поля существуют на поверхности так называемых нейтронных звезд, где напряженности магнитных полей достигают тысяч миллиардов Эрстед, т.е.  $10^{13}$  Э. Однако нейтронные звезды или пульсары находятся слишком далеко от нас, поэтому изучение действия сверхсильных магнитных полей оказывается затруднительным.

В заключение можно с полным правом сказать, что магнетизм – это великое явление природы и его применения в практике человеческой цивилизации приобрели действительно огромное значение и необычайную широту.