

с напряженностью порядка миллиона эрстед; для этого ток в несколько десятков тысяч ампер пропускают через обмотку соленоида, но столь коротковременно, что обмотка не успевает перегореть.

Для научных исследований нередко применяют также электромагниты, которые имеют большую площадь и длину зазора между полюсами. Так, например, при исследовании космических лучей (т. III, глава XIII) в 1950—1952 гг. Физическим институтом Академии наук Армянской ССР был применен электромагнит, создававший однородное магнитное поле в 6000 эрстед протяженностью 80×20 см при длине зазора в 10 см.

Огромные электромагниты весом в тысячи тонн, потребляющие мощность в десятки тысяч киловатт, применяют для изучения атомно-ядерных процессов (т. III, глава XIV).

§ 63. Магнитные свойства веществ и их использование

Как упомянуто в § 57, все вещества по величине их магнитной проницаемости μ принято разделять на три группы, а именно, на вещества: *диамагнитные*, у которых μ меньше единицы, *парамагнитные*, у которых μ несколько больше единицы, и *ферромагнитные*, у которых μ велико и изменяется в зависимости от напряженности поля.

Возбуждение магнитных свойств в парамагнитных и ферромагнитных веществах при приближении к ним магнита или при помещении их в магнитное поле тока представляет собой явление, которое в некоторой мере сходно с поляризацией диэлектрика.

При приближении наэлектризованного тела к диэлектрику диэлектрик поляризуется; электрические диполи в диэлектрике обращаются к наэлектризованному телу зарядами противоположного знака, и поэтому диэлектрик в пустоте всегда притягивается наэлектризованным телом. При удалении влиявшего наэлектризованного тела поляризация исчезает.

Точно так же и магнитные свойства большинства тел почти исчезают, коль скоро устранена причина, вызывавшая их. Все

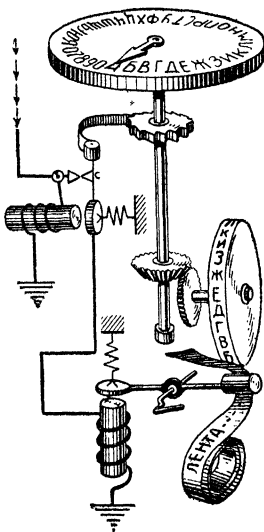
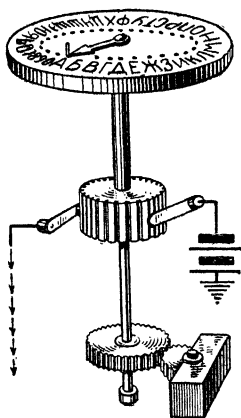


Рис. 238. Схема буквопечатающего телеграфного аппарата Якоби (вверху — передающий аппарат, внизу — принимающий).

эти тела, в той или иной мере намагничивающиеся в магнитном поле, размагничиваются при устранении поля.

Исключение составляют сталь, магнетит и некоторые специальные сплавы. Магнитные свойства стали, возбужденные магнитным полем, длительно сохраняются при удалении последнего. Сталь служит поэтому материалом для изготовления искусственных магнитов (в особенности хромовая, вольфрамовая и кобальтовая сталь).

Любое вещество, способное намагничиваться, представляют себе состоящим из бесчисленного множества молекулярных магнитов, которые размещены в беспорядке. Каждой молекуле этого вещества (железа, никеля и т. д.) приписывают, таким образом, свойства элементарного магнита.

Благодаря беспорядочному размещению молекулярных магнитов общее их действие равно нулю и вещество не намагничено. На эти молекулярные магниты действуют, во-первых, упругие силы, которые их удерживают в положении равновесия, и, во-вторых, сила, аналогичная трению,— *коэрцитивная* ¹⁾ (задерживающая) сила. Когда какое-либо вещество, способное намагничиваться, например железо, внесено в пространство, где действуют магнитные силы, внешние магнитные силы ориентируют молекулярные магнетики, железо поляризуется. После того как все молекулярные магниты уже установились в направлении внешних магнитных сил, дальнейшее увеличение поляризации становится невозможным, достигается состояние *магнитного насыщения*.

Если устранить действие внешних магнитных сил, вызвавших намагничивание, то упругие силы начинают поворачивать молекулярные магнетики в прежнее положение; однако вследствие параллельной ориентировки молекулярные магниты действуют друг на друга, и упругие силы уже не в состоянии вернуть их полностью в прежнее беспорядочное состояние; получается явление *остаточного магнетизма*. Ориентированное расположение молекулярных магнетиков является, в сущности, неустойчивым, но оно поддерживается коэрцитивной силой, о происхождении которой могут быть сделаны различные гипотезы.

С изложенной точки зрения, *вещество является тем более намагниченным, чем большая степень упорядоченности достигнута в расположении молекулярных магнитов*.

Каково бы ни было происхождение коэрцитивной силы, можно с уверенностью сказать, что тепловое движение молекул должно разрушать ориентацию молекулярных магнетиков. Действительно, опыт показывает, что при нагревании намагничивание ослабевает.

При сильном нагреве (железа до 770°, никеля до 358°C) вещество теряет способность к остаточному намагничиванию.

¹⁾ От лат. *coercitio*—у д е р ж и в а н и е.

Остаточная намагниченность уменьшается также при сотрясениях, так как сотрясения расстраивают ориентацию молекулярных магнитов. Но в процессе намагничивания те же сотрясения играют благоприятную роль, так как они ослабляют силу трения между элементарными магнетиками. Железный стержень в магнитном поле намагничивается сильнее, если слегка ударять по этому стержню молотком.

Заметим, что если мы хотим долго сохранять постоянные магниты намагниченными, то необходимо, прежде всего, охранять их от действия посторонних магнитных полей. Для этого их делают подковообразными и «закрывают» при хранении небольшим куском железа — якорем. Кроме того, необходимо охранять магниты от больших сотрясений и резких изменений температуры.

Так как по обобщенному закону Кулона сила взаимодействия магнитных полюсов обратно пропорциональна магнитной проницаемости среды, то очевидно, что в парамагнитной среде магнитные полюсы взаимодействуют с силой меньшей, чем в вакууме, а в диамагнитной среде, наоборот, с силой большей, чем в вакууме.

Увеличение силы взаимодействия магнитных полюсов в диамагнитной среде обуславливается тем, что диамагнитная среда намагничивается противоположно парамагнитной среде. Парамагнитное тело, помещенное между полюсами магнитов, намагничивается так, что вблизи положительного полюса магнита в парамагнитном теле появляется отрицательный полюс. Образовавшиеся разноименные полюсы притягиваются друг к другу, поэтому *парамагнитные тела всегда втягиваются в пространство между полюсами сильного магнита* (рис. 239). В противоположность этому диамагнитное тело, помещенное между полюсами магнита, намагничивается так, что близ каждого полюса магнита в диамагнитном теле образуются одноименные магнитные полюсы, поэтому *диамагнитное тело выталкивается из пространства между полюсами магнита* (рис. 240 и 241).

Вследствие намагничивания тело приобретает некоторый магнитный момент M_m , равный геометрической сумме магнитных моментов всех молекул тела. Магнитный момент, приходящийся на единицу объема намагниченного тела, называют *намагниченностью* и обозначают через I_m :

$$\frac{M_m}{v} = I_m,$$

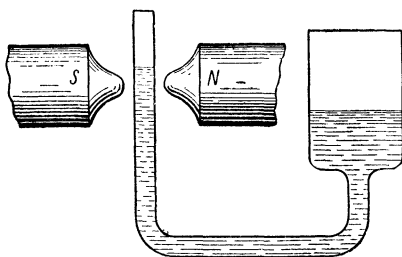


Рис. 239. Магнитные силы втягивают парамагнитную жидкость в пространство между полюсами магнита.

При однородности и изотропности вещества для стержня, параллелепипеда или цилиндра, имеющих длину l и намагниченных так, что их торцовые поверхности, имеющие площадь s , перпендикулярны к направлению поля, намагниченность, как нетрудно сообразить, равна

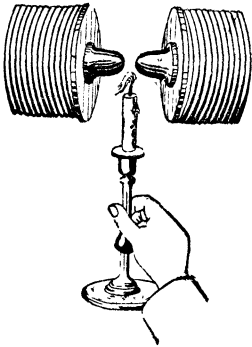


Рис. 240. Пламя выталкивается из пространства между полюсами магнита, так как газы, составляющие пламя, диамагнитны.

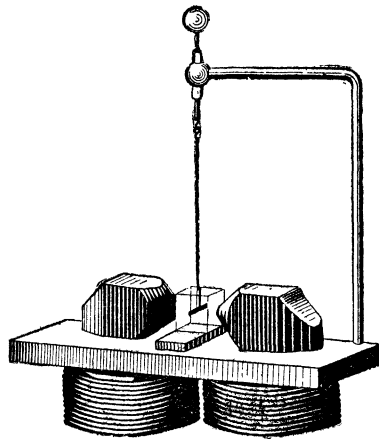


Рис. 241. Стержень, изготовленный из парамагнитного вещества, будучи подвешен между полюсами магнита, устанавливается вдоль прямой, проходящей через полюсы магнита; стержень из диамагнитного вещества устанавливается перпендикулярно к этой линии.

величине магнитных полюсов, вызванных магнитной поляризацией среды на каждом квадратном сантиметре торцовой поверхности:

$$I_m = \frac{m}{s}. \quad (26)$$

Действительно, в этом случае, если принять за магнитные полюсы торцовые поверхности и считать поле однородным, магнитный момент намагниченного тела $M_m = ml$, а объем тела $v = sl$, стало быть,

$$I_m = \frac{M_m}{v} = \frac{ml}{sl} = \frac{m}{s}$$

(рис. 242).

Податливость вещества намагничиванию определяется отношением намагниченности I_m к напряженности поля H , вызывающего намагничивание; это отношение называют *магнитной восприимчивостью* вещества и обозначают через χ_m :

$$I_m = \chi_m \cdot H. \quad (27)$$

Магнитная восприимчивость χ_m связана с магнитной проницаемостью μ уравнением, которое аналогично уравнению, определяющему связь электрической восприимчивости χ с электрической проницаемостью, т. е. с диэлектрической постоянной ϵ (§ 21).

Представим себе, что какое-либо вещество намагничивается током, пропущенным через соленоид. В вакууме магнитная индукция внутри соленоида была бы равна напряженности магнитного поля, создаваемого током: $B = H$. При наличии сердечника, имеющего μ , отличную от единицы, индукция будет $B = \mu H$, где H — та же

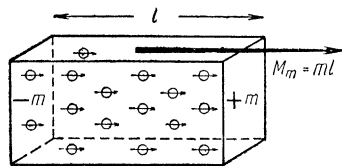
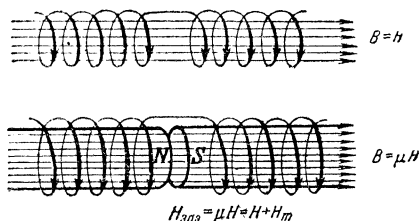


Рис. 242.

Рис. 243. К выводу уравнения $\mu = 1 + 4\pi\chi_m$.

самая напряженность поля, так как она согласно закону Био и Савара не зависит от свойств среды. Допустим, что в веществе, из которого изготовлен сердечник, имеется тонкий зазор, перпендикулярный к направлению поля (рис. 243). Напряженностью тока в этом зазоре и будет определяться новое значение магнитной индукции (при наличии сердечника и при прежней величине тока): $H_{\text{зая}} = \mu H$. Но напряженность поля в этом зазоре можно рассматривать как сумму напряженности H поля, создаваемого током, и напряженности H_m поля, вызванного намагничиванием сердечника:

$$H_{\text{зая}} = \mu H = H + H_m. \quad (28)$$

Поскольку зазор настолько тонок, что поле в нем может считаться однородным, напряженность поля, созданного магнитными полюсами m , которые представляют собой проявление магнитной поляризации сердечника, может быть вычислена по формуле (11) § 58:

$$H_m = 4\pi \frac{m}{s},$$

где s — площадь поперечного сечения сердечника.

А так как по сказанному выше $\frac{m}{s} = I_m$, где I_m — намагниченность сердечника, и, с другой стороны, $I_m = \chi_m H$, то, стало быть,

$$H_m = 4\pi\chi_m H,$$

и следовательно, уравнение (28) можно переписать так:

$$\mu H = H + 4\pi\chi_m H.$$

Сокращая все члены этого уравнения на H , получаем зависимость между χ_m и μ :

$$\mu = 1 + 4\pi\chi_m, \quad (29)$$

или

$$\chi_m = \frac{\mu - 1}{4\pi}. \quad (30)$$

Мы видим, таким образом, что магнитная восприимчивость χ_m парамагнитных и ферромагнитных веществ является положительной величиной, тогда как у диамагнитных веществ (для которых $\mu < 1$) магнитная восприимчивость χ_m является величиной отрицательной. Это означает, что в изотропных парамагнитных и ферромагнитных веществах элементарные (молекулярные) магниты располагаются при намагничивании в направлении поля, тогда как в диамагнитных веществах элементарные магниты располагаются при намагничивании противоположно направлению поля.

В монокристаллах магнитная восприимчивость, вообще говоря, не одинакова для различных направлений, и в связи с этим вектор намагниченности I_m может составлять тот или иной угол с вектором напряженности поля H .

П а р а м а г н и т н ы м и телами являются марганец, хром, платина, алюминий, растворы солей железа.

Наибольшей д и а м а г н и т н о с т ь ю обладает висмут. В меньшей мере диамагнитны цинк, свинец, медь, серебро, золото, сера, воск, смолы, большая часть солей, некоторые газы. Вода слабо диамагнитна.

Ниже приведены величины магнитной проницаемости для некоторых веществ.

Магнитная проницаемость некоторых веществ

Парамагнитные вещества	$\mu - 1$	Диамагнитные вещества	$1 - \mu$
Азот	$0,013 \cdot 10^{-6}$	Водород	$0,063 \cdot 10^{-6}$
Воздух	$0,38 \cdot 10^{-6}$	Бензол	$7,5 \cdot 10^{-6}$
Кислород	$1,9 \cdot 10^{-6}$	Вода	$9,0 \cdot 10^{-6}$
Эбонит	$14 \cdot 10^{-6}$	Медь	$10,3 \cdot 10^{-6}$
Алюминий	$23 \cdot 10^{-6}$	Стекло	$12,6 \cdot 10^{-6}$
Вольфрам	$176 \cdot 10^{-6}$	Кварц	$15,1 \cdot 10^{-6}$
Платина	$360 \cdot 10^{-6}$	Каменная соль	$12,6 \cdot 10^{-6}$
Жидкий кислород	$3400 \cdot 10^{-6}$	Висмут	$176 \cdot 10^{-6}$

Ф е р р о м а г н и т н ы е вещества, которые отличаются большими значениями магнитной проницаемости, обладают соответственно большей величиной магнитной восприимчивости. Помимо этого, характерной особенностью ферромагнитных веществ является непо-

стоянство величины μ : магнитная проницаемость ферромагнетика зависит от напряженности созданного в нем магнитного поля.

В качестве примера рассмотрим кривую, представленную на рис. 244. Здесь по оси абсцисс отложены значения напряженности магнитного поля внутри ферромагнетика, а по оси ординат — соответствующие значения магнитной проницаемости μ . Кривая относится к железу и показывает, что μ при слабых полях мало. Затем, по мере увеличения напряженности намагничивающего поля H величина μ также начинает возрастать, сначала медленно, а затем быстро, достигая максимума при напряженности намагничивающего поля около 2,5 эрстеда.

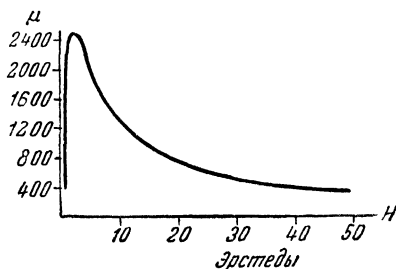


Рис 244. Зависимость магнитной проницаемости от напряженности поля для железа.

При дальнейшем увеличении напряженности μ снова уменьшается и при весьма сильных полях приближается к единице. Отсюда, между прочим, следует, что в случае очень сильных полей железо и другие ферромагнетики, применяемые в качестве сердечника электромагнита, утрачивают ту роль, которая была пояснена в предыдущем параграфе (поэтому в опытах по реализации рекордных полей железо не применяют).

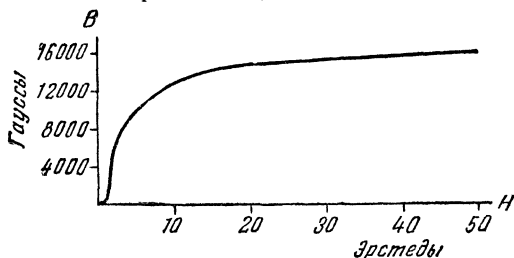


Рис. 245. Зависимость магнитной индукции от напряженности поля для железа.

Вследствие зависимости проницаемости μ от H индукция B в случае ферромагнетика уже не является величиной, прямо пропорциональной напряженности поля. Несмотря на то, что мы, как всегда, имеем право написать в данном случае соотношение $B = \mu H$, надо твердо помнить, что здесь само μ зависит от H . Каждому значению H будет соответствовать особое значение μ .

Воспользовавшись данными относительно зависимости μ от H , т. е. кривой рис. 244, нетрудно установить зависимость B от H . На рис. 245 представлена получающаяся при этом кривая (ординаты

точек этой кривой получены путем перемножения значений μ и H кривой рис. 244). На рис. 246 приведены зависимости B от H для различных ферромагнетиков.

Характерные черты магнитных свойств ферромагнетиков впервые экспериментально выяснены выдающимся русским физиком Александром Григорьевичем Столетовым (1872 г.). А. Г. Столетов показал, что при увеличении напряженности поля намагниченность I_m железа сначала возрастает весьма быстро, потом всё медленнее, постепенно

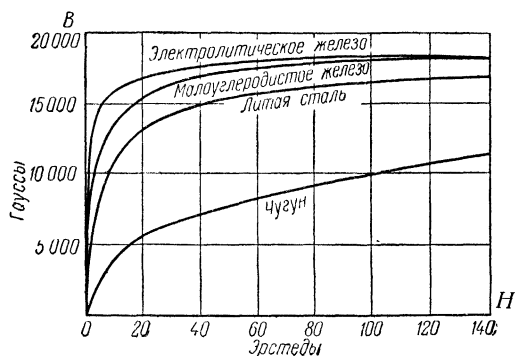


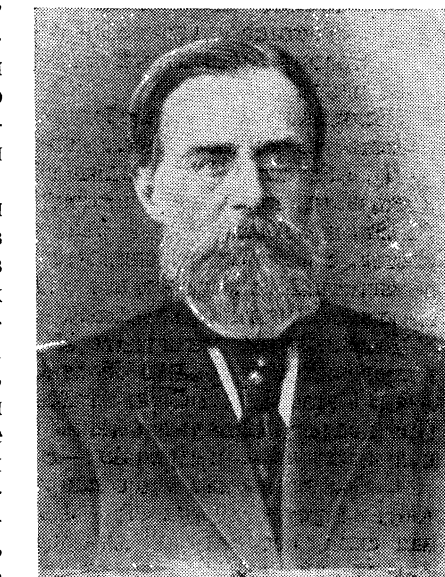
Рис 246. Зависимость индукции от напряженности поля в железе, стали и чугуне.

приближаясь к предельной величине I_s намагниченности насыщения. Так, из рис. 246 можно видеть, что при увеличении напряженности намагничивающего поля от 0 до 80 эрстед магнитная индукция в электролитическом железе возрастает от 0 почти до 19 000 гс; при увеличении напряженности поля до 200 эрстед магнитная индукция в железе приближается к величине 21 600, которая соответствует намагниченности насыщения и которую поэтому условно называют максимальной индукцией. Для железа намагниченность насыщения $I_s \approx 1700$ и $B_{\text{макс}} = 21600$ гс. Поскольку намагниченность насыщения достигается для большинства материалов при относительно небольшой напряженности намагничивающего поля, то $B_{\text{макс}} = 4\pi I_s$. Рассматривая магнитную индукцию как произведение μH , можно сказать, что при дальнейшем увеличении напряженности магнитного поля возрастание H почти компенсируется уменьшением магнитной проницаемости. Но так как $B = H + 4\pi I_m$, то в очень сильных полях при намагниченности, достигшей насыщения (когда $I_m = I_s = \text{const}$), магнитная индукция возрастает линейно в соответствии с ростом напряженности поля. Так, для железа при $H = 25000$ эрстед $B \approx 46000$ гс, а при $H = 50000$ эрстед $B \approx 72500$ гс.

А. Г. Столетов обнаружил, что особенности ферромагнетиков не исчерпываются поясненной выше зависимостью μ и B от напряжен-

ности намагничивающего поля. Помимо этого, как показал А. Г. Столетов, на значение μ оказывают влияние также и предварительные намагничивания, которым ранее подвергался ферромагнетик. Таким образом, μ или B являются не только функцией от H , но также зависят и от предшествовавшего магнитного состояния ферромагнетика.

Чтобы познакомиться с этим явлением, представим себе, что в соленоид вложен стержень из ферромагнетика. Пропустив ток через обмотку соленоида и увеличивая постепенно его силу, а следовательно, и напряженность намагничивающего поля H , мы вызовем постепенное возрастание индукции в сердечнике. Если ферромагнетик ранее не подвергался намагничиванию, то кривая, выражающая зависимость B от H , будет носить название основной кривой намагничивания. Она будет иметь вид, подобный тем кривым, которые изображены на рис. 246. На рис. 247 OD представляет собой эту кривую. Дойдя до точки D , мы будем иметь индукцию $B_{\text{макс}}$, представляющую наибольшее значение индукции при данном поле $H_{\text{макс}}$.



Александр Григорьевич Столетов
(1839—1896)

Если вслед за этим начать ослаблять намагничивающее поле H , уменьшая силу тока в обмотке, то B , разумеется, начнет также уменьшаться. Однако это уменьшение B происходит с отставанием от основной кривой намагничивания. Точки при уменьшении B уже не ложатся на кривую OD , а размещаются по кривой DB_r , лежащей выше OD . Это отставание носит название *гистерезиса*.

Очевидно, гистерезис обусловлен тем, что ферромагнетики обладают способностью сохранять в себе остаточное намагничивание, несмотря на то, что поле, которым оно было создано, уменьшилось.

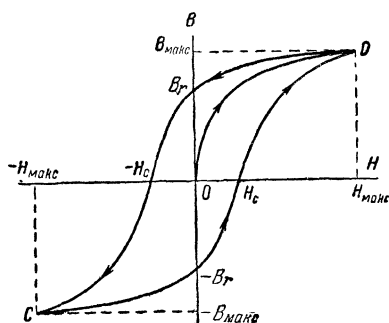


Рис. 247. Петля гистерезиса

Очевидно, гистерезис обусловлен тем, что ферромагнетики обладают способностью сохранять в себе остаточное намагничивание, несмотря на то, что поле, которым оно было создано, уменьшилось.

Если напряженность намагничивающего поля уменьшится до нуля, то, как показывает рис. 247, кривая DB_r придет в точку B_r . Это означает, что при исчезновении намагничивающего поля в ферромагнетике сохраняется *остаточная индукция*, равная B_r .

Устранить остаточный магнетизм, т. е. B_r , можно полем обратного направления.

Если напряженность обратного поля — H будет постепенно возрастать, то кривая размагничивания из точки B_r пойдет к точке — H_c . Абсцисса — H_c , таким образом, представляет ту напряженность поля, при помощи которой уничтожается остаточная индукция B_r . Эта напряженность H_c является, следовательно, мерой той «прочности», с которой удерживается остаточное намагничивание в ферромагнетике. Вследствие этого величину H_c принято называть *задерживающей*, или *коэрцитивной, силой*.

Дальнейшее увеличение H в отрицательную сторону вызовет в сердечнике индукцию обратного направления, причем возрастание B в этом случае будет идти по кривой — $H_c C$, аналогичной DH_c . При последующем уменьшении H до нуля мы получим отрицательную остаточную индукцию — B_r .

Снова переменяя здесь направление тока и увеличивая его, мы пойдем по отрезку кривой — $B_r H_c$, где H_c — опять-таки коэрцитивная сила, необходимая для уничтожения — B_r . При дальнейшем увеличении тока кривая от точки H_c пойдет вверх и замкнется в точке D .

Описанный круговой процесс называется *гистерезисным циклом*, а изображающая его замкнутая кривая — *петлей гистерезиса*. Площадь, очерченная петлей гистерезиса, определяет рассеяние энергии в тепло при перемагничивании.

Если постепенно увеличивать амплитуду H намагничивающего и размагничивающего поля, то петля гистерезиса достигает некоторых предельных очертаний — *максимальной петли*, характерной для вещества; совокупность получаемых таким образом циклов называют *гнездом петель гистерезиса*. Термины «намагниченность насыщения» ($B_{\text{макс}}$) и «коэрцитивная сила» (H_c), поясняемые рассмотренным рис. 247, относятся, строго говоря, к максимальной петле гистерезиса.

Наиболее полной характеристикой различия свойств ферромагнетиков является форма максимальной гистерезисной петли. На рис. 248 представлены для сравнения петли установившегося режима мягкого железа и закаленной стали. Крутой ход намагничивания и размагничивания в мягком железе обусловлен, как нетрудно понять, малой величиной коэрцитивной силы H_c . Для химически чистого железа H_c не превышает 0,03 эрстеда. Наоборот, пологая петля стали имеет большие отрезки на оси абсцисс, что соответствует значительной коэрцитивной силе. Коэрцитивная сила для стали в высокой степени зависит от ее состава.

С другой стороны, следует отметить, что, несмотря на столь большое различие в «прочности намагничивания» железа и стали, их остаточный магнетизм отличается незначительно, причем у железа (вопреки распространенному убеждению) он больше, чем у стали. В этом нас убеждает сравнение отрезков на осях ординат на рис. 248.

При нагревании намагниченность насыщения ферромагнитного вещества уменьшается: предельная высота кривых индукции B в зависимости от напряженности намагничивающего поля H снижается (как это показано на рис. 249 для железа). При приближении к некоторой температуре θ , которая носит наз-

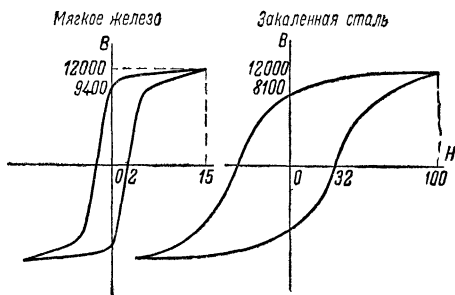


Рис. 248. Максимальные гистерезисные петли для железа и стали.

вание точки Кюри, намагниченность насыщения быстро падает. Выше этой температуры вещество утрачивает свои ферромагнитные свойства; оно становится парамагнитным и его магнитная восприимчивость определяется законом Кюри — Вейса:

$$\chi' = \frac{C}{T - \theta}, \quad (31)$$

где C — константа Кюри, θ — точка Кюри, а χ' — удельная магнитная восприимчивость (χ' в отличие от χ отнесено к единице массы, а не к единице объема).

Для железа точкой Кюри является температура 769°C ($\theta = 769 + 273 = 1042^\circ\text{K}$). При этой температуре изменяется кристаллическое строение железа: α -железо переходит в β -железо. На положение точки Кюри довольно сильное влияние оказывают примеси.

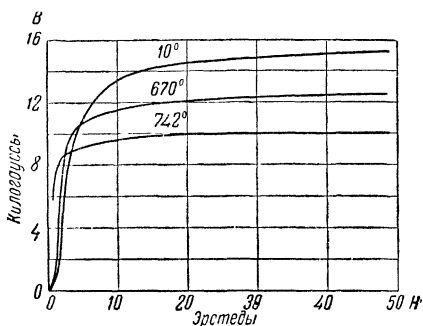


Рис. 249. Зависимость индукции в железе от намагничивающего поля при разных температурах.

Точки Кюри некоторых металлов

	θ , °C		θ , °C
Железо электролитическое	769	Магнетит	585
Железо весьма чистое, переплавленное в водороде	774	Сплав Гейслера (79% Cu, 14% Мп, 7% Al)	200
Кобальт	1140	Гадолиний	20
Никель	358		

Замечательным является тот факт, что многие сплавы обладают лучшими магнитными свойствами, чем чистые металлы. Высокими магнитными качествами обладают сплавы железа с никелем. Сплавы, содержащие 40—80% никеля, обнаруживают весьма малую величину потерь на гистерезис. Сплав, содержащий 78% никеля, так называемый пермаллой¹⁾, обладает исключительной способностью намагничиваться в самых слабых полях порядка сотых, даже тысячных долей гаусса (на рис. 250 сопоставлена магнитная проницаемость пермаллоя и чистого железа).

От материалов, применяемых для изготовления постоянных магнитов, требуются большие значения коэрцитивной силы H_c и остаточной индукции B_r (магнитная твердость). Этими свойствами обладают углеродистые и хромистые стали и, в особенности, стали с большим содержанием вольфрама и кобальта. В таблице на стр. 319 указаны значения коэрцитивной силы и остаточной индукции для некоторых материалов.

Материалы, применяемые в технике переменных токов, должны легко, без заметных гистерезисных потерь, подвергаться перемагничиванию. Поэтому они должны отличаться самой малой величиной коэрцитивной силы и в то же время большой величиной магнитного насыщения. Такие свойства называют магнитной мягкостью. Этими свойствами обладают чистое железо, железо с примесью кремния и некоторые специальные сплавы.

Как видно из приводимой таблицы, сплавы железа с никелем (пермаллой и гиперник) отличаются магнитной мягкостью и высоким значением магнитной проницаемости. Вместе с тем для чистого никеля $\mu_{\text{макс}} = 300$, $H_c = 7,5$ эрстеда и $B_r = 3400$ гс; для кобальта $\mu_{\text{макс}} = 175$, $H_c = 12$ эрстед и $B_r = 3000$ гс.

Указанный в таблице сплав кобальта, никеля и железа—перминвар—отличается тем, что его магнитная проницаемость при небольших напряженностях намагничивающего поля (до 3 эрстед) остается почти постоянной (сохраняя величину около 500), тогда как у многих других ферромагнетиков она в том же интервале изменяется в десятки, сотни и даже тысячи раз.

Полная картина намагничивания ферромагнитного тела определяется не только свойствами ферромагнитного вещества, но и формой тела. Здесь можно было бы повторить многое из того, что было сказано в § 20 о поляризации ди-

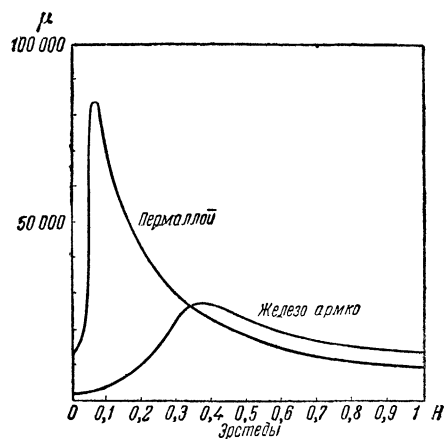


Рис. 250. Магнитная проницаемость пермаллоя и чистого железа.

¹⁾ От лат. permeare—проходить насквозь и англ. alloy—сплав.

Свойства магнитно-твердых материалов

	Коэрцитивная сила H_c в эрстедах	Остаточная индукция B_r в гауссах
Магнетит ($FeO \cdot Fe_2O_3$)	50	6 000
Углеродистая сталь (1% C)	40—60	9 000—7 000
Хромовая сталь (3% Cr, 1% C)	60—80	10 500—8 500
Вольфрамовая сталь (6% W, 1% C)	60—80	11 500—9 500
Кобальтовая сталь (15—30% Co, 5% W, 5% Cr, 1% Mo)	200—300	9 000—8 000
Никель-алюминиевая сталь (25% Ni, 12% Al)	700	5 000
Титаново-кобальтовая сталь (10% Ti, 30% Co)	900	7 000
Спрессованный материал из размельченного твердого раствора кобальтового феррита ($CoFe_2O_4$) в магнетите ($FeO \cdot Fe_2O_3$)	600	4 000

Свойства магнитно-мягких материалов

	Коэрцитивная сила H_c в эрстедах	Насыщенные B_{\max} в гауссах	μ_{\max}	Остаточная индукция B_r в гауссах
Весьма чистое железо после отжига в водороде	0,025	21 600	280 000	(2 000)
Мягкое железо	0,5	21 500	8 000	8 400
Трансформаторное кремнистое железо (1% Si)	0,7	25 000	10 000	15 000
То же (4% Si)	0,35	20 000	15 000	5 000
Углеродистое железо (0,1% C)	3,0	18 000	3 000	10 000
Чугун (3% C) отожженный	4,6	16 000	2 000	4 000
Пермаллой (78% Ni, 22% Fe)	0,06	10 000	80 000	5 000
Гиперник (50% Ni, 50% Fe)	0,05	11 000	70 000	6 000
Перминвар (45% Ni, 25% Co, 30% Fe)	1	16 000	2 000	4 000

электриков. Методы вычисления магнитного момента намагниченного тела и электрического момента поляризованного диэлектрика во многом сходны. Напряженность внешнего поля, в которое мы вносим ферромагнитное тело, уменьшается внутри ферромагнитного тела на величину, которую называют *обратным* (или *размагничивающим*) *полем*. В частности, для ферромагнитного шара (аналогично формуле, приведенной на стр. 87)

$$H_{\text{обр}} = \frac{4}{3} \pi I_m.$$

Вычисление обратного поля и учет его влияния на остаточную намагниченность тела (это влияние не одинаково для тел разной формы) во многих случаях представляется довольно сложной задачей. Выдающиеся по своему практическому значению теоретические и экспериментальные исследования в этой области (а также в области исследования магнитных свойств тел в знакопеременных полях

высокой частоты) были выполнены Владимиром Константиновичем Аркадьевым. Полученные им и другими учеными выводы освещены в обширной монографии В. К. Аркадьева «Электромагнитные процессы в металлах» (1934—1936 гг.).

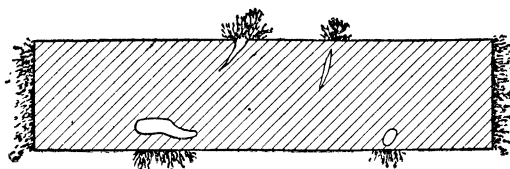


Рис. 251. Железные опилки притягиваются к намагниченному телу не только у полюсов, но и вблизи трещин и пустот.

Если внутри намагничиваемого тела имеются неоднородности, например вкрапления вещества с иным значением магнитной проницаемости, трещины, пустоты, то это существенно сказывается на той деформации внешнего намагничивающего поля, которая вызывается намагничиванием такого тела у его поверхности. Посыпая такое тело железными опилками и слегка встряхивая его, можно заметить, что опилки собираются не только у полюсов намагниченного

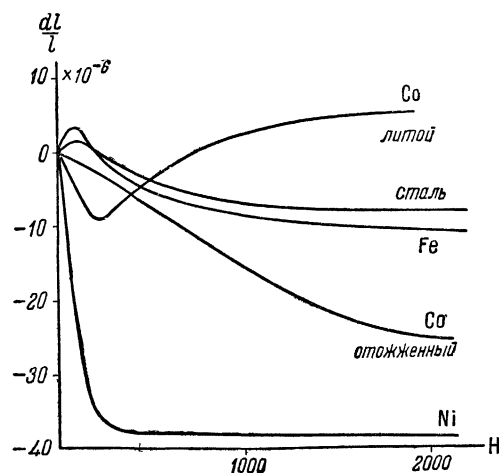


Рис. 252. Изменение длины при намагничивании (магнитострикция).

рельсов, в которых со временем образуются трещинки, способные привести к железнодорожной катастрофе, применяют магнитный дефектоскоп следующего устройства. По рельсам катится тележка с электромагнитами которые намагничивают некоторый участок рельса. Между полюсами электромагнитов помещено чувствительное реле; оно автоматически сигнализирует о наличии неоднородностей поля, вызываемых трещинками в рельсах. Аналогично устроены магнитные дефектоскопы для проверки на заводе некоторых серийно выпускаемых деталей машин.

При намагничивании происходит некоторое изменение размеров тела — магнитострикция. На рис. 252 показано относительное изменение длины стерж-

тела, но и в тех местах его поверхности, под которыми имеются трещины, пустоты или вкрапления постороннего вещества (рис. 251). Это обстоятельство было использовано рядом советских ученых, создавших так называемый порошковый метод магнитной дефектоскопии. Этот метод сейчас широко применяется для обнаружения невидимых глазом пороков в ответственных деталях машин, изготовляемых из железа и стали. Проверемое изделие намагничивают током и поливают керосином, в котором взвешены мельчайшие пылинки ферромагнетика.

На том же принципе выявления каким-либо способом неоднородностей магнитного поля, вызываемых пороками изделия, основаны и другие методы магнитной дефектоскопии. Так, например, для проверки состояния

ня из стали, железа, никеля и кобальта при увеличении напряженности намагничивающего поля от 0 до 2000 эрстед. Из этого рисунка видно, что наиболее сильная магнитострикция наблюдается у никеля: при напряженности намагничивающего поля порядка 250 эрстед длина никелевого стержня или пластины сокращается примерно на 3 тысячных доли процента. Такие небольшие

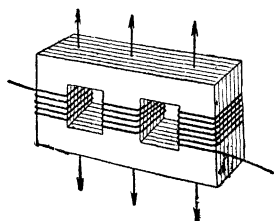


Рис. 253. Пакет никелевых пластин магнитострикционного излучателя.

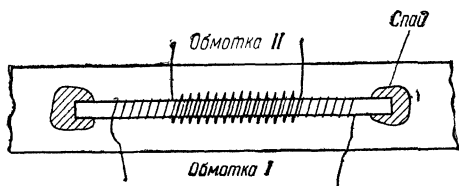


Рис. 254. Схема магнитного (пермаллового) тензометра.

изменения намагничиваемого тела оказались тем не менее достаточными для практического применения магнитострикции в излучателях ультразвуковых волн. На рис. 253 пояснена принципиальная схема *магнитострикционного ультразвукового излучателя*: переменный ток, производя частые перемагничивания пакета никелевых пластин, вызывает пульсирующее изменение их размеров, что и порождает в окружающей среде ультразвуковые волны. При этом увеличение амплитуды колебания продольных размеров никелевых пластин достигается резонансом между частотой намагничивающего тока и частотой собственных механических колебаний излучателя. Подобного рода излучатели используются, в частности, для измерения глубины дна по принципу эхолота (в этом случае их монтируют на днище корабля).

Следует отметить, что у некоторых ферромагнитных тел магнитная проницаемость существенно изменяется, когда тело растягивают или сжимают в пределах упругой деформации. Например, для железо-никелевых сплавов (с содержанием никеля 60—65%) относительное изменение магнитной восприимчивости $\frac{\Delta \chi_m}{\chi_m}$ в 200—300 раз превышает величину относительной упругой деформации $\frac{\Delta l}{l}$. На основе этого Н. С. Акулов

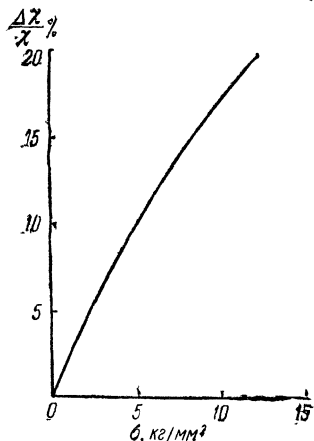


Рис. 255. Характеристика магнитного пермаллового тензометра.

разработал *магнитный метод измерения деформаций и упругих напряжений*. На рис. 254 показана схема магнитного тензометра, изготовленного из пермаллоевой полоски, концы которой припаивают или приклеивают к поверхности деформируемой детали. Полоска имеет две маленькие обмотки: одна из них питается током звуковой частоты, в другой индуцируется ток (§ 72), электродвижущую силу которого измеряют. Эта индуцированная электродвижущая сила зависит от потока магнитной индукции в полоске пермаллоя, а поток индукции в соответствии с величиной магнитной восприимчивости зависит от механического напряжения, которое растягивает тензометр (рис. 255).

Высокие магнитные свойства некоторых ферромагнетиков были использованы во второй мировой войне в *магнитных минах*. Магнитные мины, установленные на некоторой глубине, взрываются в момент, когда над миной, не касаясь ее, проходит корабль. Массивный металлический корпус корабля, намагничиваясь в магнитном поле Земли, создает на расстоянии 10—15 м поле напряженности в сотые доли эрстеда. Когда корабль проходит над миной, магнитное реле мины, реагируя на местное искажение магнитного поля Земли, вызываемое кораблем, замыкает цепь тока портативной батареи гальванических элементов, что приводит к взрыву запала, а вследствие детонации и к взрыву мины.

Чтобы обезопасить корабль от магнитных мин, в корпусе корабля прокладывают кабели в виде ряда витков обмотки и пропускают через них постоянный ток, размагничивающий металлические части корабля. Очистку фарватера от магнитных мин осуществляют специальные легкие суда, которые посредством кабелей («электромагнитных тралов») создают достаточно далеко за кормой сильное магнитное поле, вызывающее взрыв магнитных мин.

Разработка высококачественных ферромагнитных материалов позволила улучшить электрические машины и разнообразные приборы автоматической сигнализации и управления, увеличить дальность телеграфной и телефонной связи, повысить чувствительность многих измерительных приборов, в частности *приборов магнитной разведки руд*, усовершенствовать электроакустические аппараты, в том числе аппараты звукового кино, осуществить *магнитную запись звука* (§ 95) и т. д.

Свойства парамагнитных веществ при сверхнизких температурах используются в *магнитном методе глубокого охлаждения тел* (стр. 329).

§ 64. Электронная теория магнетизма

После того как Ампер высказал догадку, что никаких «магнитных зарядов» не существует и что намагничивание тел объясняется молекулярными круговыми токами (§§ 57 и 61), прошло почти сто лет, когда, наконец, это предположение было с полной убедительностью доказано прямыми экспериментами. Вопрос о природе магнетизма был решен опытами в области так называемых *магнетомеханических явлений*. Методы осуществления и расчета этих опытов были разработаны на основе развитых Резерфордом в 1911 г. и Бором в 1913 г. представлений о строении атомов (впрочем, некоторые близкие по замыслу эксперименты проводились и раньше, в частности Максвеллом, но безуспешно).

При исследовании явлений радиоактивности Резерфордом было установлено, что *электроны в атомах вращаются по замкнутым орбитам вокруг положительно заряженных ядер атомов*; Бор показал при теоретическом анализе спектров, что только некоторые из этих орбит устойчивы; наконец, вслед за этим (в 1925 г., также на основе анализа спектров) было обнаружено *вращение электронов вокруг своей оси*, как бы аналогичное суточному вращению Земли; совокупность этих данных привела к ясному пониманию природы амперовых круговых токов. Стало очевидным, что основными элементами магнетизма в веществах является: или вращение электронов вокруг ядер, или вращение электронов вокруг своей оси, или же оба эти вращения одновременно.