

Под ред. С.В.Вонсовского

Магнитные свойства металлов и сплавов

### **Единицы магнитных величин и магнитные свойства веществ**

В электромагнитных устройствах автоматики, вычислительной и измерительной техники воздействие на магнитный элемент производится либо магнитным полем тока, проходящего по проводнику или обмотке, либо непосредственно магнитным полем (например, в феррозондах). Это магнитное поле является внешним по отношению к магнитному сердечнику — основе электромагнитных элементов.

Прежде чем перейти к природе магнитных свойств вещества, напомним единицы магнитных величин в Международной системе единиц (СИ).

Внешнее магнитное поле линейного проводника с током  $I$  характеризуется напряженностью магнитного поля (А/м):

$$H = I / (2\pi r) ,$$

где  $r$  — расстояние от проводника до точки, в которой определяется напряженность.

Если ток проходит по обмотке с числом витков  $w$ , то он создает намагничивающую силу (н. с.) или магнитодвижущую силу (м. д. с.) (А):

$$F = Iw .$$

Если эта обмотка равномерно намотана на ферромагнитный сердечник с одинаковым сечением  $s$  по всей его длине  $l$  (например, на кольцевой сердечник), то напряженность магнитного поля в сердечнике

$$H = Iw / l .$$

Под действием н. с. в сердечниках магнитных элементов создается магнитный поток  $\Phi$ . Если магнитный поток  $\Phi$  проходит по сердечнику с обмоткой, имеющей  $\omega$  витков, то потокосцепление обмотки (Вб)

$$\Psi = \Phi\omega .$$

Наряду с напряженностью магнитное поле характеризуется магнитной индукцией  $B$  (Тл); определяемой для равномерного поля выражением

$$B = \Phi/s,$$

где  $s$  — площадь, через которую проходит магнитный поток.

Индуктивность (Гн)

$$L = \Psi/I.$$

Магнитная постоянная  $\mu_0$ , (магнитная проницаемость вакуума) представляет собой отношение магнитной индукции к напряженности магнитного поля в вакууме:

$$\mu_0 = B / H$$

и является физической константой, численно равной

$$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Вб}}{\text{м}^2} \cdot \frac{\text{м}}{\text{А}} \quad \text{или} \quad \frac{\text{Гн}}{\text{м}}.$$

Напряженность внешнего магнитного поля не зависит от свойств среды (от свойств вещества), где создается магнитный поток. Магнитная же индукция определяется как напряженностью, так и свойствами среды (вещества), характеризующимися относительной магнитной проницаемостью  $\mu$ , (или просто магнитной проницаемостью), которая показывает, во сколько раз проницаемость вещества больше или меньше проницаемости вакуума.

Магнитная индукция в среде (веществе)

$$B = \mu \mu_0 H, \tag{1}$$

где  $\mu \mu_0 = \mu_a$  — абсолютная магнитная проницаемость вещества.

По магнитным свойствам все вещества подразделяют на *диамагнетики*, *парамагнетики*, *ферромагнетики*, *антиферромагнетики* и *ферримагнетики*.

Чтобы понять магнитные свойства различных веществ, характеризующиеся значением  $\mu$ , и, в частности, материалов, которые применяют для изготовления сердечников электромагнитных элементов разных типов, необходимо знать строение атомов и кристаллов твердых тел.

Как известно, атом состоит из ядра и электронов, вращающихся вокруг ядра по орбитам. Круговой ток создает магнитный момент, ( $A \cdot m^2$ ), определяемый формулой

$$m = is ,$$

где  $i$  — сила тока,  $A$ ;  $s$  — площадь, обтекаемая током,  $m^2$ ; поэтому вращающийся по орбите электрон обладает некоторым *орбитальным магнитным моментом*. Кроме того, при движении по орбите каждый электрон обладает свойством, близким к свойствам заряженного тела, вращающегося вокруг своей оси. Это свойство называют спином электрона. Спин электрона, эквивалентный круговому току, обуславливает *спиновый магнитный момент*. Протоны и нейтроны, входящие в ядро атома, тоже имеют некоторые магнитные моменты, но в сотни раз меньше, чем электроны. Поэтому можно считать, что магнитные свойства атома определяются в основном магнитными свойствами его электронов (рис. 1, а). В случае нескольких электронов полный, или собственный, магнитный момент атома определяется векторной суммой орбитальных и спиновых моментов с учетом их направления.

Орбитальные и спиновые магнитные моменты могут иметь лишь одно из двух возможных направлений (согласное или противоположное). В том случае, если они направлены в противоположные стороны, магнитные моменты пары электронов взаимно компенсируются. Это имеет место в любой полностью заполненной оболочке, например у атома гелия, изображенного на рис. 1, б. Собственный магнитный момент такого атома в отсутствие внешнего поля равен нулю.

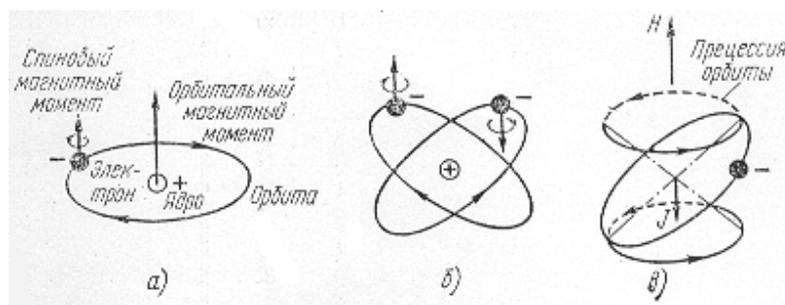


Рисунок 1 - Магнитные моменты электрона в атоме

Магнитный момент единицы объема вещества называют намагниченностью ( $A/m$ )

$$J = \sum m/V,$$

где  $\sum m$  — суммарный момент атомов, занимающих объем  $V$ .

Намагниченность можно рассматривать как напряженность, создаваемую микротоками электронных оболочек вещества. Поэтому индукцию в веществе можно представить как

$$B = \mu_0 (H + J). \quad (2)$$

Часто векторы  $H$  и  $J$  имеют одинаковое направление. При этом можно перейти к скалярному выражению и разделить обе части равенства (2) на  $H$ :

$$B/H = \mu_0 (1 + J/H). \quad (3)$$

Отношение  $J/H$  называют магнитной восприимчивостью  $\chi$  вещества, а из сравнения (1) и (3) следует, что

$$\mu = 1 + \chi.$$

Если на атом воздействует внешнее магнитное поле  $H$ , то возникает прецессия орбит электронов вокруг вектора этого поля. Прецессия орбиты, показанная на рис. 1, в пунктиром, эквивалентна некоторому дополнительному вращению электрона, которое вследствие его заряда, создает дополнительный магнитный момент. По правилу Ленца этот магнитный момент всегда направлен против внешнего поля и стремится ослабить его. Это явление называют диамагнетизмом; оно присуще атомам всех веществ.

У *диамагнитных веществ* вектор намагниченности направлен навстречу вектору напряженности поля (рис. 1, в), поэтому их магнитная восприимчивость отрицательна, а  $\mu < 1$ . Магнитная индукция в таких веществах меньше, чем в вакууме, при одной и той же напряженности внешнего поля  $H$ . Кроме инертных газов диамагнитны вода, некоторые металлы (медь, серебро, золото, ртуть, цинк, свинец, висмут) и многие органические соединения.

У *парамагнитных веществ* атомы обладают отличными от нуля собственными магнитными моментами, которые в отсутствие внешнего поля ориентированы равновероятно по всем направлениям; поэтому средний магнитный момент вещества равен нулю. При наложении внешнего поля возникают силы, которые преодолевают дезориентирующее действие теплового движения атомов и ориентируют магнитные моменты атомов по полю подобно магнитным стрелкам, помещенным во внешнее поле. Эта ориентация превышает диамагнитный эффект, создаваемый прецессией электронных орбит, в результате чего у парамагнетиков общая намагниченность *совпадает* с направлением внешнего поля. Магнитная восприимчивость парамагнетиков имеет положительное значение, а  $\mu > 1$ . К парамагнетикам относятся многие металлы (магний, кальций, алюминий, хром,

молибден, марганец) и соли железа, кобальта, никеля, редкоземельных элементов и др.

У диамагнетиков и парамагнетиков — слабомагнитных веществ — намагниченность невелика и является *наведенной* внешним полем намагниченностью, которая исчезает вместе с исчезновением этого поля.

*Ферромагнетики* — это сильномагнитные вещества, у которых относительная магнитная проницаемость  $\mu \gg 1$  и может достигать десятков и даже сотен тысяч. Из химически чистых элементов ферромагнитными свойствами обладают только девять: железо, никель, кобальт, гадолиний и при температурах значительно ниже  $0^\circ \text{C}$  пять редкоземельных элементов (эрбий, диспрозий, тулий, гольмий и тербий). Однако число ферромагнитных материалов очень велико, потому что к ферромагнитным материалам относятся сплавы самих ферромагнитных элементов и их сплавы с неферромагнитными элементами. Кроме того, известны ферромагнитные сплавы из неферромагнитных элементов.

Как уже отмечалось, собственный магнитный момент атома является суммой орбитальных и спиновых моментов электронов. Физические эксперименты показали, что *ферромагнитные свойства определяются именно нескомпенсированными спинами* электронов.

В атомах с достаточно большими порядковыми номерами электроны сгруппированы в электронные оболочки (слои). Максимальное число электронов в слое равно  $2n^2$ . В слоях имеются подслои: первый *s*, второй *p*, третий *d*, четвертый *f*, пятый *g*. Для каждого подслоя существует свое предельное число электронов, полностью заполняющих подслои, причем у заполненных слоев и подслоев как орбитальные, так и спиновые магнитные моменты взаимно скомпенсированы. По мере увеличения числа электронов в атоме происходит последовательное заполнение слоев и подслоев и лишь у ферромагнетиков эта последовательность нарушается.

На рис. 2, *a* изображены электронные слои (их номер обозначают цифрой) и подслои (*s*, *p*, *d*) в атоме железа. В скобках *около* каждого подслоя указано число электронов, необходимое для полного его заполнения. Например, подслои *3d* еще не заполнен (в нем шесть электронов, а для заполнения нужно десять) и в то же время началось заполнение следующего подслоя *4s*, который имеет два электрона. В незаполненном подслое пять электронов обладают положительным (правым) спином и лишь один — отрицательным (левым). Следовательно, атом железа имеет четыре нескомпенсированных спина. Подобное отсутствие компенсации спиновых моментов в одном из внутренних слоев электронной оболочки атома является необходимым условием ферромагнетизма.

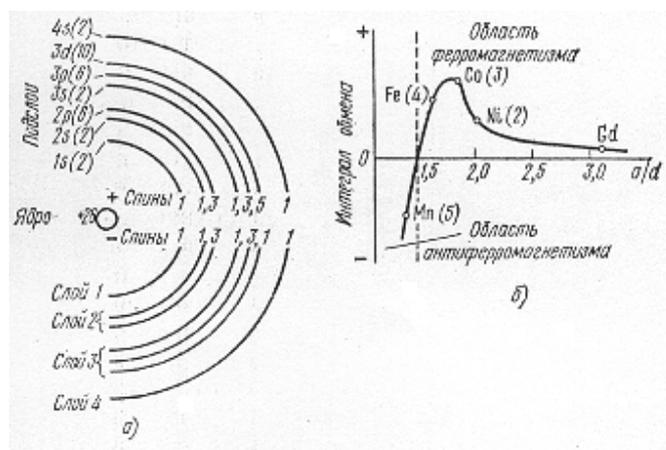


Рисунок 2 - Условия ферромагнетизма:

а - электронные слои и подслои атома железа

б - график зависимости интеграла обмена от отношения расстояния между атомами

а

к диаметру незаполненного слоя  $d$

Электроны внешнего (наружного) слоя являются валентными и при химических взаимодействиях различных элементов их магнитные моменты взаимно компенсируются даже в том случае, когда у отдельно рассматриваемого атома во внешнем слое имеются электроны с нескомпенсированными спинами.

Наличие нескомпенсированных спинов во внутренних слоях является необходимым, но недостаточным условием ферромагнетизма. Кроме того, изолированные друг от друга атомы таких веществ не проявляют ферромагнитных свойств. Эти свойства наблюдаются только в кристаллическом состоянии при *обменном* взаимодействии атомов в кристалле, когда электроны внутренних незаполненных слоев принадлежат одновременно и своим и соседним атомам. Такое взаимодействие характеризуется интегралом обмена, величина и знак которого в значительной степени зависят от относительного расстояния между атомами в кристаллической решетке.

При положительном значении этого интеграла обменное взаимодействие атомов приводит к *параллельной* ориентации нескомпенсированных спинов, обуславливающей спонтанную (т.е. самопроизвольную) намагниченность вещества  $J_s$ , которая характеризует его *ферромагнитные* свойства. Слово “спонтанная” подчеркивает, что эта намагниченность является следствием сил межатомного взаимодействия, а не появляется, как наведенная намагниченность у диа- и парамагнетиков, лишь в результате воздействия на вещество внешнего магнитного поля.

При отрицательном значении интеграла обмена нескомпенсированные спины электронов в незаполненных внутренних слоях соседних атомов самопроизвольно

устанавливаются *антипараллельно* и, таким образом, взаимно компенсируются, так что собственный магнитный момент вещества становится равным нулю и спонтанная намагниченность отсутствует. В этом состоит явление антиферромагнетизма.

Из рис. 2, б, где в скобках рядом с обозначениями элементов указаны числа нескомпенсированных спинов, видно, что железо, кобальт, никель и гадолиний обладают ферромагнитными свойствами; а марганец, несмотря на наличие пяти нескомпенсированных спинов, — антиферромагнетик. Границей областей ферромагнетизма и антиферромагнетизма является отношение расстояния между атомами  $a$  к диаметру незаполненного слоя  $d$ , равное 1,5. Этим объясняется, в частности, что марганец приобретает ферромагнитные свойства в сплавах с такими неферромагнитными элементами, как висмут, олово и др., атомы которых “раздвигают” решетку марганца, увеличивая расстояние между атомами.

При значении отношения  $a/d$ , большем нескольких единиц, область ферромагнетизма переходит по существу в область парамагнетизма.

Все ферромагнетики и антиферромагнетики — вещества кристаллические, причем кристаллическую решетку антиферромагнетика можно рассматривать как сложную решетку, состоящую из двух подрешеток, намагниченных противоположно (скомпенсированных). У некоторых веществ эта компенсация может оказаться неполной. Явление неполной компенсации магнитных моментов двух подрешеток, называемое ферримагнетизмом, приводит к тому, что в ферримагнетиках также возникает некоторая результирующая спонтанная намагниченность, которая, однако, заметно меньше спонтанной намагниченности ферромагнетиков, так как она представляет собой разность намагниченностей подрешеток.

По отношению к внешнему полю ферримагнетик подобен ферромагнетiku, т.е. его относительная магнитная проницаемость  $\mu \gg 1$  и может достигать нескольких тысяч. Поэтому ферримагнитные материалы — ферриты, состоящие из оксидов металлов, часто называют *неметаллическими ферромагнетиками*.

При повышении температуры вещества энергия теплового движения стремится разрушить состояние спонтанной намагниченности. При температуре, называемой точкой Кюри  $\Theta$ , энергия теплового движения становится достаточной для преодоления ориентирующего действия обменной энергии и вещество утрачивает ферромагнитные свойства, превращаясь в парамагнетик. Чем выше интеграл обмена ферромагнетика, тем выше точка Кюри. Для железа, кобальта, никеля и гадолиния точка Кюри равна соответственно 1043, 1400, 631 и 289 К, что хорошо согласуется с рис. 2, б.

При  $T = 0^\circ \text{C}$  энергия теплового движения равна нулю и спонтанная намагниченность принимает наибольшее возможное значение. На рис. 3, а, б, в показаны графики зависимости спонтанной намагниченности от температуры.

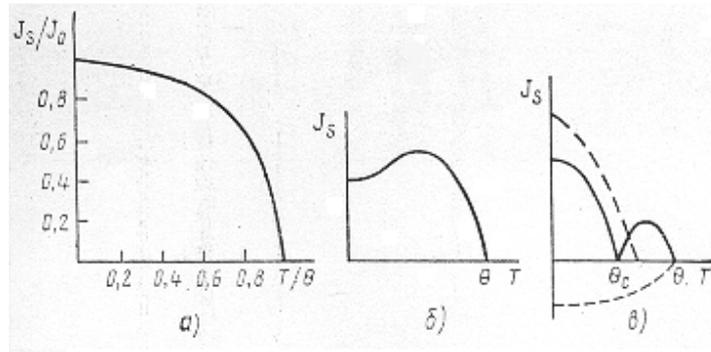


Рисунок 3 - Графики зависимости спонтанной намагниченности от температуры