

расширения. При адиабатич. намагничивании или размагничивании ферромагнетики изменяют свою темп-ру (см. *Магнитокалорический эффект, Магнитное охлаждение*). В ферромагн. монокристаллах наблюдается обычно резкая *магнитная анизотропия* (рис. 2). В поликристаллах с хао-

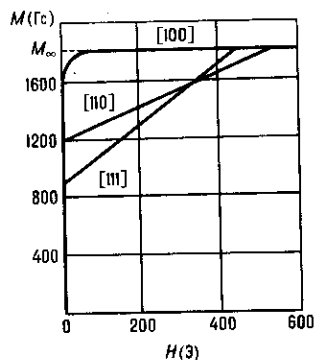


Рис. 2. Зависимость намагниченности M от магнитного поля для трёх главных кристаллографических осей монокристалла Fe (тип решётки — объёмноцентрированная кубическая, направление $[100]$ — ось лёгкого, $[110]$ — ось трудного и $[111]$ — ось труднейшего намагничивания).

тич. распределении ориентаций зёрен анизотропия в среднем по образцу отсутствует, но при однородном распределении этих ориентаций она может возникать (см. *Магнитная текстура*). В результате конкуренции обменного и магн. дипольного взаимодействий происходит разбиение конечного ферромагн. образца на *ферромагнитные домены* (см. также *Магнитная доменная структура*).

Магн. и др. физ. свойства (в т. ч. электрич., тепловые, гальваномагн., магнитооптические) ферромагнетиков обладают ярко выраженной зависимостью от темп-ры, особенно вблизи T_c . Спонтанная (при $H=0$) намагниченность M_s имеет максимум при 0 K и монотонно стремится к нулю при $T \rightarrow T_c$ (рис. 3). Выше T_c ферромагнетик переходит в парамагн. состояние, а в нек-рых случаях (ред-

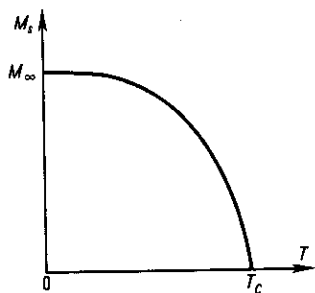


Рис. 3. Схематический ход температурной зависимости спонтанной намагниченности ферромагнетика: M_s — значение M_s в состоянии магнитного насыщения, T_c — точка Кюри.

коземельные металлы) — в антиферромагнитное, что представляет собой частный случай *магнитного фазового перехода 2-го рода*. *Магнитная проницаемость* (или магн. восприимчивость) ферромагнетиков имеет резко выраженный максимум вблизи T_c ; при $T > T_c$ уд. восприимчивость χ обычно следует *Кюри—Вейса закону*. В более общих случаях в ферромагнетиках могут происходить *ориентационные фазовые переходы*, при к-рых перестраивается *магнитная атомная структура* и изменяется *магнитная симметрия* ферромагнетика. Важный класс ферромагнетиков представляют собой *магнитные сверхпроводники*, в к-рых достигается сосуществование явлений Ф. и сверхпроводимости.

Классификация и основные модели ферромагнетиков. Необходимый признак Ф. вещества — наличие постоянных (не зависящих от внеш. магн. полей) магн. (спиновых или орбитальных, либо тех и других вместе) моментов электронных оболочек у составляющих его атомов (ионов) (Fe, Co, Ni и др.). Однако при конденсации магнитно-активных атомов (ионов) в кристалл или аморфное тело их электронные оболочки часто претерпевают такую деформацию, что кристалл или аморфное тело уже не обладает

в своих узлах пост. магн. моментами. Наиб. перестройке при конденсации подвергается самый наружный (валентный) слой электронной оболочки. Это обусловлено тем, что волновые ф-ции валентных электронов у соседних атомов в твёрдом теле сильно перекрываются, что приводит к коллективизации бывших валентных электронов. В случае *металлов* они при этом образуют *ферми-газ* (или *ферми-жидкость*) электронов проводимости, а в неметаллич. веществах — локализованные спин-насыщенные связи. В обоих случаях, как правило, для осн. состояния ($T=0$ K и $H=0$) намагниченность $M=0$. Если атомы, из к-рых построен образец, не относятся к переходным элементам, то электронная оболочка ионных остовов в соответствии с *Паули принципом* имеет замкнутый характер и обладает *диамагнетизмом*. Более детальные исследования с помощью *ядерного магнитного резонанса, Мёссбауэра эффекта* и ядерной теплоёмкости обнаружили на атомных ядрах (Fe, Co, Ni и др.) очень сильные магн. поля — до 10^5 — 10^6 Э, источником к-рых являются «деформированные» внутренние $1s$ -, $2s$ - и $3s$ -слои оболочки ионных остовов. Электроны проводимости, подмагниченные благодаря обменному взаимодействию с d - или f -слоями атомной оболочки, участвуют в спонтанной намагниченности ферромагнетика.

В случае, когда ферромагнетик построен из атомов переходных элементов, в нём возможно сохранение не зависящего от внеш. поля магн. момента. При этом можно различать 4 осн. типа веществ: 1) металлич. вещества (чистые металлы, сплавы и соединения) на основе переходных элементов с недостроенными d -слоями (прежде всего $3d$ -слоями у атомов группы Fe); 2) металлич. вещества на основе переходных f -элементов [в первую очередь редкоземельных (РЗМ) с недостроенным $4f$ -слоем]; 3) неметаллич. соединения при наличии хотя бы одного компонента из переходных d - или f -элементов; 4) сильно разбавленные растворы парамагн. ионов d - или f -элементов в диамагн. веществах. Появление во всех этих веществах атомного магн. порядка обусловлено *обменным взаимодействием* в магнетике. В неметаллич. веществах (тип 3) это взаимодействие носит косвенный характер (см. *Косвенное обменное взаимодействие*), при к-ром магн. порядок электронных магн. моментов недостроенных d - или f -слоев в ближайших соседних парамагн. ионах устанавливается при активном участии электронов внешних замкнутых слоёв магн.-нейтральных ионов (O^{2-} , S^{2-} , Se^{2-} и т. п.), расположенных между магнитно-активными ионами. В большинстве случаев здесь устанавливается антиферромагн. порядок, к-рый может привести либо к чистому *антиферромагнетизму*, если в каждой элементарной ячейке кристалла суммарный магн. момент всех ионов равен нулю, либо к *ферримагнетизму* или *слабому ферромагнетизму*, если он отличен от нуля. Есть такие случаи, когда взаимодействие и в неметаллич. веществах носит ферромагн. характер (все магн. моменты в ячейке параллельны). Общим для веществ типа 1, 2 и 4 является наличие в них системы ферми-частиц — коллективизированных (зонных) электронов проводимости. Эта система, хотя в ней существует подмагничивающая тенденция (обменные силы), как правило, не имеет магн. порядка и обладает парамагнетизмом Паули, если он не подавлен диамагнетизмом самих электронов проводимости или системы ионных остовов с замкнутыми оболочками. Парамагнетизм преобладает во всех непереходных металлах и большинстве переходных d -металлов (целиком группы Pd и Pt, а в группе Fe — у Sc, Ti и V).

Магн. порядок в металлич. веществах (тип 1, 2 и 4) различен по своему происхождению. Недостроенные $4f$ -слои ионов РЗМ-элементов (тип 2) имеют очень малый радиус по сравнению с параметром кристаллич. решётки, и поэтому волновые ф-ции этих электронов у соседних узлов в кристалле или у соседей в аморфном теле практически не перекрываются. Следовательно, в таких веществах невозможен сколько-нибудь существенный прямой обмен. Его также нельзя ожидать и между сильно удалёнными друг от друга парамагн. d - или f -ионами в сильно