



# ФЕРРОМАГНЕТИЗМ

Авторы: О. А. Котельникова

---

ФЕРРОМАГНЕТИЗМ (от *ферро...* и *магнетизм*), одно из магнитоупорядоченных состояний вещества, в котором большинство локальных магнитных моментов атомов (ионов) ориентированы параллельно друг другу за счёт обменного взаимодействия; в более широком смысле – совокупность свойств магнетика в этом состоянии. Вещества, в которых возникает ферромагнитное упорядочение, называют ферромагнетиками. К ферромагнетикам относятся как твёрдые кристаллич. и аморфные вещества, так и магнитные жидкости. Бесконечный изотропный ферромагнетик в отсутствие внешнего магнитного поля обладает самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью  $M_s$ . Необходимым условием существования Ф. является наличие отличных от нуля магнитных моментов электронных оболочек атомов или ионов. Как правило, это переходные (Fe, Co, Ni) и редкоземельные (Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm) металлы, содержащие атомы или ионы с недостроенными внутр. электронными оболочками, их сплавы друг с другом и нормальными металлами. Ответственным за ферромагнитное упорядочение магнитных моментов является положительное электростатич. *обменное взаимодействие*, имеющее квантовомеханич. природу (прямое или косвенное). В ферромагнитных металлах и сплавах *косвенное обменное взаимодействие* осуществляется через электроны проводимости (РККИ-обменное взаимодействие), в неметаллич. соединениях переходных и редкоземельных металлов – через электроны внешних замкнутых оболочек магнитно-нейтральных ионов, расположенных между магнитно-активными ионами.

Ф. наблюдается при темп-ре ниже *Кюри точки*  $T_C$ . Величина  $M_s$  максимальна при  $T=0$  К и монотонно уменьшается до нуля при  $T=T_C$ . При  $T>T_C$  ферромагнетик переходит в парамагнитное состояние, причём *магнитный фазовый переход*, как правило, является фазовым переходом 2-го рода. Могут наблюдаться и спин-

переориентационные магнитные фазовые переходы, при которых происходит изменение магнитной атомной структуры и магнитной симметрии ферромагнетика. Вблизи  $T_C$  на температурных зависимостях магнитной восприимчивости  $\chi = M/H$  и магнитной проницаемости  $\mu = B/H$  ( $H$  и  $B$  – соответственно напряжённость и индукция магнитного поля,  $M$  – модуль намагниченности ферромагнетика) наблюдают явно выраженный максимум, а также аномалии др. магнитных и немагнитных характеристик (напр., теплоёмкости, коэффициентов упругости и теплового расширения). При  $T > T_C$  магнитная восприимчивость ферромагнетиков обычно подчиняется [Кюри – Вейса закону](#).

В равновесном размагниченном состоянии ( $H=0$ ) ферромагнетик разбивается на магнитные [домены](#) – макроскопич. области, в которых реализуется параллельная ориентация магнитных моментов атомов вдоль одного направления, и эти направления различны для разл. доменов. Между доменами существуют переходные области (доменные стенки) конечной толщины, в которых вектор намагниченности  **$M$**  непрерывно меняет своё направление от ориентации в одном домене к ориентации в соседнем домене. В размагниченном состоянии суммарная намагниченность ферромагнетика, складывающаяся из намагниченностей доменов и доменных стенок, равна нулю. Вследствие разбиения ферромагнетика на домены зависимость его намагниченности от  $H$  (кривая намагничивания) имеет сложный нелинейный характер (см. [Намагничивание](#)). В слабых внешних полях намагничивание происходит сначала за счёт роста размеров энергетически выгодных доменов путём смещения доменных стенок (вначале обратимого), а с увеличением  $H$  к этому добавляется вращение векторов намагниченности внутри доменов. В слабых магнитных полях восприимчивость, связанная со смещением доменных границ, превышает восприимчивость, связанную с вращением векторов намагниченности внутри доменов, а в сильных – наоборот. Макс. магнитная восприимчивость ферромагнетиков может достигать значений  $10^4$ – $10^5$ . В полях напряжённостью  $10^2$ – $10^5$  А/м намагниченность достигает насыщения; при дальнейшем увеличении  $H$  рост  $M$  происходит за счёт парапроцесса и величина  $\chi$  становится малой, как в парамагнетиках (см. [Парамагнетизм](#)).

Кристаллич. ферромагнетики обладают магнитной анизотропией. Их кривые намагничивания и величина восприимчивости зависят от ориентации магнитного поля относительно осей кристалла. При намагничивании образца вдоль одной из осей лёгкого намагничивания намагничённость растёт очень быстро и может достигать насыщения в достаточно слабых полях. При намагничивании образца вдоль оси трудного намагничивания значение макс. восприимчивости может быть на несколько порядков меньше. В поликристаллич. образцах анизотропия в среднем по образцу может отсутствовать, но при наличии магнитной текстуры может оставаться. При достаточно малых размерах ферромагнетики могут не разбиваться на домены вследствие энергетич. невыгодности такого разбиения и оставаться однодоменными.

Для Ф. характерно наличие гистерезиса – ср. намагничённость зависит от магнитной предыстории образца, и связь между намагничённостью и внешним магнитным полем, темп-рой, давлением не является однозначной. Вследствие этого ферромагнитный образец может обладать отличной от нуля намагничённостью при  $H=0$  и использоваться в качестве постоянного магнита. Наличие в ферромагнетиках магнитоупругого взаимодействия может приводить к изменению размеров и формы образца при изменении намагничённости (магнитострикция), а также к зависимости вида кривых намагничивания и петель гистерезиса от внешних напряжений. При адиабатич. перемагничивании ферромагнитного образца изменяется его темп-ра (магнитокалорический эффект).

Для теоретич. описания Ф. используют два подхода – модели с локализованными на атомах или ионах носителями магнитного момента и модели коллективизированных носителей магнитного момента (см. Зонный магнетизм). В рамках приближения среднего поля – это модель молекулярного поля Вейса и модель Стонера. Первая из них лучше описывает свойства сплавов переходных d-металлов, вторая – свойства сплавов и соединений редкоземельных f-металлов.

Ферромагнетики широко применяют в разл. областях техники (см. Магнитные материалы, Магнитомягкие материалы, Магнитотвёрдые материалы).

## Литература

Лит.: Акулов Н. С. Ферромагнетизм. М.; Л., 1939; Вонсовский С. В. Магнетизм. М., 1971; Херд К. М. Многообразие видов магнитного упорядочения в твердых телах // Успехи физических наук. 1984. Т. 142. № 2.