

## Тема 5.1 «Физические процессы в магнитных материалах»

Любое вещество, помещенное в магнитное поле, приобретает некоторый магнитный момент  $M$ . Магнитный момент единицы объема вещества называют намагниченностью  $J_m$ .

Намагниченность является векторной величиной. Намагниченность связана с напряженностью магнитного.

Проявление магнетизма в веществе обусловлено процессами движения электронов, которые образуют круговые токи, обладающие магнитными моментами. Магнитный момент электрона складывается из орбитального магнитного момента (вследствие движения электрона вокруг ядра) и спинового момента (вследствие вращения электрона вокруг собственной оси).

По поведению в магнитном поле все материалы делятся на диамагнетики и парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики. Диамагнетики характеризуются очень малой отрицательной величиной магнитной восприимчивости, которая в большинстве случаев не зависит от температуры и напряженности поля. Диамагнетики выталкиваются из неоднородного магнитного поля. К диамагнетикам относятся инертные газы, водород, азот, многие жидкости (вода, нефть), ряд металлов (медь, серебро, золото, цинк, ртуть, галлий и др.), большинство полупроводников (кремний, германий, арсенид гелия), органические соединения, неорганические стекла и др., а также все вещества в сверхпроводящем состоянии.

Парамагнетики характеризуются малой положительной величиной магнитной восприимчивости, не зависящей от напряженности внешнего магнитного поля. В парамагнетиках атомы обладают собственным магнитным моментом даже в отсутствии внешнего магнитного поля, однако из-за теплового движения эти магнитные моменты распределены хаотично так, что намагниченность вещества в целом равна нулю. Внешнее магнитное поле вызывает преимущественную ориентацию магнитных моментов атомов в одном направлении. Тепловая энергия противодействует созданию магнитной упорядоченности. Поэтому магнитная восприимчивость сильно зависит от температуры. Парамагнетики втягиваются в неоднородное магнитное поле. К парамагнетикам относятся: кислород, окись азота, соли железа, никеля, кобальта, щелочные металлы, алюминий, платина.

Ферромагнетики обладают большими положительными значениями магнитной восприимчивости (до сотен тысяч и миллионов) и ее сложной нелинейной зависимостью от температуры и внешнего поля. Характерными особенностями ферромагнетиков являются способность сильно намагничиваться при обычных температурах в слабых полях и переход в парамагнитное состояние выше определенной температуры, так называемой точкой Кюри.

Антиферромагнетики характеризуются небольшой величиной магнитной восприимчивости и отличаются ее особой температурной зависимостью. В антиферромагнетиках атомы обладают одинаковыми

магнитными моментами, которые направлены в противоположных направлениях и взаимно компенсируются. Антиферромагнетизм выражен у марганца, хрома.

Ферромагнетики характеризуются большой величиной магнитной восприимчивостью, точкой Кюри, меньшей, по сравнению с ферромагнетиками величиной намагниченности насыщения. В отсутствие внешнего магнитного поля ферромагнетики имеют антипараллельное расположение магнитных моментов соседних атомов или ионов, но при этом суммарный магнитный момент не равен нулю. Ферромагнетизм наблюдается у ферритов.

В монокристаллах ферромагнитных веществ существуют направления легкого и трудного намагничивания. В отсутствии внешнего поля магнитные моменты доменов самопроизвольно ориентируются вдоль одной из осей легкого намагничивания. Энергия, которую необходимо затратить для намагничивания монокристаллического образца до насыщения вдоль одной из осей легкого намагничивания, значительно меньше, чем вдоль оси трудного намагничивания. При наличии внешнего поля самым энергетически выгодным направлением является ось легкого намагничивания, составляющая наименьший угол с направлением внешнего поля.

Зависимость магнитной индукции макрообъема ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля называют кривой намагничивания.

Возрастание индукции под действием внешнего поля обусловлено смещением доменных границ и поворотом магнитных моментов доменов.

В полях относительно малой напряженности (область I) намагничивание происходит в основном за счет роста доменов, имеющих векторы намагниченности близкие к направлению внешнего поля и, соответственно, уменьшения доменов, обладающих наибольшим углом направления магнитного момента по отношению к внешнему полю. Начальному участку кривой соответствует обратимое (упругое) смещение доменных границ. После снятия поля доменные границы возвращаются в прежнее положение.

В области II смещение доменных границ носит необратимый, скачкообразный характер. В этом процессе участвует значительно большее число доменов, чем на начальном участке, процесс намагничивания идет более интенсивно и кривая намагничивания становится круче.

При дальнейшем усилении поля (область III) возрастает роль механизма поворота магнитных моментов доменов из направления легкого намагничивания в направлении поля, т.е. в направление более трудного намагничивания.

После окончания процесса поворота наступает техническое насыщение намагниченности (область IV). Величина индукции достигает значения насыщения  $B_s$ . Незначительное возрастание индукции обусловлено слагаемым  $m_0H$  и увеличением намагниченности самого домена.

При уменьшении напряженности магнитного поля вектор намагниченности будет поворачиваться в направлении оси легкого намагничивания.

Когда поле станет равным нулю индукция будет иметь некоторое значение  $B_r$ , называемое остаточной индукцией. При приложении поля противоположного знака возникают домены, у которых направление векторов намагниченности близко к направлению поля. Эти домены растут и при некотором значении поля индукция обращается в нуль.

Напряженность размагничивающего поля -  $H_c$ , при которой индукция в ферромагнетике, предварительно намагниченного до насыщения, обращается в нуль, называют коэрцитивной силой.

Увеличение напряженности поля до значений, больших  $-H_c$ , вызывает перемагничивание ферромагнетика вплоть до насыщения ( $-B_s$ ). Изменение магнитного состояния ферромагнетиков при его циклическом перемагничивании характеризуется явлением гистерезиса. Петлю гистерезиса, полученную при индукции насыщения, называют предельной. Величины  $B_r$  и  $H_c$  являются параметрами предельной петли гистерезиса. Совокупность вершин петель гистерезиса образуют основную кривую намагничивания ферромагнетиков.

Крутизна кривой намагниченности (т.е. легкость, с которой намагничивается материал) характеризуется магнитной проницаемостью.

Для ферромагнетиков характерно явление магнитострикции - изменение линейных размеров при намагничивании. Магнитострикция оценивается величиной относительной деформации в направлении магнитного поля:  $\lambda = \Delta l / l$ . Величина и знак коэффициента магнитострикции зависит от типа структуры, кристаллографического направления, напряженности магнитного поля и температуры. Магнитострикция сопровождается появлением внутренних напряжений, деформацией кристаллической решетки, что препятствует смещению доменных границ и затрудняет процесс намагничивания ферромагнетиков в слабых полях. Поэтому высокой магнитной проницаемостью обладают магнитные материалы с малыми коэффициентами анизотропии и магнитострикции.

Вихревые токи возникают в проводящей среде за счет э.д.с. самоиндукции. Динамическая петля гистерезиса шире статистической поскольку к потерям на гистерезис добавляются потери на вихревые токи, которые увеличиваются пропорционально частоте.

Для уменьшения потерь на вихревые токи необходимо использовать магнитный материал с повышенным удельным сопротивлением, либо собирать сердечник из тонких листов, изолированных друг от друга. Вихревые токи оказывают размагничивающее действие на сердечник - уменьшается индукция и эффективная магнитная проницаемость. Переменный магнитный поток неравномерно распределен по сечению магнитопровода.

Явление затухания электромагнитной волны при ее распространении в проводящей среде используется при создании электромагнитных экранов. Для

эффективной защиты толщина стенок экрана должна превышать глубину проникновения  $D$  электрического поля в вещество.

Потери на магнитное последствие обусловлены отставанием магнитной индукции от изменения напряженности магнитного поля. Время установления стабильного магнитного состояния от долей миллисекунды до нескольких минут и существенно возрастает с понижением температуры. Физическая природа потерь на магнитное последствие во многом аналогична релаксационной поляризации диэлектриков.