

Дисциплина
«Материалы электронной техники»

ТЕМА 4: «Магнитные материалы»

Легостаев Николай Степанович,
профессор кафедры «Промышленная электроника»

Классификация материалов по магнитным свойствам.

Классификация материалов по магнитным свойствам

Диамагнетики

Диамагнетики – вещества, молекулы которых **не обладают собственным магнитным моментом** (спиновые магнитные моменты попарно скомпенсированы).

Парамагнетики

Парамагнетики – вещества, молекулы которых обладают собственным магнитным моментом, но из-за теплового движения атомов ориентированы равновероятно по всем направлениям, так что **средний магнитный момент вещества равен нулю**.

Антиферромагнетики

Антиферромагнетики – вещества, в которых нескомпенсированные спины электронов в незаполненных внутренних слоях соседних атомов взаимно компенсируются, так что **собственный магнитный момент вещества становится равным нулю** и спонтанная намагниченность отсутствует.

Ферромагнетики

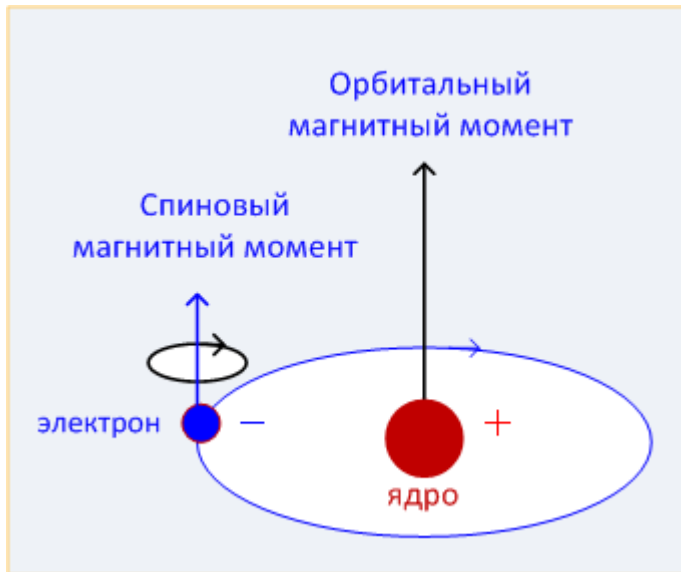
Ферромагнетики – вещества, в которых наблюдается (ниже температуры Кюри) магнитная упорядоченность, соответствующая параллельному расположению спинов в макроскопических областях (доменах) даже в отсутствие внешнего магнитного поля.

Ферримагнетики

Ферримагнетики – вещества, магнитные свойства которых обусловлены нескомпенсированным антиферромагнетизмом.

Классификация материалов по магнитным свойствам.

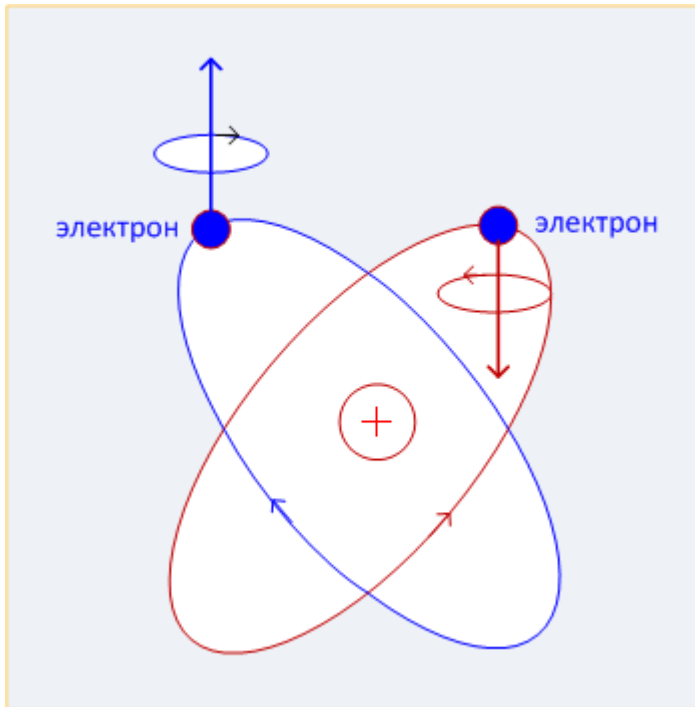
Материалы, помещенные во внешнее магнитное поле, намагничиваются. Известно, что *электроны обладают орбитальными и спиновыми магнитными моментами, а магнитные свойства атома обусловлены в основном магнитными свойствами его электронов* (протоны и нейтроны, входящие в ядро атома, тоже имеют магнитные моменты, но в сотни раз меньшие, чем электроны).



В случае нескольких электронов полный, или **собственный**, магнитный момент атома определяется векторной суммой орбитальных и спиновых моментов с учетом их направления.

Рисунок 4.1 – Электроны обладают орбитальными и спиновыми магнитными моментами.

Классификация материалов по магнитным свойствам.



Орбитальные и спиновые магнитные моменты могут иметь лишь одно из двух возможных направлений – согласное или противоположное. В том случае, если орбитальные и спиновые магнитные моменты направлены в противоположные стороны, магнитные моменты пары электронов взаимно компенсируются. Это имеет место в любой полностью заполненной оболочке атома.

Рисунок 4.2 – Магнитные моменты пары электронов взаимно компенсируются.

Классификация материалов по магнитным свойствам.

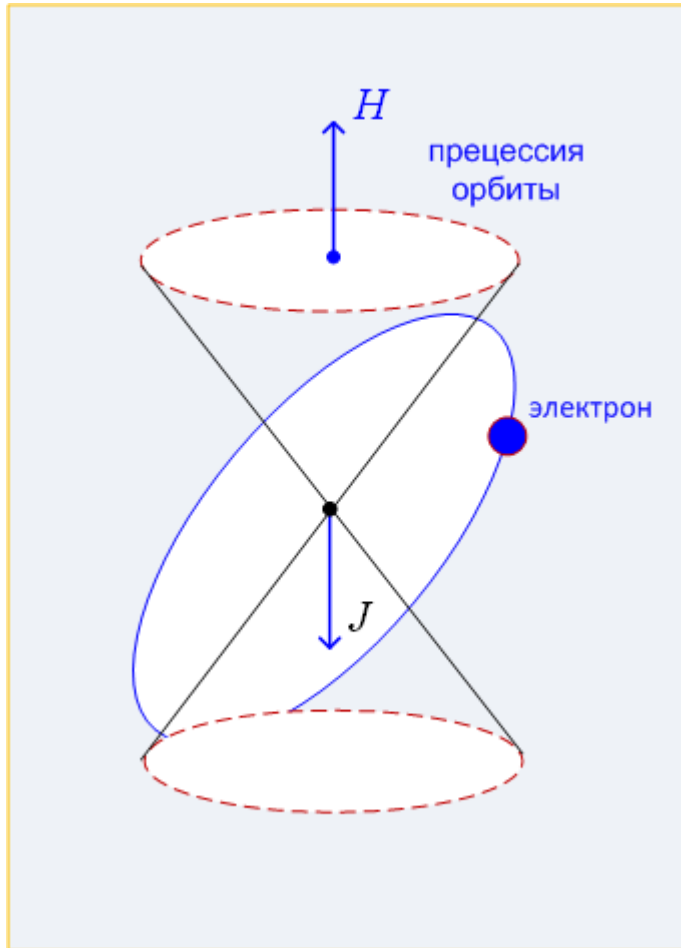


Рисунок 4.3 – Прецессия орбиты электрона.

Если на атом воздействует внешнее магнитное поле напряженностью H , то возникает *прецессия орбит электронов* вокруг вектора этого поля. Прецессия орбиты сопровождается появлением дополнительного магнитного момента, направление которого согласно правилу Ленца всегда противоположно направлению внешнего магнитного поля.

Свойство вещества намагничиваться навстречу внешнему магнитному полю называют *диамагнетизмом*. Следует отметить, что *диамагнетизм присущ атомам всех веществ*.

Диамагнетики – вещества, молекулы которых не обладают собственным магнитным моментом (спиновые магнитные моменты попарно скомпенсированы). Магнитная проницаемость μ диамагнетиков немного меньше единицы.

Классификация материалов по магнитным свойствам.

Парамагнетики – вещества, молекулы которых обладают собственным магнитным моментом, но из-за теплового движения атомов ориентированы равновероятно по всем направлениям, так что средний магнитный момент вещества равен нулю. При наложении внешнего магнитного поля возникают силы, которые преодолевают дезориентирующее действие теплового движения атомов и ориентируют магнитные моменты атомов в направлении внешнего магнитного поля. Эта ориентация превышает диамагнитный эффект, создаваемый прецессией электронных орбит, в результате чего намагниченность парамагнетиков совпадает с направлением внешнего магнитного поля. *Магнитная проницаемость $\mu \approx 1$.*

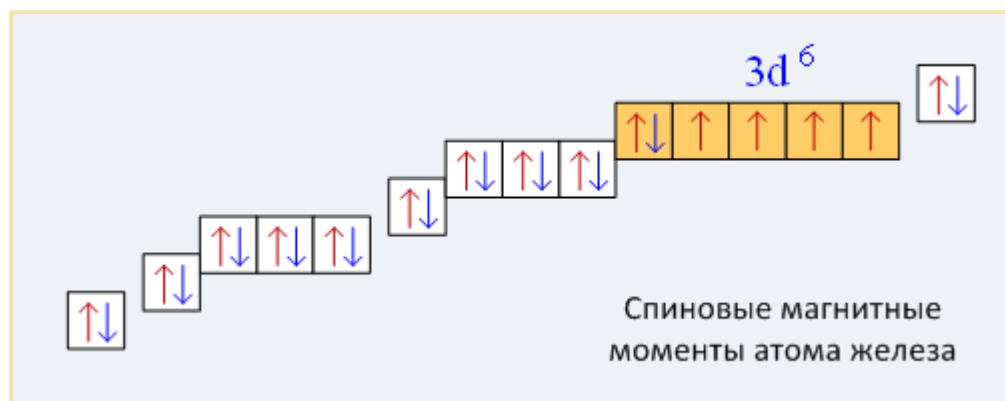
Ферромагнетики – вещества, в которых наблюдается (ниже температуры Кюри) магнитная упорядоченность, соответствующая параллельному расположению спинов в макроскопических областях (доменах) даже в отсутствие внешнего магнитного поля. Из химически чистых элементов свойствами ферромагнетиков обладают только девять: **железо, никель, кобальт**, гадолиний и при температурах значительно ниже 0 °С пять редкоземельных элементов (эрбий, диспрозий, тулий, гольмий и тербий).

Магнитные свойства ферромагнетиков обусловлены особенностями электронного строения атомов и их обменным взаимодействием. *В создании магнитного момента атома принимают участие не все его электроны, а только небольшая их часть. Это объясняется тем, что магнитные спиновые моменты части электронов имеют противоположные направления и взаимно компенсируют друг друга, вследствие чего эти электроны становятся нейтральными в магнитном отношении.*

Классификация материалов по магнитным свойствам. Ферромагнетики.

Ферромагнитные свойства определяются нескомпенсированными спинами электронов.

В атоме железа не заполнена предпоследняя подоболочка ($3d$), которой не хватает четырех электронов. У этой оболочки имеются пять «положительных» спинов и один «отрицательный» спин. Таким образом, имеется четыре нескомпенсированных спина, которые и определяют результирующий магнитный момент атома.



У атома кобальта имеются три, а у атома никеля – два нескомпенсированных спина.

Отсутствие компенсации спиновых моментов в одном из внутренних слоев электронной оболочки атома является необходимым условием ферромагнетизма.

Классификация материалов по магнитным свойствам.

Атомная структура железа	
Электронная формула атома	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6 4s^2$
Спиновые магнитные моменты	
В атоме железа не заполнена предпоследняя подоболочка (3d), которой не хватает четырех электронов. У этой оболочки имеется пять положительных спинов и один отрицательный спин. Таким образом, имеются четыре некомпенсированных спина, которые и определяют результирующий магнитный момент атома.	

Классификация материалов по магнитным свойствам. Ферромагнетики.

Наличие нескомпенсированных спинов во внутренних слоях является необходимым, но недостаточным условием ферромагнетизма. Это можно видеть на примере атомов марганца (Mn), который имеет недостроенные внутренние оболочки, но не обладает свойствами ферромагнетика.

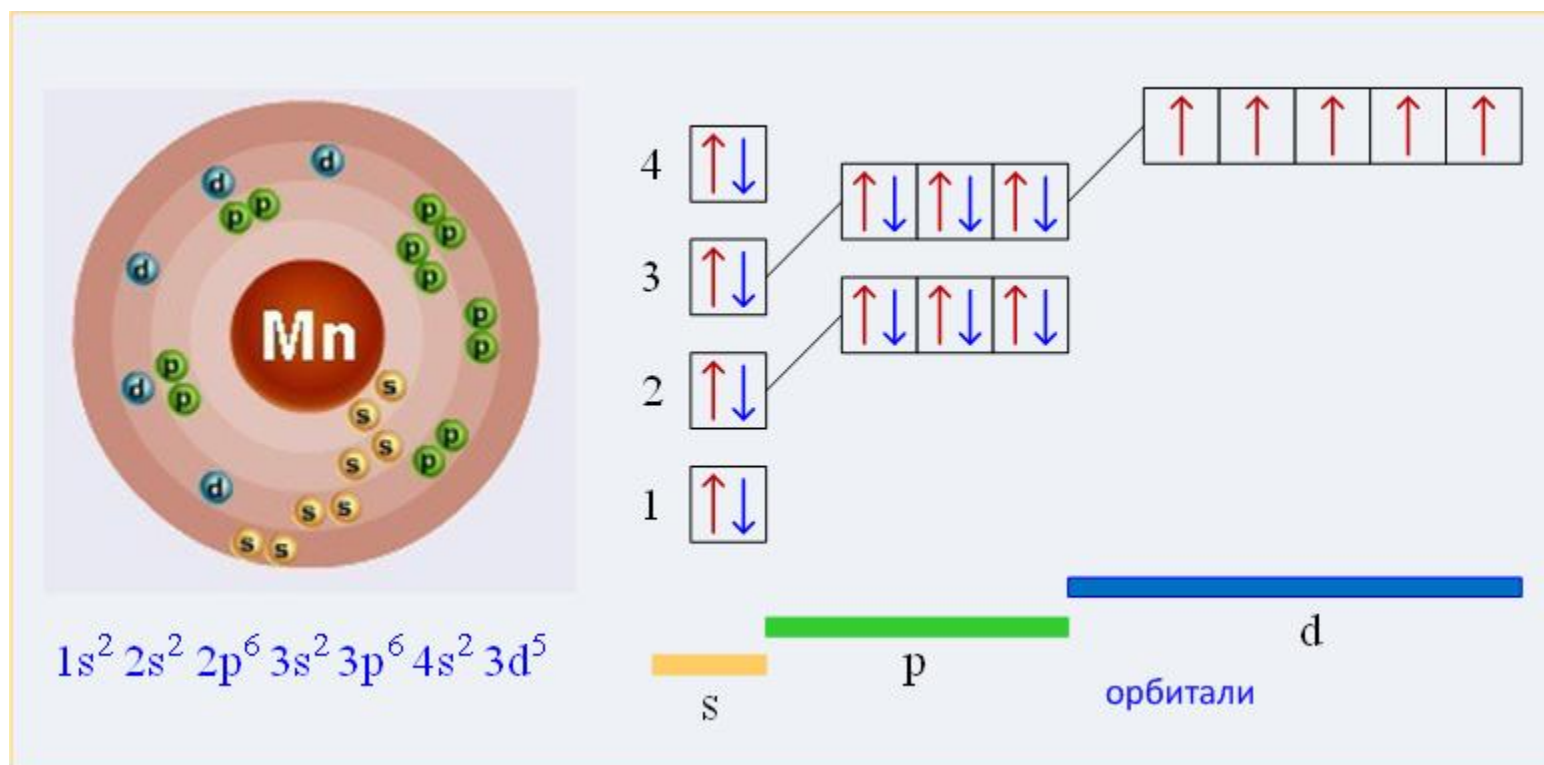


Рисунок 4.4 – Спиновые магнитные моменты атома марганца.

Ферромагнетики.

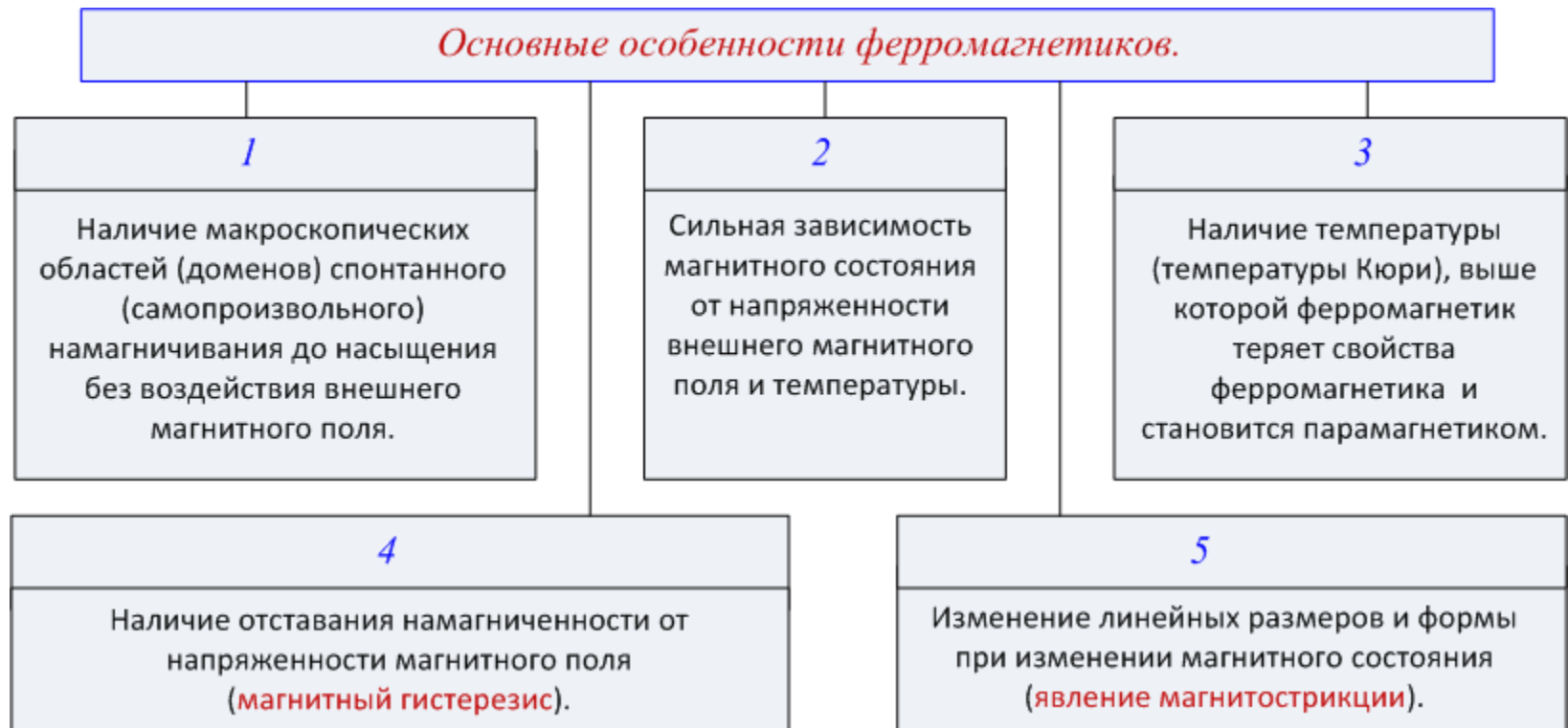
Вторым условием возникновения ферромагнетизма является *наличие сильного электростатического взаимодействия между электронами соседних атомов, способного ориентировать их нескомпенсированные спиновые магнитные моменты одинаковым образом.*

В квантовой механике обменное взаимодействие атомов в кристалле характеризуют обменной энергией $W_{\text{обм}}$. Величина обменной энергии и, следовательно, характер взаимодействия электронов соседних атомов в сильной степени зависят от отношения межатомного расстояния a к радиусу r незаполненной оболочки атома, в которой сосредоточены нескомпенсированные спины. *При $a \gg r$ обменная энергия весьма мала и ферромагнетизм невозможен.*

Критерием ферромагнетизма является существование незаполненных внутренних электронных оболочек, радиус которых мал по сравнению с расстоянием между ядрами в решетке.

Ферромагнетики.

При повышении температуры усиливается дезориентирующее действие теплового движения атомов, которое стремится разрушить состояние самопроизвольной намагниченности ферромагнетика, обусловленное обменным взаимодействием электронов соседних атомов. *При некоторой температуре Θ (температура Кюри) кинетическая энергия теплового движения становится достаточной для преодоления ориентирующего действия обменной энергии, состояние самопроизвольной намагниченности нарушается и ферромагнетик становится парамагнетиком.*



Ферромагнетики и антиферромагнетики.

Ферромагнетики – вещества, магнитные свойства которых обусловлены нескомпенсированным антиферромагнетизмом. *Ферромагнетики обладают высокой магнитной восприимчивостью, которая существенно зависит от напряженности магнитного поля и температуры.*

Ферромагнетики и антиферромагнетики являются кристаллическими веществами, причем кристаллическую решетку антиферромагнетика можно рассматривать как сложную решетку, состоящую из двух подрешеток, намагниченных противоположно. У некоторых веществ эта компенсация может оказаться неполной. Явление неполной компенсации магнитных моментов двух подрешеток (*ферромагнетизм*) приводит к тому, что в ферромагнетиках также возникает некоторая результирующая спонтанная намагниченность, которая заметно меньше спонтанной намагниченности ферромагнетиков, так как представляет собой разность намагниченностей подрешеток.

Антиферромагнетики – вещества, в которых нескомпенсированные спины электронов в незаполненных внутренних слоях соседних атомов взаимно компенсируются, так что *собственный магнитный момент вещества становится равным нулю* и спонтанная намагниченность отсутствует.

Характеристики и параметры ферромагнетиков.

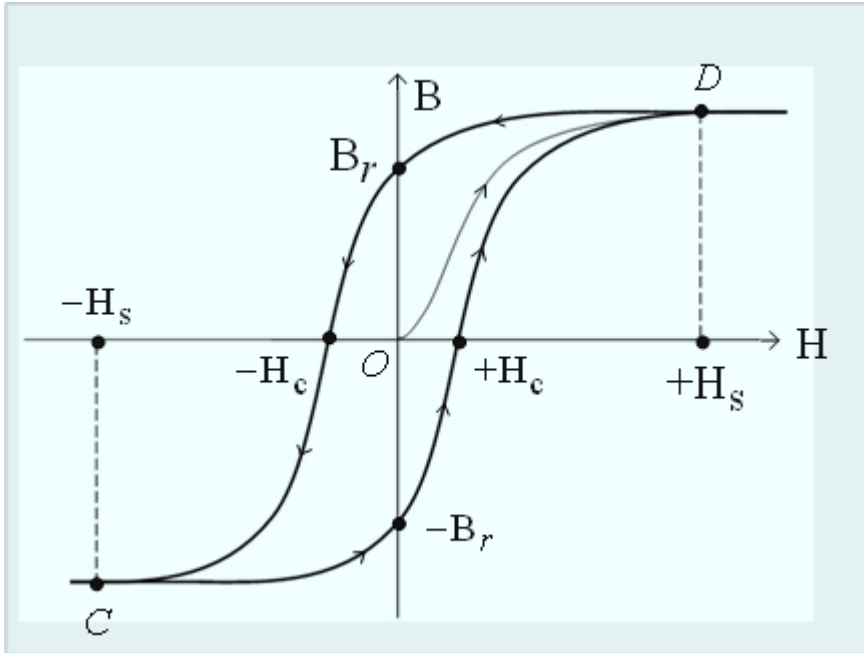


Рисунок 4.5 – Петля гистерезиса ферромагнетика.

При изменениях напряженности магнитного поля на величины, сравнимые с коэрцитивной силой (или большие), *имеют место необратимые процессы намагничивания и перемагничивания*. В этом случае значения намагниченности магнитного материала при изменении знака поля не совпадают.

Необратимые процессы намагничивания и перемагничивания сопровождаются рассеянием энергии, при котором, в частности, происходит выделение теплоты, что и обуславливает отставание намагниченности от напряженности.

Явление отставания напряженности поля называют *магнитным гистерезисом*, а замкнутую кривую на рисунке 4.5, графически изображающую это отставание за полный цикл изменения напряженности поля, называют *петлей гистерезиса*. Кривая OD , отображающая закон нарастания индукции при увеличении напряженности поля при условии, что вещество предварительно было размагничено, называется *первоначальной кривой намагничивания*.

Характеристики и параметры ферромагнетиков.

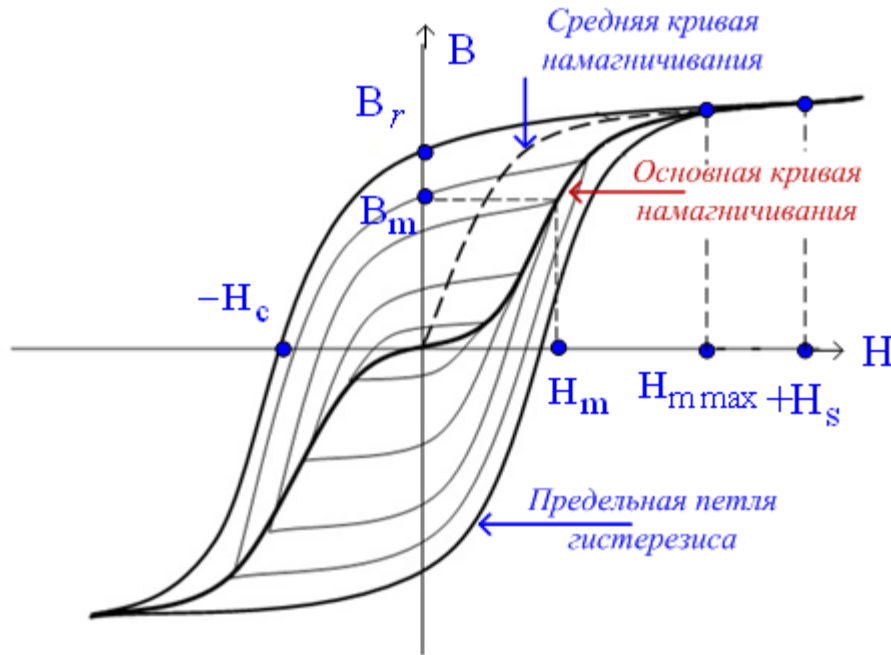


Рисунок 4.6 – Семейство частных симметричных петель гистерезиса.

Начиная с некоторого, достаточно большого значения $H_{m\max}$, при котором вещество близко к состоянию насыщения, дальнейшее увеличение $H_{m\max}$ не вызывает увеличения площади, заключенной внутри петли гистерезиса.

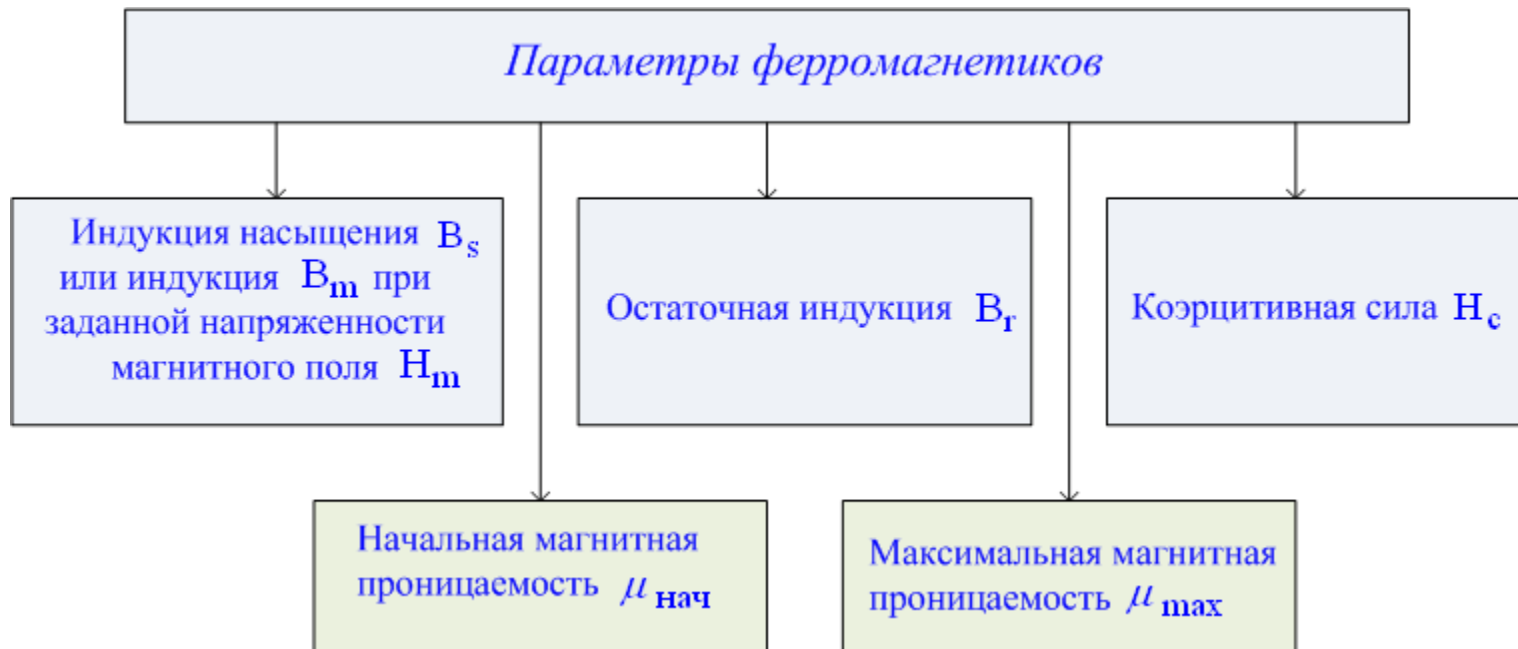
Петлю (цикл) гистерезиса, соответствующую значению $H_{m\max}$, называют *предельной петлей гистерезиса*.

Предельная петля гистерезиса является *основной магнитной характеристикой ферромагнетика*.

Петли гистерезиса при значениях $H_m < H_{m\max}$, называются *частными петлями гистерезиса*. Кривая, проходящая через вершины симметричных петель гистерезиса *называется основной кривой намагничивания*.

Характеристики и параметры ферромагнетиков.

Вследствие неоднозначного характера зависимости $B = f(H)$ ферромагнетики принято характеризовать рядом параметров.



Параметры ферромагнетиков измеряют при определенных условиях.

Параметры позволяют получить однозначные и воспроизводимые результаты в пределах точности измерения.

Характеристики и параметры ферромагнетиков.

Начальная $\mu_{\text{нач}}$ и максимальная μ_{max} магнитные проницаемости представляют собой частный случай *относительной магнитной проницаемости*

$$\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B}{H},$$

где μ_a – *абсолютная магнитная проницаемость*.

Из существующего множества магнитных проницаемостей (начальная магнитная проницаемость $\mu_{\text{нач}}$, максимальная магнитная проницаемость μ_{max} , магнитная проницаемость на частном цикле μ_{Δ} , дифференциальная магнитная проницаемость $\mu_{\text{диф}}$, магнитная проницаемость возврата μ_R , обратимая магнитная проницаемость μ_r) наиболее часто используют понятия начальной магнитной проницаемости и максимальной магнитной проницаемости.

Начальную магнитную проницаемость $\mu_{\text{нач}}$ и максимальную магнитную проницаемость μ_{max} принято определять по основной кривой намагничивания.

Характеристики и параметры ферромагнетиков.

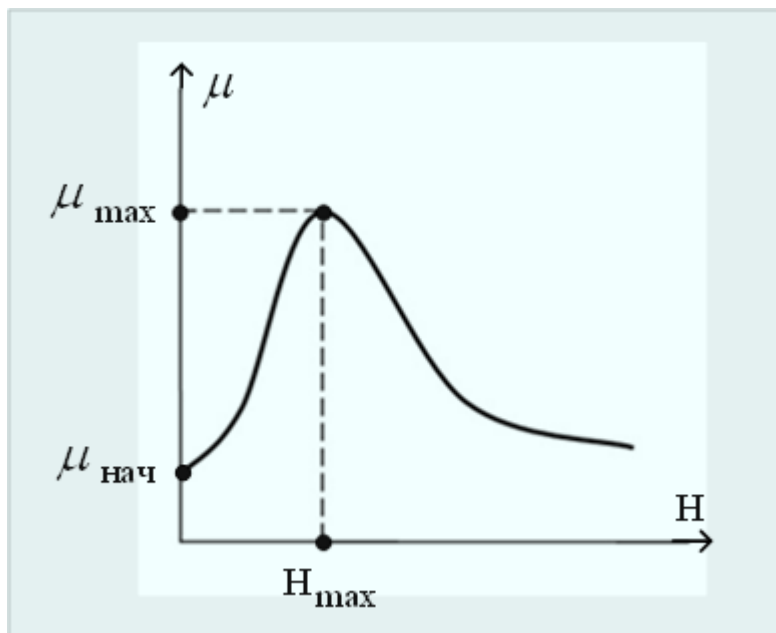


Рисунок 4.7 – Зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля.

$$\mu_{\text{нач}} = \frac{1}{\mu_0} \operatorname{tg} \beta; \quad \mu_{\text{max}} = \frac{1}{\mu_0} \operatorname{tg} \alpha.$$

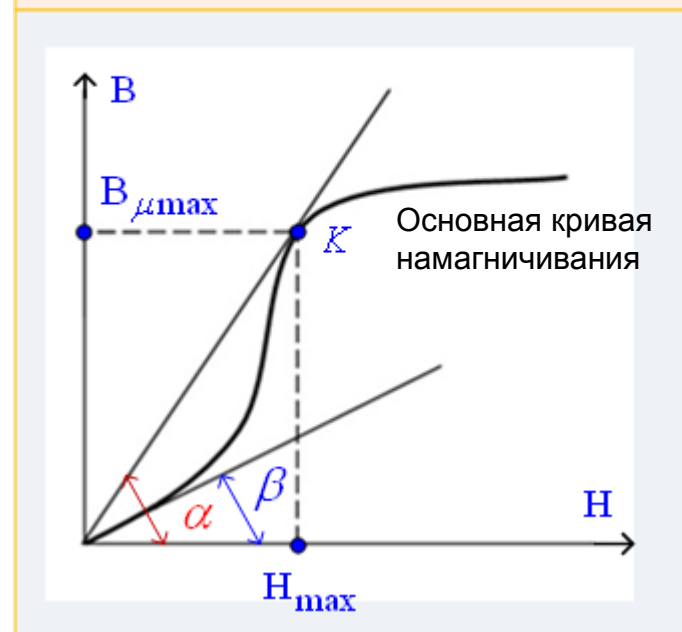


Рисунок 4.8 – Определение $\mu_{\text{нач}}$ и μ_{max} по основной кривой намагничивания

Характеристики и параметры ферромагнетиков.

Важным электромагнитным параметром ферромагнетиков являются потери в ферромагнетике, которые складываются из потерь на гистерезис, потерь на вихревые токи и потерь вследствие магнитной вязкости (магнитного последействия).

Потери в ферромагнетике

Потери на гистерезис

Потери на гистерезис обусловлены необратимыми процессами перемагничивания. Возникновение потерь на гистерезис объясняется тем, что при изменении внешнего поля происходит перестройка самопроизвольно намагниченных областей ферромагнетиков (доменов). Быстрое изменение магнитного потока, происходящее при перестройке доменов, сопровождается местными токами, которые и вызывают в проводящей среде, которой является ферромагнетик, потери на гистерезис.

Потери на вихревые токи

Потери на вихревые токи связаны с возникновением в массе материала э.д.с. индукции и вихревых токов. Вихревые токи всегда возникают в плоскости, расположенной перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Вихревые токи, протекающие по материалу магнитопровода, вызывают потери на вихревые токи.

Потери вследствие магнитной вязкости (магнитного последействия)

Магнитной вязкостью (магнитным последействием) называют явление, которое возникает в ферромагнетике при быстром изменении магнитного поля, что проявляется в специфическом запаздывании намагниченности ферромагнетика. Явление магнитного последействия возникает при частотах порядка нескольких сотен или тысяч килогерц.

Характеристики и параметры ферромагнетиков.

Уменьшить потери на гистерезис в данном ферромагнетике нельзя – потери на гистерезис за один цикл перемагничивания прямо пропорциональны площади петли гистерезиса.

С потерями на гистерезис считаются в сталях и сплавах на низкой частоте (когда потери на гистерезис соизмеримы с потерями на вихревые токи).

В ферритах и магнитодиэлектриках потери на гистерезис существенны на всех частотах.

*Снизить потери на вихревые токи можно путем уменьшения вихревых токов. Это достигается увеличением удельного сопротивления материала магнитопроводов и разделением магнитопроводов на отдельные изолированные друг от друга слои вдоль линий магнитного потока. Такое разделение на слои называется **шихтованием** магнитопроводов.*

***Примечание:** при высокой частоте перемагничивания ферромагнетика шихтование материала магнитопровода оказывается невозможным, так как невозможно изготовить пластины или ленту такой толщины, чтобы потери на вихревые токи были удовлетворительными. Кроме того, чрезмерное уменьшение толщины листов или ленты имеет и свои отрицательные стороны: снижается магнитная проницаемость ферромагнетика, растет его коэрцитивная сила.*

Характеристики и параметры ферромагнетиков.

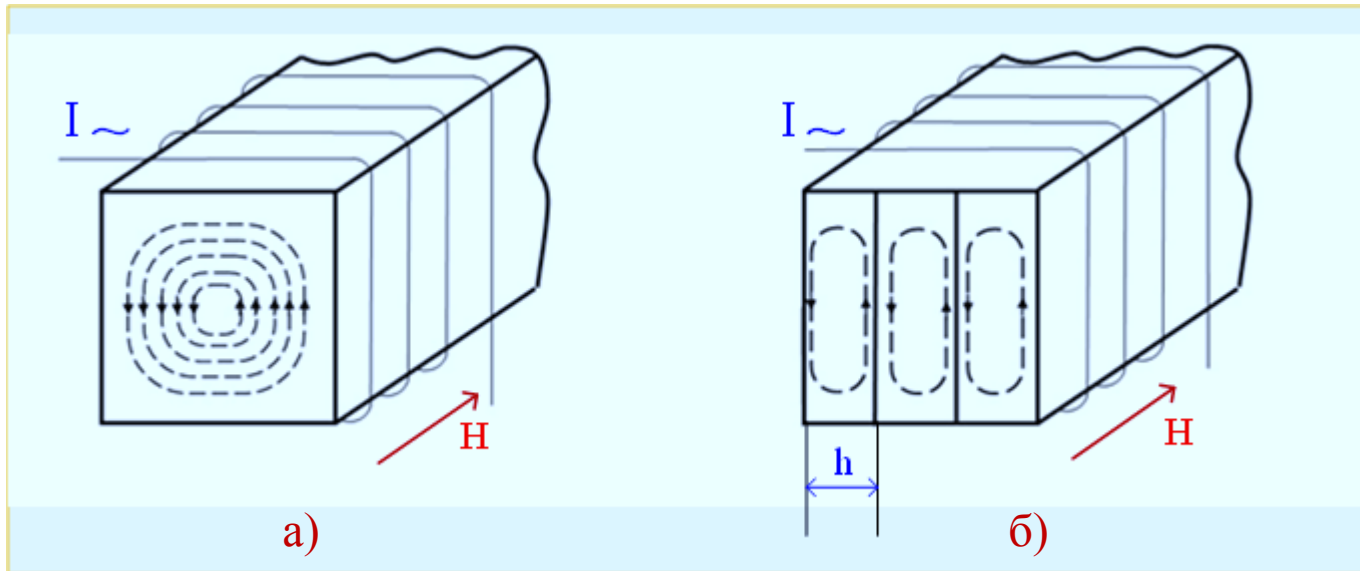


Рисунок 4.9 – Вихревые токи в поперечном сечении сплошного (а) и шихтованного магнитопровода (б) .

Мощность, расходуемая на вихревые токи в единице массы ферромагнетика, связана с толщиной листа h соотношением

$$p_{\text{в}} = 1,64 \frac{B_m^2 \cdot f^2 \cdot h^2}{\gamma \cdot \rho}, \left[\frac{\text{Вт}}{\text{кг}} \right].$$

h – толщина листа; γ – плотность ферромагнетика;
 ρ – удельное электрическое сопротивление ферромагнетика.

Виды магнитных материалов.

Магнитный материал – материал, обладающий свойствами ферромагнетика или ферримагнетика (ГОСТ 19693-74. Материалы магнитные. Термины и определения.).

Ферромагнетик – кристаллическое вещество, в котором магнитные моменты атомов или ионов находятся в состоянии самопроизвольного упорядочения, причем результирующие магнитные моменты каждого из доменов отличны от нуля (ГОСТ 19693-74. Материалы магнитные. Термины и определения.).

Ферримагнетик – кристаллическое вещество, магнитную структуру которого можно представить в виде двух или более подрешеток, магнитные моменты атомов или ионов которых находятся в состоянии самопроизвольного магнитного упорядочения, причем результирующие магнитные моменты каждого из доменов отличны от нуля (ГОСТ 19693-74. Материалы магнитные. Термины и определения.).

На практике магнитные материалы используют в магнитопроводах магнитных элементов электронной техники.



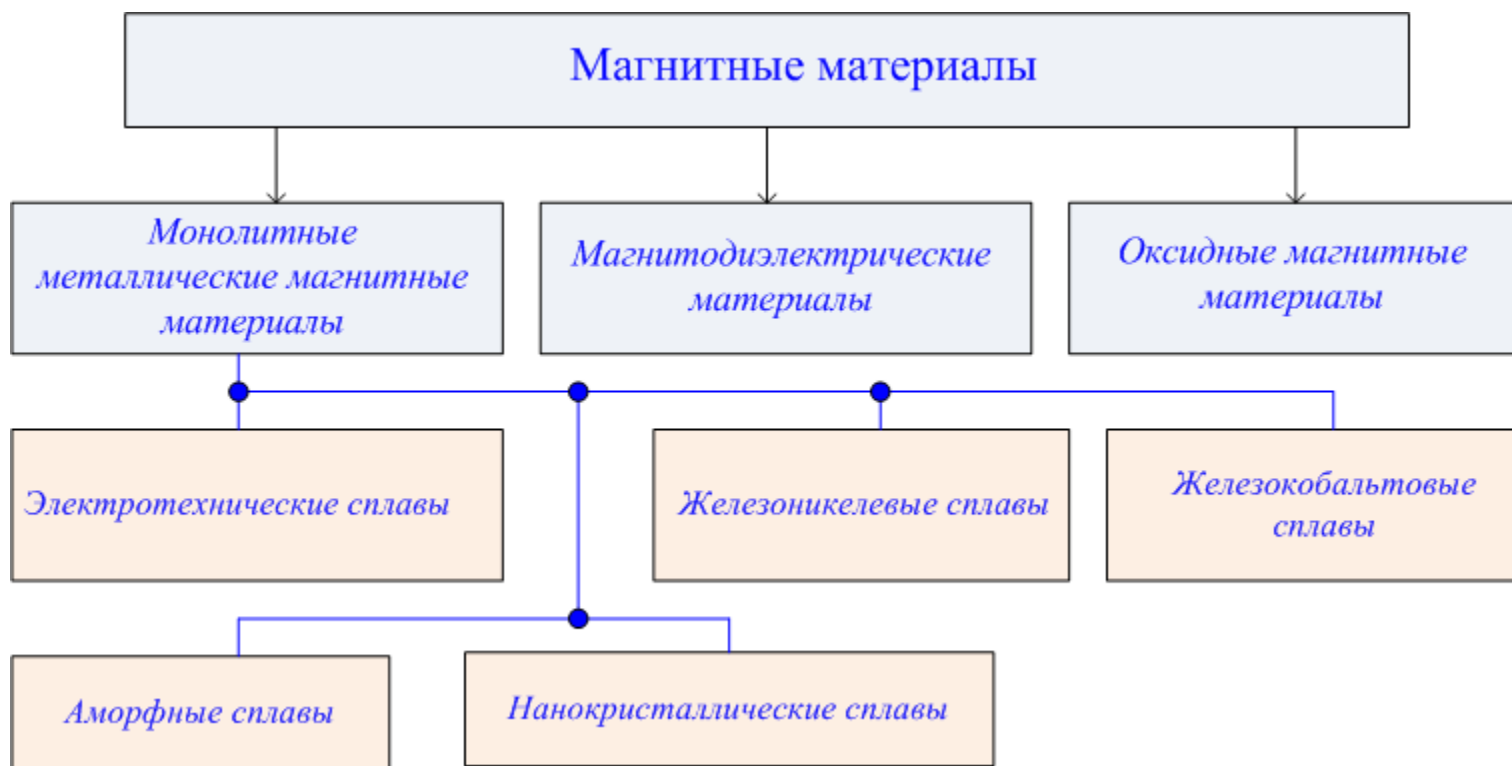
Виды магнитных материалов.

Магнитопровод представляет собой магнитную систему, выполненную в виде определенной конструктивной единицы, то есть имеющей вполне определенные геометрические формы и размеры, обозначенные на чертеже.



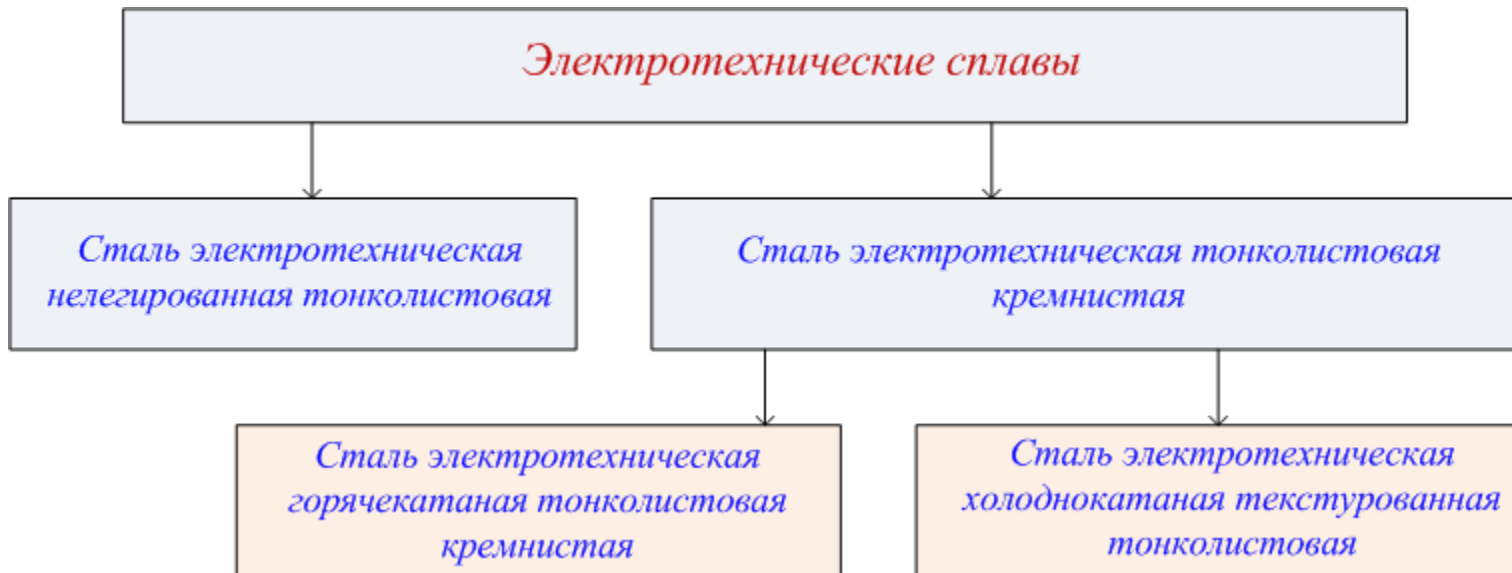
Современная элементная база магнитопроводов представлена широким спектром магнитных материалов: *монолитные металлические магнитные материалы* (электротехнические стали, железоникелевые и железокобальтовые сплавы, аморфные и нанокристаллические сплавы), *магнитодиэлектрические материалы* и *оксидные магнитные материалы*.

Виды магнитных материалов.



Виды магнитных материалов.

Электротехнические стали можно разделить на группы: сталь электротехническая нелегированная тонколистовая, сталь электротехническая тонколистовая кремнистая.



Из всех магнитных сплавов с кремнием наиболее высокими магнитными свойствами обладает холоднокатаная текстурированная сталь. Холоднокатаная текстурированная сталь относится к магнитомягким материалам с пониженными потерями энергии при перемагничивании.

Маркировка стали электротехнической кремнистой

Четырехзначное число (первые три цифры указывают тип стали; четвертая цифра означает порядковый номер стали в пределах одного типа)

Первая цифра указывает способ изготовления и структурное состояние стали

- 1 – горячекатаная изотропная;
- 2 – холоднокатаная изотропная;
- 3 – холоднокатаная анизотропная с ребровой структурой.

Вторая цифра указывает содержание кремния

- 0 – до 0,4% включительно (нелегированная);
- 1 – свыше 0,4 до 0,8% включительно;
- 2 – свыше 0,8 до 1,8% включительно;
- 3 – свыше 1,8 до 2,8% включительно;
- 4 – свыше 2,8 до 3,8% включительно;
- 5 – свыше 3,8 до 4,8% включительно.

Третья цифра определяет основное нормируемое свойство, гарантируемое для стали

- 0 – удельные потери при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц ($P_{1,7/50}$)
- 1 – удельные потери при магнитной индукции 1,5 Тл и частоте 50 Гц ($P_{1,5/50}$)
- 2 – удельные потери при магнитной индукции 1,0 Тл и частоте 400 Гц ($P_{1,0/400}$)
- 6 – магнитная индукция в слабых магнитных полях при напряженности магнитного поля $H = 0,4 \text{ А/м}$ ($B_{0,4}$)
- 7 – магнитная индукция в средних магнитных полях при напряженности магнитного поля $H = 10 \text{ А/м}$ (B_{10})

Четвертая цифра означает порядковый номер стали в пределах одного типа

Виды магнитных материалов.

Железоникелевые сплавы – сплавы железа с никелем, получившие название **пермаллоев** (англ. *permalloy*, от *perm* – проницаемость и *alloy* – сплав) относятся к магнитомягким материалам с наибольшей проницаемостью в слабых полях и наименьшими значениями коэрцитивной силы.

К магнитомягким материалам с наибольшей проницаемостью в слабых полях относятся такие материалы, начальная $\mu_{\text{нач}}$ и максимальная μ_{max} магнитная проницаемости которых достигает величин 10^4 и 10^6 соответственно. Для улучшения электромагнитных свойств железоникелевые сплавы легируются различными элементами, например, молибденом, хромом, кремнием, медью.

Другие названия пермаллоев – *Мо-пермаллой (МРР), High Flux, пресперм.*

Железokoбальтовые сплавы. Из всех известных магнитных материалов сплавы железа с кобальтом, содержащие от 30 до 50% кобальта (Co), имеют наиболее высокие значения индукции насыщения, достигающие 2,4 Тл. Применение таких сплавов позволяет существенно уменьшить габариты и вес магнитных элементов электронной техники.

Виды магнитных материалов.

Альсифер – сплав, основу магнитной фазы которого составляет тройной сплав системы Al – Si – Fe , например, 5,6% Al и 9,5% Si , остальное – Fe. По своим магнитным свойствам альсифер не уступает высоконикелевым пермаллоям. Альсифер отличается высокой твердостью и хрупкостью. Альсифер, в виде порошка, наряду с карбонильным железом, используется для изготовления прессованных магнитопроводов.

Другие названия альсифера – Sendast, Super-MSS, Kool M μ .

Полупроводниковые высокопроницаемые магнитные материалы (магнитомягкие ферриты) представляют собой *неметаллические соединения из смеси окислов железа, никеля, цинка, марганца, меди и других металлов.* Соответствующие окислы после предварительного размельчения смешиваются в определенной пропорции. Из полученной смеси окислов прессуются магнитопроводы, которые затем обжигаются при температуре 1000 – 1400 °С.

Основной отличительной особенностью магнитомягких ферритов является большая величина их удельного электрического сопротивления, которая может достигать 10^{10} Ом·см . Это позволяет применять ферриты на высоких частотах, не опасаясь значительного увеличения потерь на вихревые токи.

Виды магнитных материалов.

Магнитодиэлектрики – композиции из порошков высокопроницаемого ферромагнетика (альсифера, карбонильного железа, пермаллоя) с диэлектрической связкой (фенолформальдегидной смолой, полистиролом, стеклом и так далее). Диэлектрик образует между зернами ферромагнетика сплошную пленку и прочно связывает зерна между собой. Суммарные потери в магнитодиэлектрике складываются из магнитных и диэлектрических потерь. Для уменьшения потерь, особенно на вихревые токи, нужно применять мелкий порошок ферромагнетика с тщательной изоляцией отдельных зерен. Магнитодиэлектрики используют для изготовления прессованных (порошковых) магнитопроводов. Немагнитные промежутки между отдельными зернами в сумме формируют значительный **распределенный немагнитный зазор**, уменьшающий магнитную проницаемость магнитопроводов.

Виды магнитных материалов.

Аморфные (VITROVAC) и нанокристаллические (VITROPERM) магнитомягкие материалы (сплавы) состоят из металлов (Т) – железа, кобальта, никеля и так называемых металлоидов (М) – бор, углерод, кремний, и описываются обобщенной формулой, отражающей процентное содержание этих веществ: $T_{70-80}M_{30-20}$.

Нанокристаллические сплавы относятся к группе материалов с высокой магнитной проницаемостью и этот уровень является наивысшим для материалов с коэрцитивной силой 1 А/м. Основой нанокристаллических сплавов служит недорогое железо, в то время как аморфные сплавы и пермаллои (конкурентные ферромагнетики) изготавливаются на основе кобальта и никеля. Нанокристаллические сплавы выделяются наилучшей комбинацией высокой магнитной индукции насыщения и начальной магнитной проницаемости. Благодаря двухфазной структуре и высокой температуре Кюри нанокристаллов магнитная проницаемость нанокристаллического сплава слабо изменяется с изменением температуры и остается стабильно высокой в области 200 °С.

Нанокристаллические сплавы на основе железа представляют наиболее универсальный магнитомягкий материал, который можно использовать в широкой области изменения частоты и температуры.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие условия являются условиями возникновения ферромагнетизма?
2. Перечислите основные особенности ферромагнетиков.
3. Какие магнитные материалы относятся к магнитомягким материалам с наибольшей проницаемостью в слабых полях и наименьшими значениями коэрцитивной силы?
4. Что представляют собой полупроводниковые высокопроницаемые магнитные материалы?
5. Как называют материалы из порошков высокопроницаемого ферромагнетика с диэлектрической связкой?
6. Как изменяются параметры железоникелевых сплавов при легировании молибденом, хромом, кремнием, медью?
7. Из каких потерь складываются потери в ферромагнетике при циклическом перемагничивании?
8. Какие из магнитных материалов Мо-пермаллой, MPP, High Flux, Sendast, Super-MSS, Kool M μ , VITROVAC, VITROPERM являются сплавами железа с никелем?

Рекомендуемая литература

1. Легостаев Н.С. Материалы электронной техники: учебное пособие / Н.С. Легостаев. – Томск: Эль Контент, 2012. – 184 с. ISBN 978-5-4332-0023-4

2. Легостаев Н.С. Материалы электронной техники: учеб.-метод. пособие / Н.С. Легостаев. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2014. – 74 с. ISBN 978-5-86889-678-1

Тема следующего занятия «Полупроводниковые материалы».

Для подготовки к занятию изучите материал, представленный в разделе 8 учебного пособия на страницах 120-143, 154-160. Необходимо четко представлять, что такое равновесная, неравновесная и избыточная концентрация носителей заряда, знать закон действующих масс и уметь его использовать для определения равновесных концентраций носителей заряда. Необходимо знать природу электропроводности собственных полупроводников и полупроводниковых химических соединений. Особое внимание следует обратить на применение полупроводниковых соединений.

Вопросы и пожелания можно присылать через диспетчерский отдел ФДО.

Спасибо за внимание