



Материалы, используемые в трансформаторах

- Развитие производства трансформаторов тесно связано с прогрессом в производстве **магнитных, проводниковых и изоляционных материалов.**
- Поиски новых материалов чаще всего имеют целью **улучшение параметров трансформатора:**
 - *уменьшение потерь энергии в трансформаторе;*
 - *уменьшение его массы и размеров;*
 - *повышение надежности работы.*
- Другая цель - замена дорогих материалов более дешевыми и сокращение расхода некоторых материалов, в частности цветных металлов.
- Материалы, применяемые для изготовления трансформатора, разделяются на:
 - **активные**, т. е. сталь магнитной системы и металл обмоток и отводов;
 - **изоляционные**, применяемые для электрической изоляции обмоток и других частей трансформатора, например электроизоляционный картон, фарфор, дерево, трансформаторное масло и др.;
 - **конструкционные**, идущие на изготовление бака, различных крепежных частей и т. д, и прочие материалы, употребляемые в сравнительно небольших количествах.

Классификация материалов по магнитным свойствам

Слабوماгнитные

диамагнетики

$$\mu_r < 1$$

- водород,
- инертные газы,
- медь,
- цинк,
- серебро,
- золото.

парамагнетики

$$\mu_r > 1$$

- кислород,
- алюминий,
- платина,
- щелочные металлы,
- соли железа

Сильномагнитные

ферромагнетики

$$\mu_r \gg 1, \mu_r = f(H)$$

- железо,
- никель,
- кобальт
- и их сплавы

ферриты

- сплавы
- хрома и
- марганца

МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

• По магнитным свойствам материалы подразделяются на:

- **слабомагнитные** (*диамагнетики и парамагнетики*);
- **сильномагнитные** (*ферромагнетики и ферримагнетики*).

• **Диамагнетики** – вещества с магнитной проницаемостью $\mu_r < 1$, значение которой не зависит от напряженности внешнего магнитного поля.

• **Парамагнетики** – вещества с магнитной проницаемостью $\mu_r > 1$, которая в слабых полях не зависит от напряженности внешнего магнитного поля.

• У диамагнетиков и парамагнетиков **магнитная проницаемость μ_r близка к единице.**

• Применение в технике в качестве магнитных материалов носит ограниченный характер.

• У сильномагнитных материалов магнитная проницаемость значительно больше единицы ($\mu_r \gg 1$) и **зависит от напряженности магнитного поля.**

• К сильномагнитным материалам относятся:

□ *железо, никель, кобальт и их сплавы;*

□ *сплавы хрома и марганца, гадолиний, ферриты различного состава.*

• **Ферромагнетики** обладают исключительно большой магнитной проницаемостью, достигающей до миллиона.

Магнитные характеристики материалов

- Магнитные свойства материалов оценивают физическими величинами, называемыми магнитными характеристиками.

- **Магнитная проницаемость**

- Различают *относительную* и *абсолютную магнитные проницаемости* вещества (материала), которые между собой связаны соотношением

$$\mu_a = \mu_o \cdot \mu, \text{ Гн/м}$$

где μ_o – магнитная постоянная, $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$;

μ – относительная магнитная проницаемость (безразмерная величина).

- Для описания свойств магнитных материалов применяют **относительную магнитную проницаемость μ** (чаще называемую магнитная проницаемость), а для практических расчетов используют **абсолютную магнитную проницаемость μ_a** , вычисляемую по уравнению

$$\mu_a = B/H, \text{ Гн/м}$$

где H – напряженность намагничивающего (внешнего) магнитного поля, А/м

B – магнитная индукция поля в магнетике, Тл.

- Большая величина μ показывает, что материал легко намагничивается в слабых и сильных магнитных полях.

- В литературе различают несколько определений магнитной проницаемости:
- **Начальная магнитная проницаемость μ_H** - значение магнитной проницаемости при малой напряженности поля.
- **Максимальная магнитная проницаемость μ_{max}** - максимальное значение магнитной проницаемости, которое достигается обычно в средних магнитных полях.
- Для характеристики магнитных свойств широко используется безразмерная величина, называемая **магнитной восприимчивостью χ** :

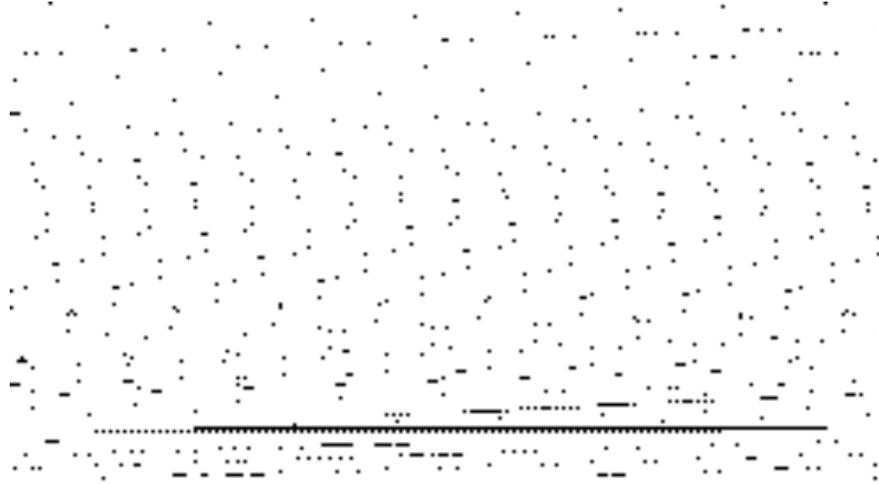
$$\mu = 1 + \chi$$

- **Температурный коэффициент магнитной проницаемости**
- Магнитные свойства вещества зависят от температуры **$\mu = \mu(T)$** .
- Для описания характера изменения магнитных свойств в зависимости от температуры используют **температурный коэффициент магнитной проницаемости**:

$$TK_{\mu} = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1} \cdot \frac{1}{t_2 - t_1}, \quad 1/\text{град}$$

Магнитные характеристики ферромагнетиков

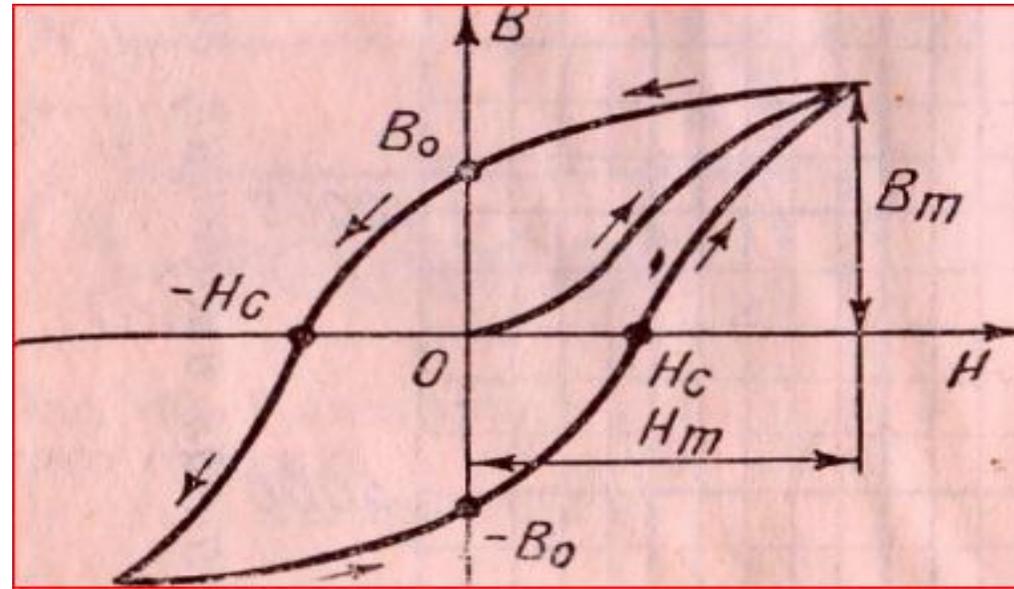
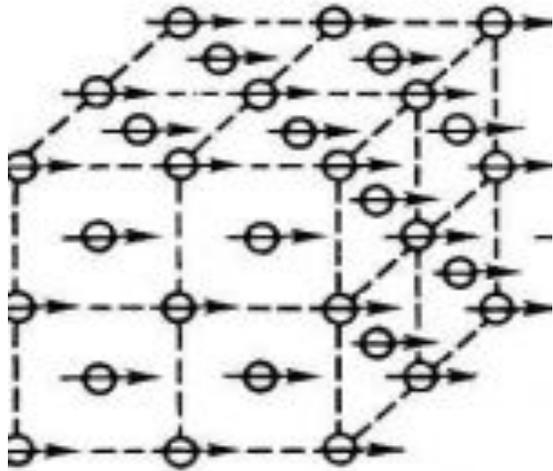
- Зависимость магнитных свойств ферромагнетиков от температуры имеет сложный характер и достигает максимума при температуре Кюри:



Температура, при которой магнитная восприимчивость резко снижается, почти до нуля, носит название *температуры Кюри* - Q_K . При температурах выше Q_K процесс намагничивания ферромагнетика нарушается из-за интенсивного теплового движения атомов и молекул и материал перестает быть ферромагнитным (*разрушается доменная структура*) и становится парамагнетиком.

Для железа $Q_K = 768$ °С, для никеля $Q_K = 358$ °С, для кобальта $Q_K = 1131$ °С.

Процесс намагничивания сильномагнитных материалов (ферромагнетиков)



Петля гистерезиса – зависимость индукции от напряженности магнитного поля при изменении поля по циклу.

Максимальная петля гистерезиса – достигающая максимальной намагниченности насыщения.

Остаточная индукция B_0 – индукция магнитного поля на обратном ходе петли гистерезиса при нулевой напряженности магнитного поля.

Коэрцитивная сила H_c – напряженность поля на обратном ходе петли гистерезиса, при которой достигается нулевая индукция.

Магнитные потери

- Перемагничивание ферромагнетика в переменных магнитных полях всегда сопровождается тепловыми потерями энергии, которые обусловлены:

□ *потерями на гистерезис;*

□ *динамическими потерями.*

- Динамические потери связаны с *вихревыми токами*, индуцированными в объеме материала, и зависят от электрического сопротивления материала, уменьшаясь с ростом сопротивления.
- **Потери на гистерезис W** в одном цикле перемагничивания определяются *площадью петли гистерезиса*.
- **Мощность потерь на перемагничивание** в материалах можно оценить по выражению:

$$P_{\text{H}} = \eta B_{\text{max}}^n \cdot f \cdot V$$

- где η - коэффициент, зависящий от материала, B_{max} - максимальная индукция за цикл, f - частота, V - объем тела, n - показатель, меняющийся в диапазоне от 1,6 до 2.
- Другая составляющая потерь связана с вихревыми токами, возникающими в переменных магнитных полях.

$$P_{\text{H}} = \xi B_{\text{max}}^2 \cdot f^2 \cdot V$$

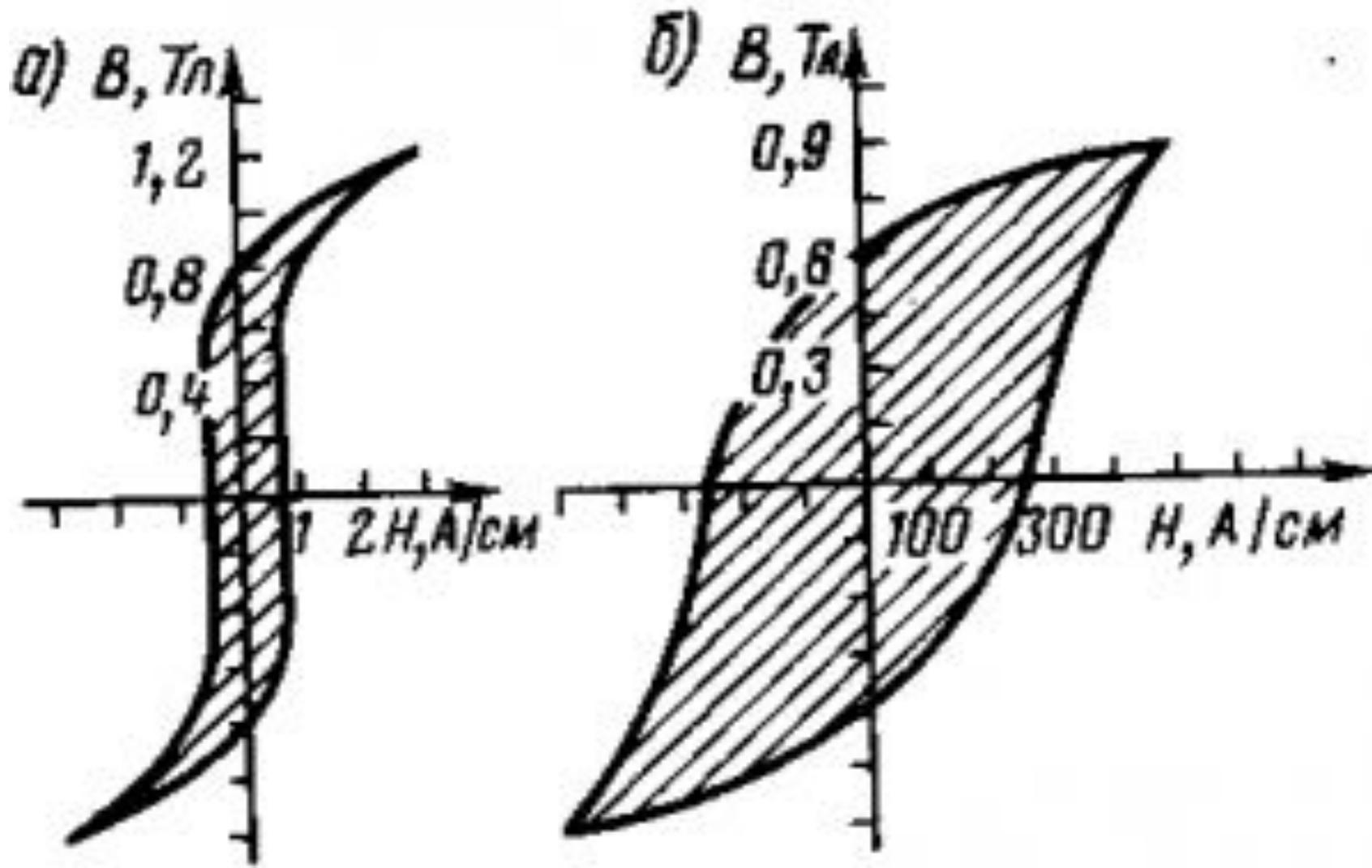
Магнитострикция

- **Магнитострикция** — явление, заключающееся в том, что при изменении состояния намагниченности тела его объём и линейные размеры изменяются.
- Эффект открыт Джоулем в 1842 году и вызван изменением взаимосвязей между атомами в кристаллической решётке, и поэтому свойственен всем веществам.
- Изменение формы тела может проявляться, например, в растяжении, сжатии, изменении объёма, что зависит как от действующего магнитного поля, так и от кристаллической структуры тела.
- Наибольшие изменения размеров обычно происходят у сильномагнитных материалов.
- Относительное удлинение $\Delta l / l$ обычно варьируется в пределах $10^{-5} \dots 10^{-2}$.
- При протекании переменного тока по обмоткам создаётся переменное магнитное поле такой же частоты, которое заставляет ферромагнитные сердечники сжиматься и растягиваться (с частотой 100 Гц для 50 Гц тока или кратных частотах), которые, в свою очередь, передают эти колебания в воздух и другим элементам конструкции, ***обуславливая шум при работе трансформаторов.***

Классификация ферромагнитных материалов

- Все ферромагнитные материалы по поведению в магнитном поле делятся на две группы:
- **Магнитомягкие** – с большой магнитной проницаемостью μ и малой величиной коэрцитивной силы $H_c < 10 \text{ А/м}$.
- Они легко намагничиваются и размагничиваются. Обладают малыми потерями на гистерезис, т.е. узкой петлей гистерезиса.
- Магнитные характеристики зависят от химической чистоты и степени искажения кристаллической структуры.
- Чем меньше примесей (**C, P, S, O, N**), тем выше уровень характеристик материала, поэтому необходимо при производстве ферромагнетика их и оксиды удалять, и стараться не искажать кристаллическую структуру материала.
- **Магнитотвердые** – обладают большой $H > 10 \text{ А/м}$ и остаточной индукцией ($B_0 \geq 0,1 \text{ Тл}$). Максимальное значение $H_c \approx 800 \text{ кА/м}$.
- Магнитотвердым материалам соответствует широкая петля гистерезиса.
- Эти материалы с большим трудом намагничиваются, зато могут несколько лет сохранять магнитную энергию, т.е. служить источником постоянного магнитного поля.
- *Из магнитотвердых материалов изготавливаются постоянные магниты.*

Петли гистерезиса магнитномягких и магнитнотвердых материалов



Классификация ферромагнитных материалов

• По составу все магнитные материалы делятся на:

□ *металлические;*

□ *неметаллические;*

□ *магнитодиэлектрики.*

- *Металлические магнитные материалы* - это чистые металлы (*железо, кобальт, никель*) и магнитные сплавы некоторых металлов.
- К неметаллическим материалам относятся *ферриты*, получаемые из порошков оксидов железа и других металлов.
- Ферриты прессуют и обжигают при 1300 – 1500 °С и они превращаются в твердые монокристаллические магнитные детали.
- Ферриты, как и металлические магнитные материалы, могут быть магнитомягкими и магнитотвердыми.
- *Магнитодиэлектрики* – это композиционные материалы из 60 – 80 % порошка магнитного материала и 40 – 20 % органического диэлектрика.
- Ферриты и магнитодиэлектрики имеют большое значение удельного электрического сопротивления ($\rho = 10 \div 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$).
- Высокое сопротивление этих материалов обеспечивает низкие *динамические потери* энергии в переменных электромагнитных полях и позволяет широко использовать их в высокочастотной технике.

Магнитомягкие магнитные материалы

- Магнитомягкие материалы используются в энергетике в качестве разнообразных магнитопроводов в трансформаторах, электрических машинах, электромагнитах и т.д.
- Для уменьшения потерь на гистерезис выбирают материалы с пониженной коэрцитивной силой, а для уменьшения вихревых токов магнитопроводы собирают из отдельных пластин и используют металлы с повышенным удельным сопротивлением.
- ЭДС самоиндукции, благодаря которой возникают вихревые токи, пропорциональна площади поперечного сечения контура.
- При разделении площади n изолированными пластинами в каждой пластине наводится уменьшенная в n раз ЭДС.
- **Мощность потерь** при протекании вихревого тока **пропорциональна квадрату напряжения (ЭДС)** и обратно пропорциональна удельному сопротивлению.
- Поэтому уменьшение ЭДС в каждой из отдельных пластин и использование металлов с повышенным удельным сопротивлением приводит к уменьшению общих потерь.

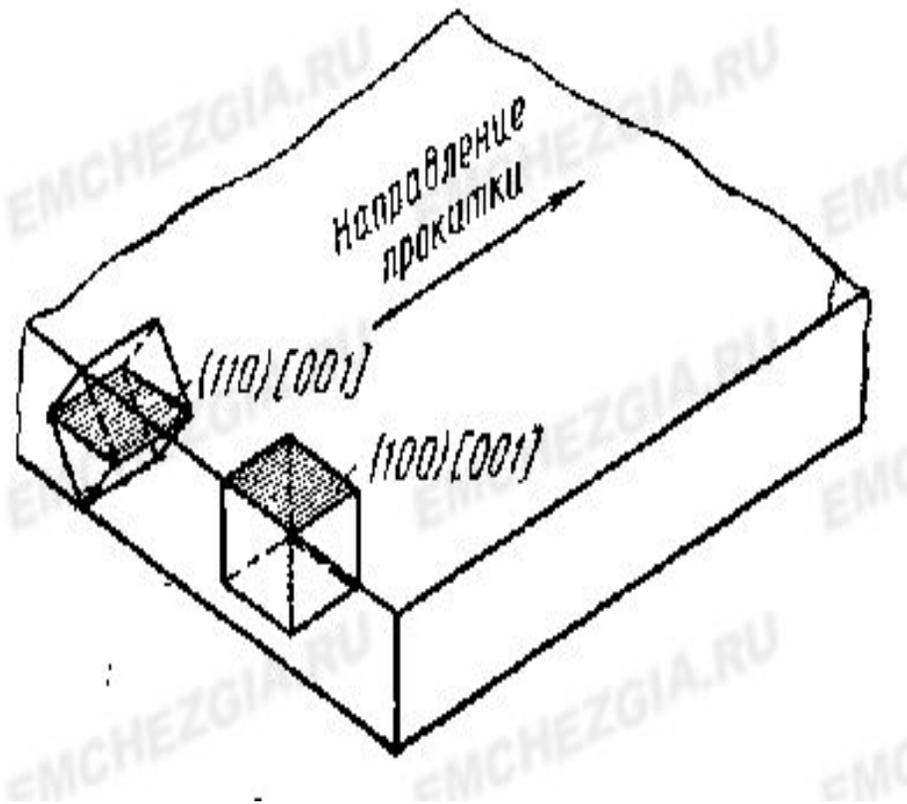
Низкоуглеродистая электротехническая сталь

- Основой наиболее широко используемых в электротехнике магнитных материалов является **низкоуглеродистая электротехническая сталь**.
- Сталь выпускается в виде листов, толщиной от **0,2 мм до 4 мм**, содержит не выше **0,04% углерода** и не выше **0,6% других примесей**.
- Максимальное значение магнитной проницаемости $\mu_{\max} \sim 4000$, коэрцитивной силы **$H_c \sim 65-100$ А/м**.
- Чем чище железо и чем лучше оно отожжено - тем выше магнитная проницаемость и тем ниже коэрцитивная сила.
- Для особо чистого железа эти параметры составляют: более 1 миллиона и менее 1 А/м, соответственно.
- Добавлением в состав кремния достигается повышение удельного сопротивления стали с **0,14 мкОм·м** для нелегированной стали **до 0,6 мкОм·м для высоколегированной стали**.
- Легирование обеспечивает уменьшение магнитных потерь.
- Введение кремния в сталь в количестве, превышающем **4,8 %**, не рекомендуется, так как, способствуя улучшению магнитных характеристик, кремний резко повышает хрупкость стали и снижает ее механические свойства.

Производство электротехнической стали

- Сталь выпускается в виде листов толщиной 0,1; 0,2; 0,35; 0,5; 1,0 мм, шириной от 240 до 1000 мм и длиной от 720 до 2000 мм.
- Выплавляется электротехническая сталь в мартеновских печах.
- Листы изготовляют прокаткой стального слитка в холодном или горячем состоянии, поэтому различают **холодно- и горячекатаную электротехническую сталь**.
- Железо имеет кубическую кристаллическую структуру.
- При исследовании намагничивания оказалось, что оно может быть неодинаково по различным направлениям этого куба.
- Наибольшим намагничиванием кристалл обладает в направлении ребра куба, меньшим - по диагонали грани и самым малым - по диагонали куба.
- Необходимо, чтобы все кристаллики железа в листе выстроились в процессе прокатки в ряды по направлению ребер куба.
- Это достигается повторными прокатками листов стали, с сильным обжатием (до 70%) и последующим отжигом в атмосфере водорода.
- Это способствует очищению стали от кислорода и углерода, а также укрупнению кристаллов и ориентировке их таким образом, чтобы ребра кристаллов совпадали с направлением прокатки.
- Такие стали называются **текстурованными**.
- У текстурованных сталей магнитные свойства по направлению прокатки выше, чем у обычной горячекатаной стали.

- Листы текстурованной стали изготавливаются холодной прокаткой.
- Магнитная проницаемость их выше, а потери на гистерезис меньше, чем у горячекатаных листов.
- Кроме того, у холоднокатаной стали индукция в слабых магнитных полях возрастает сильнее, чем у горячекатаной, т. е. кривая намагничивания в слабых полях располагается значительно выше кривой горячекатаной стали.



Маркировка электротехнических сталей

- Стандартная маркировка листовой электротехнической стали отражает ее назначение, химический состав, технологию изготовления листа и его магнитные свойства.
- Маркировка сталей состоит из четырех цифр:
- **первая цифра – структурное состояние** (1 – горячекатаная изотропная, 2 – холоднокатаная изотропная, 3 – холоднокатаная анизотропная с кристаллографической текстурой направления);
- **вторая цифра – содержание кремния в процентах**: 0 – менее 0,4 %; 1 – 0,4 -0,8 %; 2 – 0,8 - 1,8 %; 3 – 1,8 -2,8 %; 4 – 2,8-3,8 %; 5 – 3,8-4,8 %;
- **третья цифра – основная нормируемая характеристика**, определяющая потери на гистерезис и вихревые токи;
- **четвертая цифра** – порядковый номер стали и уровень нормируемой характеристики (1 – нормальный, 2 – повышенный, 3 – высокий, > 4 – высшие уровни).
- Кремний является единственным элементом, вводимым в трансформаторную сталь с целью улучшения электротехнических свойств железа, поэтому в маркировке отражается его содержание.
- Наличие кремния увеличивает магнитную проницаемость и электросопротивление стали, понижает коэрцитивную силу, уменьшая тем самым потери и на перемагничивание и на вихревые токи.
- Все другие элементы, за исключением фосфора, отрицательно влияют на электротехнические свойства стали.

Электротехническая сталь для трансформаторов

- Одним из основных активных материалов трансформатора является **тонколистовая электротехническая сталь**.
- В течение многих лет для магнитных систем трансформаторов применялась листовая сталь **горячей прокатки** с толщиной **0,5** или **0,35 мм**.
- Качество этой стали постепенно улучшалось, однако удельные потери в ней были высоки.
- Появление в конце 40-х годов прошлого века холоднокатаной текстурованной стали, имеющей значительно *меньшие удельные потери* и более *высокую магнитную проницаемость*, позволило:
 - **увеличить индукцию** в магнитной системе до **1,6-1,65 Тл** против 1,4-1,45 Тл для горячекатаной стали;
 - существенно **уменьшить массу активных материалов** при одновременном уменьшении потерь электрической энергии в трансформаторе.
- Различают листовую и рулонную электротехническую сталь.
- Применение рулонной стали *уменьшает отходы стали* при резке пластин **до 4 - 5 %** по сравнению с отходами листовой стали, составляющими 15—20 %.

Механические свойства электротехнической стали

- Магнитные свойства холоднокатаной стали существенно ухудшаются при различных механических воздействиях:
 - при резке стали на пластины;
 - снятия с них заусенцев;
 - изгибах пластин;
 - случайных ударах при транспортировке;
 - легких ударах при сборке магнитной системы и т. д.
- Особенно сильное ухудшение магнитных свойств происходит при навивке частей магнитной системы из ленты.
- Ухудшение магнитных свойств при этих воздействиях может быть снято восстановительным отжигом при температуре 800 °С, проводимым до начала сборки магнитной системы, а для навитых частей - после навивки.
- Механические воздействия, возникающие после начала сборки, должны быть ограничены путем соответствующей организации транспортировки пластин, осторожного обращения с ними при сборке магнитной системы и т. д.

Аморфная сталь

- Аморфные сплавы - это материалы, имеющие случайную, некристаллическую структуру.
- Такая структура характерна, к примеру, для стекла. Поэтому первоначально аморфная сталь даже именовалась metglass - «металлическое стекло».
- В состав аморфного сплава входят переходные металлы (железо, кобальт и др.) и аморфообразующие элементы (бор, углерод, кремний и др.).
- Аморфная структура сплава получается только при очень высокой скорости охлаждения, достигающей сотен тысяч градусов в секунду.
- Магнитопроводы из аморфных сплавов имеют значительно меньшие удельные магнитные потери по сравнению с аналогами из электротехнической стали, обладают высокой магнитной проницаемостью и индукцией насыщения на высоких частотах.
- Силовые трансформаторы с сердечником из аморфных сплавов долгое время в нашей стране считались оборудованием будущего.
- В июле 2012 г. Группа «Трансформер» приступила к производству опытных образцов распределительных силовых трансформаторов с сердечником из аморфной стали. Главной особенностью таких трансформаторов является их высокая энергоэффективность, достигаемая за счет значительного снижения потерь холостого хода.

- Традиционные технологии, включая шихтовку магнитопровода методом **step-lap**, в свое время позволили снизить потери холостого хода (P_{xx}) на 20-30%.
- Применение же аморфной стали дает возможность совершить настоящий технологический прорыв и **снизить потери холостого хода еще на 75 %**.
- Несмотря на то что аморфная сталь производится уже несколько десятилетий, в том числе в нашей стране, выпуск силовых трансформаторов с применением этого материала долгое время сдерживался рядом экономических и технологических факторов - дороговизной аморфной стали и недостаточной для силовых трансформаторов **шириной аморфной ленты** российских производителей.
- В связи с этим до недавнего времени в нашей стране аморфная лента находила применение лишь в измерительных трансформаторах, для которых ширина до 80 мм является достаточной.
- Развитие технологий позволило зарубежным производителям освоить выпуск ленты шириной до **220 мм**, благодаря чему стало возможно использование этого материала и в распределительных трансформаторах.

- Трансформаторы с сердечником из аморфной стали изготавливаются в США уже на протяжении 30 лет, в Индии - 15 лет, в Китае - около 10 лет. На ранних этапах такие трансформаторы являлись весьма дорогостоящим оборудованием из-за высокой стоимости аморфной стали - порядка 50 долл. США за килограмм.
- В настоящее время зарубежные производители реализуют аморфную сталь уже по цене порядка 3 долл. США за килограмм, что делает применение этого материала в силовых трансформаторах экономически оправданным.
- Единственное ограничение, которое сегодня остается перед российскими производителями, - необходимость значительного изменения технологической цепочки производства трансформаторов и приобретения специального оборудования для их изготовления: аморфная лента является более хрупкой по сравнению с обычной электротехнической сталью, толщина ленты не превышает 20-25 мкм.
- Оценивая экономическую целесообразность применения инновационных энергосберегающих трансформаторов, следует учесть, что в энергосистемах 25-30% технических потерь приходится именно на распределительные трансформаторы.
- При этом постоянную долю потерь в самом трансформаторе составляют потери холостого хода. Таким образом, аморфные трансформаторы дают возможность сберечь значительную долю электроэнергии, расходуемой вхолостую в прямом смысле этого слова. Опыт эксплуатации аморфных трансформаторов за рубежом показал, что увеличение стоимости силовых трансформаторов на 30-35% окупается в течение 3-5 лет в зависимости от региональных тарифов на электроэнергию.

Активный материал обмоток

- В течение долгого времени для обмоток трансформаторов использовалась медь.

- Свойства меди:

- *низкое удельное электрическое сопротивление;*

- *легкость обработки (намотки, пайки);*

- *стойкость по отношению к коррозии;*

- *высокая механическая прочность.*

- В последнее время производится замена медного обмоточного провода в обмотках силовых трансформаторов алюминиевым проводом, имеющим удельное электрическое сопротивление примерно в **1,6 раза больше** удельного сопротивления меди.

- При прямой замене медного провода алюминиевым номинальные токи обмоток, а следовательно, и номинальная мощность трансформатора **должны быть снижены на 21,5 %.**

- В настоящее время все **новые серии трансформаторов** общего назначения мощностью до 16000 кВ•А включительно **проектируются с алюминиевыми обмотками.**

- При переходе на алюминиевые обмотки был решен также ряд задач технологического характера, связанных с технологией намотки алюминиевых обмоток, **пайкой и сваркой алюминия.**

Изоляция обмоточных проводов

- В большинстве масляных трансформаторов применяется обмоточный провод марки **ПБ** (**АПБ** для алюминия) с изоляцией из кабельной бумаги класса нагревостойкости **A** (предельно допустимая температура 105 °С) общей толщиной 0,45—0,50 мм на две стороны.
- Применение провода более высоких классов нагревостойкости (Е, В, F и т.д.), допускающих более высокие предельные температуры, в масляных трансформаторах смысла не имеет, потому что допустимая температура обмоток определяется не только классом изоляции обмоток, но также и допустимой температурой масла, в котором находится обмотка.
- В трансформаторах с воздушным охлаждением широко используют обмоточные провода более высоких классов нагревостойкости В (**130°С**), F (**155 °С**), Н (**180 °С**).
- В сухих трансформаторах может применяться провод тех же марок, что и в масляных.
- Однако при необходимости получения пожаробезопасной установки, а также при расчете обмоток на работу при повышенной температуре обычно применяют провода других марок с изоляцией повышенной нагревостойкости по ГОСТ 7019-80.
- К этим маркам относятся: медный провод марки **ПСД** с изоляцией из стеклянных нитей, наложенных двумя слоями, с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком или компаундом класса нагревостойкости F и марки **ПСДК** с такой же стеклянной изоляцией, но с подклейкой и пропиткой кремнийорганическим лаком класса нагревостойкости Н.

КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗОЛЯЦИИ В ТРАНСФОРМАТОРАХ

- Изоляция, разделяющая части, находящиеся под напряжением, между собой и отделяющая их от заземленных частей, в силовых трансформаторах выполняется в виде конструкций и деталей из твердых диэлектриков:

□ электроизоляционного картона;

□ кабельной бумаги;

□ лакотканей;

□ дерева;

□ текстолита, гетинакса;

□ бумажно-бакелитовых изделий;

□ фарфора и других материалов.

- Части изоляционных промежутков, не заполненные твердым диэлектриком, заполняются жидким или газообразным диэлектриком — трансформаторным маслом в масляных трансформаторах, атмосферным воздухом в сухих трансформаторах.
- В качестве такого диэлектрика иногда применяются и другие жидкости и газы, а также практикуется заливка всего трансформатора компаундом или заполнение кварцевым песком.

Электроизоляционные материалы, используемые в трансформаторах

- Электроизоляционные материалы, применяемые в трансформаторостроении, должны обладать определенными свойствами, из которых наиболее важными являются **электрическая и механическая прочность, гигроскопичность и нагревостойкость**.
- Одним из основных изоляционных материалов является **электрокартон** толщиной от 0,5 до 3 мм. Он обладает хорошими электрическими характеристиками, повышенной масловпитываемостью и механической прочностью. Электрокартон применяется для изготовления различных изоляционных деталей.
- **Кабельная бумага** толщиной 0,12 мм применяется как изоляция между слоями обмоток и для изолирования концов обмоток и отводов.
- **Лакоткань** шелковая и хлопчатобумажная применяется для изолирования концов обмоток и отводов, а также для усиления изоляции отдельных мест обмоток, например в местах паяк проводов.
- **Хлопчатобумажные ленты** применяются для механической защиты изоляции и как вспомогательный крепежный материал.
- **Бумажно-бакелитовые цилиндры** и трубки применяются в качестве каркасов для намотки обмоток (цилиндры) и для изолирования стяжных шпилек магнитопроводов и отводов (трубки).
- **Гетинакс** листовой толщиной до 50 мм используется для изготовления изолирующих досок и панелей, а также деталей конструкции переключающих устройств.
- **Фарфор и полимеры** применяется для изготовления проходных изоляторов (вводов) и некоторых изоляционных деталей сухих трансформаторов.

Трансформаторное масло

- Главным изоляционным материалом в силовых трансформаторах является трансформаторное масло - жидкий диэлектрик, сочетающий высокие изоляционные свойства со свойствами активной охлаждающей среды и теплоносителя. Только благодаря трансформаторному маслу удалось создать трансформаторы с рабочим напряжением 500, 750 и 1150 кВ.
- В отличие от других изоляционных материалов один и тот же объем масла не может использоваться в течение всего срока службы трансформатора, т. е, не менее 25 лет.
- При эксплуатации трансформатора вследствие окисления при повышенной температуре (до 95 °С) и при каталитическом воздействии присутствующих в масле металлов и твердых изоляционных материалов масло стареет, т.е. ухудшает свои качества и требует систематического ухода - сушки, фильтрации, очистки и смены.
- Существенное удлинение срока службы масла между сменами достигается тем, что основная масса трансформаторного масла содержит антиокислительную присадку, повышающую стабильность масла против окисления - один из основных показателей качества масла.