

Тема

4

Аморфные и нанокристаллические сплавы.
Общая характеристика электротехнических сталей. Классификация, основные свойства, назначение. Удельные магнитные потери при перемагничивании на примере электротехнической анизотропной стали

Подготовил,
к.т.н.
Редикульцев

А.А.

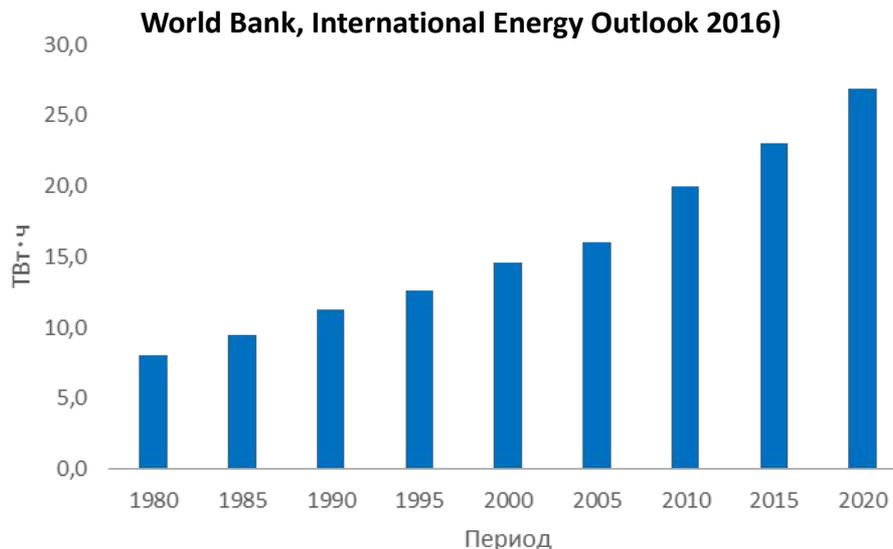
Екатеринбург
2018

Тенденции развития энергетики и энергетического машиностроения

- Ежегодный мировой прирост потребления электроэнергии в 2016-2022 прогнозируется на уровне 2,1%, ключевыми факторами являются рост населения и урбанизация.
- Ключевые регионы роста - Индия и Китай
- Рост спроса на электроэнергию будет стимулировать потребность в электроэнергетическом оборудовании.
- Другие факторы:
 - необходимость повышения эффективности энергетической инфраструктуры в соответствии с новыми стандартами по энергоэффективности Европы и США
 - замещение мощностей генерации электроэнергии от традиционных источников (ископаемые источники и атомная энергетика) на возобновляемые (ветер, солнце и проч.).

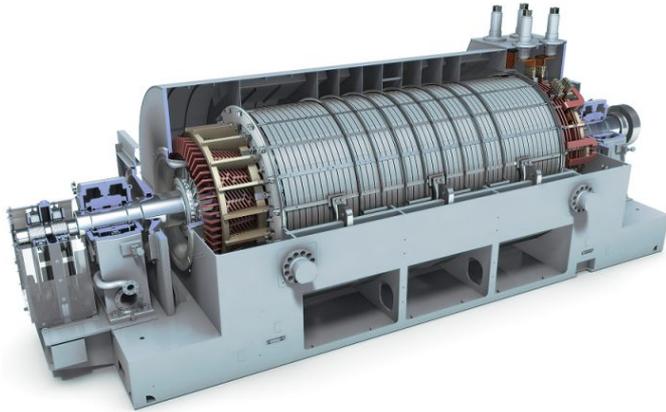
- Несмотря на то, что в последние тридцать лет производство электроэнергии удвоилось, неравномерность ее потребления сохранилась, что является стимулом для наращивания мощностей генерирующих компаний, а также средств для передачи, распределения и потребления энергии главным образом в густонаселенных развивающихся регионах.

Оценка потребления электроэнергии в мире (Источник:



Регион	кВт·ч/чел в год	
	2015	2040
Северная Америка	13230	16552
Китай	3927	6602
Европа	3083	4585
Юго-восточная Азия	~ 3000	4585
Африка	2906	5657
Южная Америка	2122	3234
Индия	805	1813
Мир	3144	4675

Производство, преобразование и передача электроэнергии



Преобразование механической или тепловой энергии в электрическую энергию (генерация). Большинство генераторов переменного тока используют вращающееся магнитное поле. Принцип действия генератора основан на законе электромагнитной индукции – индуцирование электродвижущей силы в прямоугольном контуре (проволочной рамке), находящейся в однородном вращающемся магнитном поле.

Чем больше количества энергии необходимо передать и чем больше расстояние, тем выше должно быть напряжение. Трансформатор – аппарат, который преобразует или трансформирует электрическую энергию с одного напряжения на другое. Значительная часть энергии теряется в самом железном сердечнике, так как перемагничивание сердечника требует ее затраты. Поэтому сердечник должен делаться из специальной стали в виде тонких листов.



Электрический двигатель (электромеханический преобразователь) – электрическая энергия преобразуется в механическую. В основу работы любой электрической машины положен принцип электромагнитной индукции. Электрическая машина состоит из неподвижной части – статора или индуктора (для машин постоянного тока) и подвижной части – ротора или якоря (для машин постоянного тока).

Производство, преобразование и передача электроэнергии

- В основу работы электрических машин положен принцип электромагнитной индукции. Всякое изменяющееся магнитное поле вызывает в проводниках, находящихся в этом магнитном поле, напряжение и при замкнутой цепи – электрический ток. Таким образом в таких устройствах должен использоваться хороший проводник магнитного потока (магнитопровод из ферромагнитного материала).

- Требования к материалам для устройств преобразующих электромагнитную энергию:
 1. **Легкость намагничивания и перемагничивания (т.е. высокие значения магнитной проницаемости);**
 2. **Высокие значения магнитной индукции;**
 3. **Минимальные потери при перемагничивании.**

Выполнение первых двух требований определяет размеры и вес электрических обмоток и магнитопроводов. Минимальные потери на перемагничивание определяют КПД устройств и их рабочую температуру.

- Для минимизации потерь используют **магнитомягкие** ферромагнитные материалы:

- с высокой и узкой петлей гистерезиса;
- с минимальным количеством дефектов кристаллического строения;
- с высоким электрическим сопротивлением R , которое обеспечивается высоким удельным электросопротивлением ρ и малой толщиной h (набор из тонких пластин, изолированных друг от друга);
- благоприятной текстурой.



Магнитомягкие материалы

Петля гистерезиса малой площади

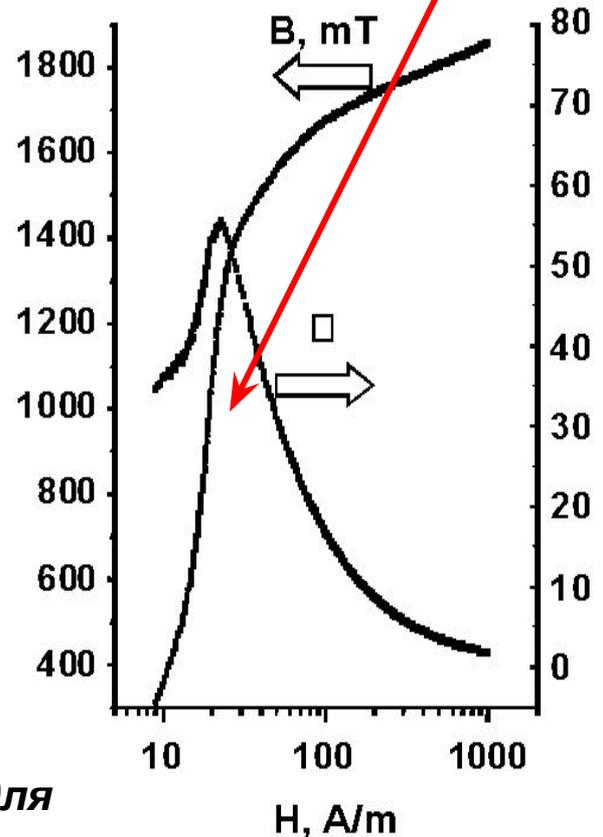
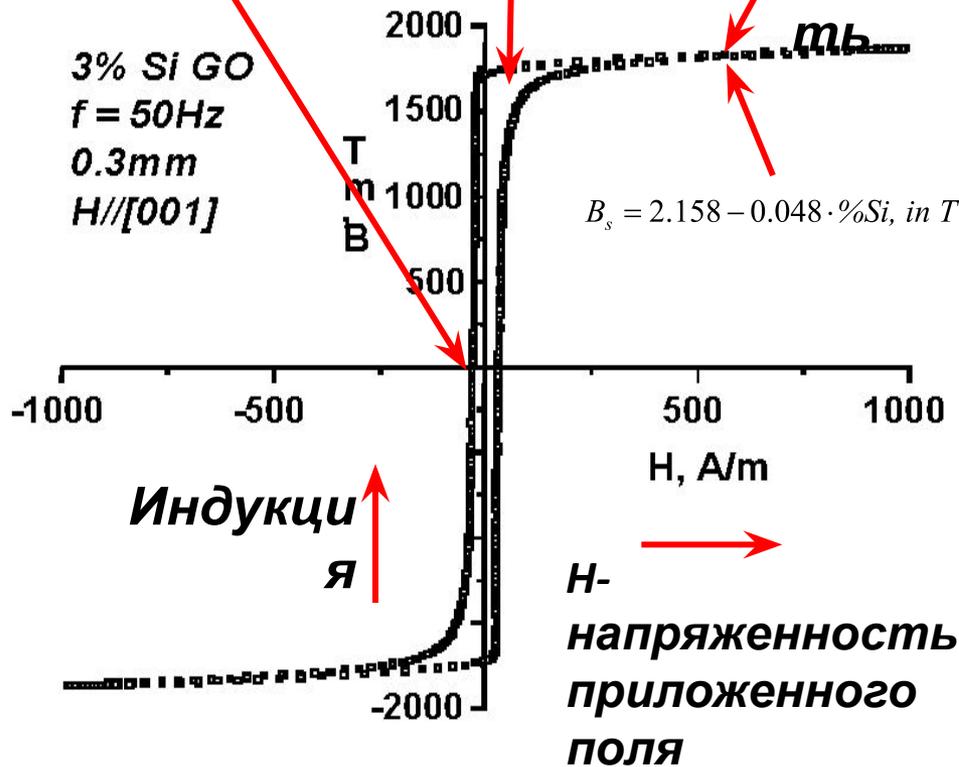
Легкое намагничивание в слабых полях

Малая коэрцитивная сила H_c

Большая намагниченность насыщения

Намагниченность

3% Si GO
 $f = 50\text{Hz}$
0.3mm
 $H // [001]$



Кривая намагниченности и проницаемости для ЭАС

- Следуя общемировой тенденции индустриализации развивающихся стран: энергетическое машиностроение будет прирастать, главным образом, в азиатских странах (Китай, Индия, Тайвань, Таиланд, Вьетнам, Индонезия).
- В 2011 году, на долю азиатских стран приходилось более 60 % производства трансформаторов, генераторов и другого оборудования, используемого при строительстве объектов энергетики, что является гарантией ускоренного сокращения отставания этих стран во всех сферах деятельности. В перспективе эти тенденции будут нарастать, тем более, что страны Юго-Восточной и Восточной Азии оснащены современным энергооборудованием и технологически вполне современны.
- В период 2007-2012 гг. в Китае, Японии, Южной Корее введены дополнительные мощности по производству электротехнической анизотропной стали на 350-400 тыс. тонн в год и электротехнической изотропной стали на 2-2.5 млн. тонн в год. В настоящее время (2012 год) на азиатском континенте производится до 62 % электротехнических сталей и в ближайшие два-три года ожидается ввод новых мощностей.

- Центральной проблемой дальнейшего развития энергетики является проблема энергосбережения, как на стадии выработки электроэнергии, так и в процессе ее использования. Сейчас в магнитопроводах электрооборудования теряется до 7 % вырабатываемой энергии, что в мировых масштабах составляет ~ 1.5 млн. ГВт в год. Из них:
 - ~ 15 % – генерация,
 - ~ 20 % – передача,
 - ~ 25 % – распределение,
 - ~ 40 % – потребление электроэнергии.
- Разработка и применение магнитомягких материалов с пониженными удельными потерями в энергомашиностроении остается сейчас одним из основных способов энергосбережения.
- В настоящее время наиболее распространенными материалами для изготовления магнитопроводов электрических машин (генераторов и электродвигателей) и трансформаторов являются электротехнические стали.

Аморфные и нанокристаллические сплавы

1) Аморфные сплавы на основе железа (рассмотрены далее);

2) Аморфные сплавы на железоникелевой основе

- Уменьшена магнитострикция и уменьшена индукция насыщения по сравнению со сплавами на основе железа;
- Свойства являются промежуточными между свойствами сплавов на основе железа и на основе кобальта;
- Низкие потери, высокая максимальная проницаемость, низкая коэрцитивная сила при высоких частотах (более 10 кГц);
- Применение обусловлено высокими динамическими магнитными свойствами при частотах выше 100 кГц и хорошими статическими гистерезисными свойствами, сравнимыми со свойствами пермаллоев.

3) Аморфные сплавы на основе кобальта

- Близость к нулю магнитострикции насыщения (вводится Fe, Mn), высокая магнитная проницаемость в слабых полях (лучше пермаллоев);
- Недостатком является пониженная индукция насыщения (0,5-0,6 Тл). Для повышения индукции используют легирование Cr, V, Nb, Mo. Путем подбора ТО удается поднять индукцию насыщения до 1 Тл;
- Сплав $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{V}_2\text{Si}_8\text{B}_{20}$ – $B_s = 0,7$ Тл, $\mu_0 = 120000$, $\mu_{\max} = 1070000$, $H_c = 0,04$ А/м;
- Применение обусловлено высокими магнитными и перминварными (малой зависимостью магнитной проницаемости μ от напряжённости поля) свойствами при высоких частотах.

4) Нанокристаллические магнитомягкие сплавы (рассмотрены далее).

Аморфные и нанокристаллические сплавы

- Металлические стёкла (метглассы) – металлические твердые тела с аморфной структурой, то есть тела, характеризующиеся наличием ближнего порядка в расположении атомов. В отличие от металлов с кристаллической структурой, аморфные металлы характеризуются фазовой однородностью, их атомная структура аналогична атомной структуре переохлаждённых расплавов.
- Исследование аморфных металлов восходит к 1960 г., когда в Калифорнийском технологическом институте группой под руководством профессора Pol Duwez было получено металлическое стекло $Au_{75}Si_{25}$. К началу текущего столетия аморфные материалы превратились в совершенно новый класс металлических сплавов, годовые объёмы производства и применения которых измеряются тысячами тонн. Отмеченный прогресс обусловлен, прежде всего, высоким уровнем и/или уникальными сочетаниями целого ряда структурно-зависящих физических свойств (прежде всего магнитных и механических) сплавов в предельно разупорядоченном структурном состоянии.
- Физические и химические свойства металлов в аморфном состоянии существенно отличаются от их свойств в кристаллическом состоянии. По всей видимости, эти особенности металлических стёкол связаны с их высокой микроскопической однородностью, то есть отсутствием дефектов структуры типа межзеренных границ, дислокаций и т.п. Детальная теория, объясняющая свойства и явления в металлических стёклах к настоящему времени не развита, и является предметом научных исследований. Несмотря на достаточно большое количество известных в настоящее время химических композиций аморфных металлических стекол не ослабевает интерес к разработке новых или оптимизации состава известных.

Аморфные и нанокристаллические

сплавы

- Ряд металлических стёкол отличается очень высокой прочностью и твёрдостью. В аморфных сплавах на основе элементов подгруппы железа (Fe, Co, Ni) твёрдость HV может превышать 1000 Гн/м², прочность – 4 Гн/м². Вместе с этим металлические стёкла обладают очень высокой вязкостью разрушения: например, энергия разрыва Fe80P13C7 составляет 110 кДж/м², тогда как для стали X-200 значение этого параметра 17 кДж/м².
- В аморфных сплавах предел текучести близок к теоретически возможному значению $G/30$ (где G – модуль сдвига). Известно, что прочность кристаллических металлов значительно меньше их теоретически возможных значений, что связано с наличием в реальных кристаллах дислокаций – элементарных носителей пластической деформации. В аморфной структуре фактически нет дислокаций, по крайней мере, в том виде, в котором они вводятся для кристаллической решетки. Кроме того, в аморфных сплавах предел текучести и временное сопротивление разрушению (предел прочности на разрыв) практически равны между собой, ввиду отсутствия деформационного упрочнения. Несмотря на высокий уровень механических свойств, металлические стёкла не используются в качестве ответственных деталей конструкций по причине их высокой стоимости и технологических сложностей.
- В силу повышенной пластичности аморфных металлических материалов по сравнению с обычным стеклом большую их часть можно прокатывать при комнатной температуре. Среди других особенностей металлических стекол можно отметить слабое поглощение звука, каталитические свойства.
- Одним из важных преимуществ аморфных металлических сплавов является их исключительно высокая коррозионная стойкость, которая у некоторых металлических стекол на несколько порядков выше, чем у лучших нержавеющих сталей. Во многих агрессивных средах (морской воде, кислотах) металлические стекла вообще не корродируют. Бездефектная структура аморфного сплава передается образующейся на его поверхности в начале коррозионного процесса тонкой окисной пленке, которая в дальнейшем защищает металл.

Аморфные и нанокристаллические сплавы

- Сопротивление аморфных металлов составляет, как правило, 100-300 мкОм·см, что значительно выше сопротивления кристаллических металлов. Кроме того, сопротивление разных металлических стёкол в определённых температурных диапазонах характеризуется слабой зависимостью от температуры, а иногда даже убывает с увеличением температуры. При анализе особенностей сопротивления аморфных металлов выделяют 3 группы: простой металл – простой металл (менее 100 мкОм·см, с ростом температуры сопротивление может как возрасти, так и убывать); переходный металл – металлоид (100-200 мкОм·см, температурный коэффициент сопротивления поначалу положительный, а когда сопротивление достигает ~150 мкОм·см, становится отрицательным); переходный металл – переходный металл (200 мкОм·см, с увеличением температуры сопротивление уменьшается).
- Термостабильность металлических стёкол характеризуют так называемой температурой кристаллизации $T_{крис}$ (при которой отжиг в течение одного часа приводит практически к полной кристаллизации образца). $T_{крис}$ варьируется в пределах 300-1000 К (для наиболее распространённых стёкол 600-800 К). Металлические стёкла практически стабильны при $T \leq T_{крис} - 200$ К.
- До настоящего времени ведутся работы по созданию металлических материалов, реализация аморфного состояния в которых предполагает пониженные скорости охлаждения, что делает возможным получение из них массивных изделий.
- Важно подчеркнуть, что все технологии получения аморфных материалов в своей основе предполагают сверхвысокие скорости охлаждения, для «замораживания» атомов в метастабильной структуре, не имеющей дальнего порядка. Реализация подобных скоростей, особенно для массивных образцов, создает большие трудности при промышленном производстве. Также очевидная нестабильность аморфных металлических материалов при нагреве существенно ограничивает область их применения.

Магнитомягкие аморфные и нанокристаллические сплавы

- К особому классу магнитомягких материалов, которые в настоящее время интенсивно развиваются, относятся сплавы с аморфной структурой. В этих сплавах нет границ зерен, субзерен; отсутствует кристаллическое строение и кристаллографическая анизотропия, обусловленные дальним порядком в расположении атомов в кристаллической решетке. Термодинамическое состояние сплавов с аморфной структурой неустойчивое, при их нагреве может происходить частичная или полная кристаллизация метастабильной аморфной структуры.
- Носителями ферромагнетизма в сплавах с аморфной структурой, в которых концентрации элементов Fe, Co, Ni > 40-50 атом. %, являются локальные магнитные моменты атомов элементов с недостроенным 3-d электронным слоем. По химическому составу такие сплавы разделяют на железные, железоникелевые и кобальтовые.

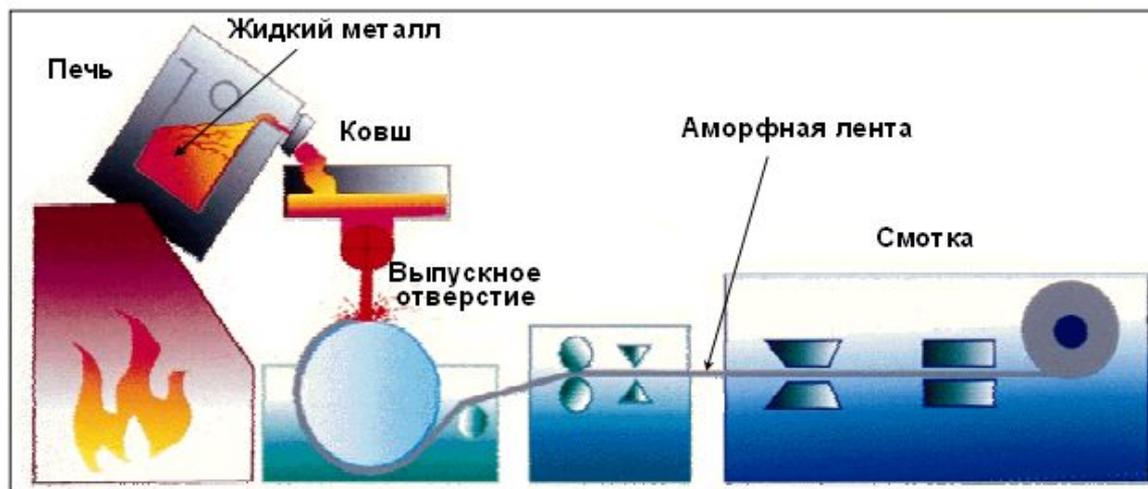
Получение

Способы получения аморфного состояния материала могут быть отнесены к одной из следующих групп:

1. Закалка из жидкого состояния (спиннингование расплава, центробежная закалка, метод выстреливания, метод молота и наковальни, вытягивание расплава в стеклянном капилляре и др.);
2. Закалка из газовой фазы (вакуумное напыление, ионно-плазменное распыление, химические реакции в газовой фазе и др.);
3. Аморфизация кристаллического тела при высокоэнергетических воздействиях (облучение частицами поверхности кристалла, лазерное облучение, воздействия ударной волны, ионная имплантация и др.);
4. Химическая или электрохимическая металлизация.

Спиннингован ие

- В практике получения аморфных магнитомягких сплавов наибольшее распространение получила быстрая закалка расплава методом спиннингования. Этим методом получают аморфные ленты путем заливки расплава на поверхность быстровращающегося цилиндрического валка из металла с высокой теплопроводностью.
- Чем больше скорость вращения валка (обычно 30-50 м/с) и чем тоньше лента (10-60 мкм), тем выше скорость охлаждения расплава и легче получить аморфную структуру. Типичные значения скорости охлаждения составляет 10^4 - 10^6 К/с.
- В ряде случаев для получения наведенной магнитной анизотропии и оптимальных магнитных свойств ленту подвергают отжигу в магнитном поле определенного направления.



Аморфизация

- Для получения аморфного состояния при больших скоростях охлаждения сплав должен содержать достаточное количество элементов-аморфизаторов. К аморфизаторам относят некоторые неметаллы (*B, Si, P, C*), а также некоторые металлы (*Zr, Cu, Hf* и др.).
- С одной стороны аморфообразующие элементы приводят к снижению температуры Кюри и магнитной индукции насыщения. С другой стороны, аморфообразующие элементы увеличивают (в 3 раза) электрическое сопротивление, тем самым способствуют значительному (до 10 %) снижению вихретоковой составляющей потерь на перемагничивание.
- Наряду с этим, аморфообразующие элементы повышают твердость, прочность и коррозионную стойкость. Тем самым, их можно подвергать холодной прокатке, штамповке, навивке в рулоны и т.п.

Спиннингован ие

- На рис. показана схема производства аморфной ленты методом спиннингования в компании «Hitachi Metglas». Лента сматывается на 5 предварительных моталок (поочередно, по мере заполнения предыдущих). Затем лента с моталок сматывается в 5 слоев на конечную моталку. После смотки производится порезка ленты и шихтовка пакетов. Шихтованные пакеты собираются в готовый сердечник, который проходит контроль заданных характеристик. Отметим, что технологические линии по производству аморфных сплавов достаточно компактны и, в отличие от линий по производству кремнистых сталей, не требуют огромных производственных помещений (цехов).

Спиннинговое

ие

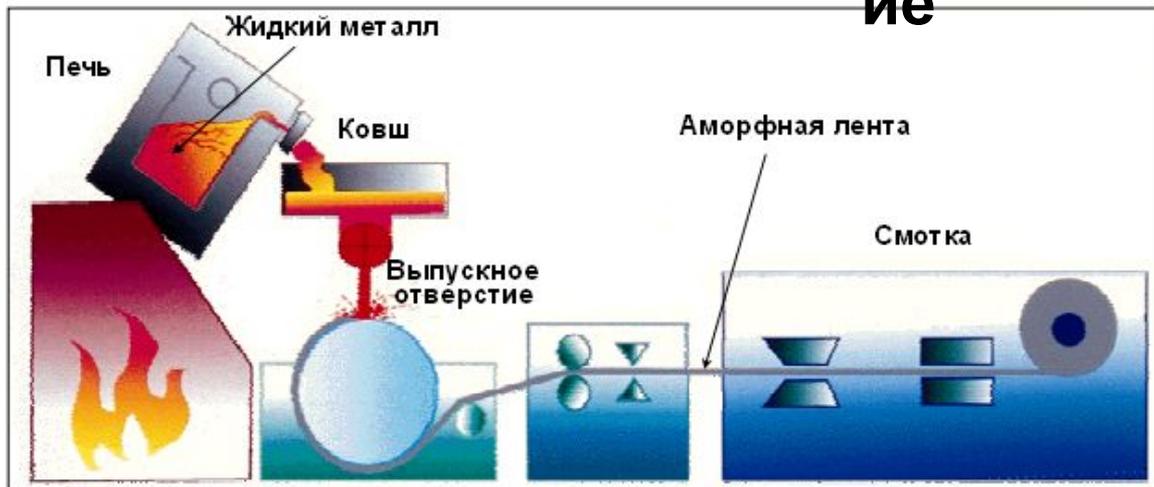


Схема производства аморфных сплавов

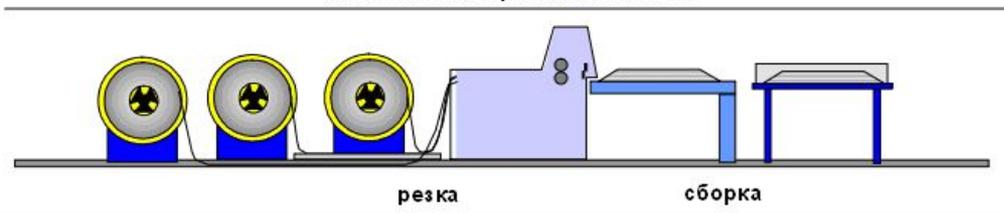
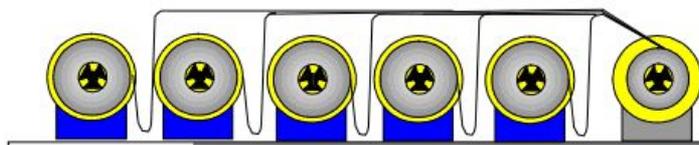
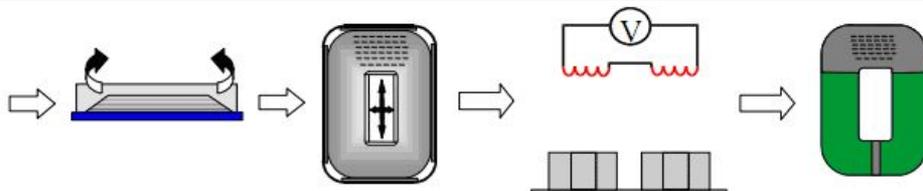
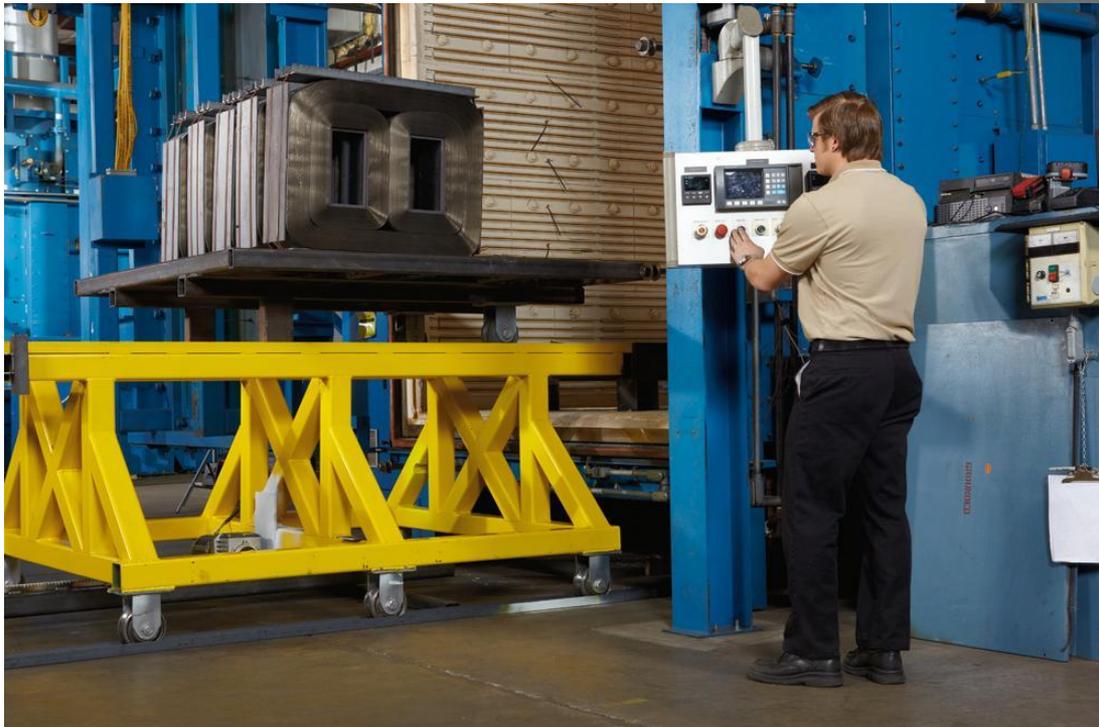


Схема производства сердечников из аморфной ленты





- Свойства современных аморфных сплавов для сердечников распределительных трансформаторов представлены в таблице (сплавы компании «Hitachi Metglas»). Отмеченные сплавы выпускаются в толщине 25 ± 5 мкм, ширина ленты достигает 214 мм, коэффициент заполнения $\geq 84\%$.

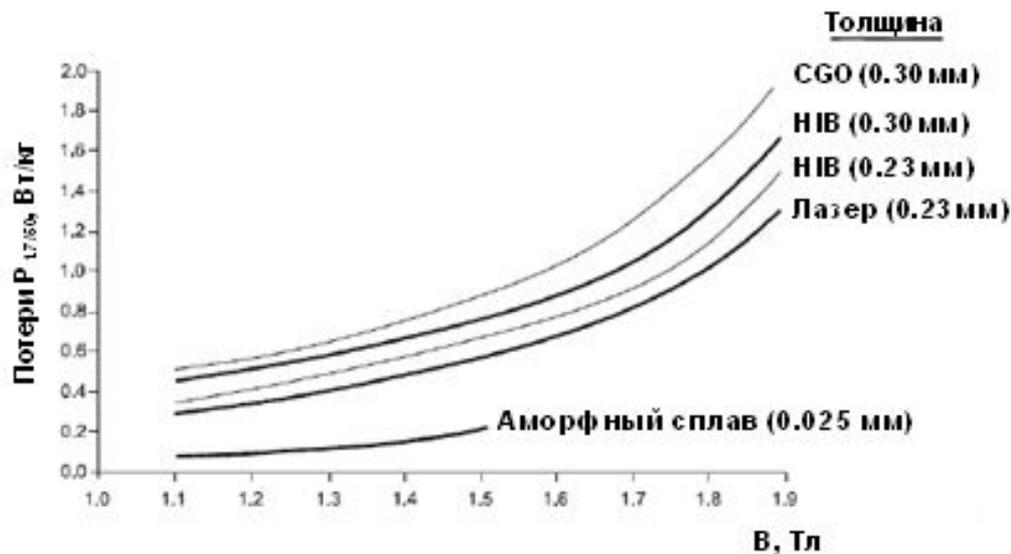
Таблица

Типичные свойства аморфных сплавов «Hitachi Metglas»

Сплав Metglas	Индукция насыщения, Тл	Электросопротивление, мкОм	Магнитострикция насыщения ($\times 10^{-6}$)	Температура Кюри, °С
2605HB1M	1.63	1.2	27	364
2605SA1	1.56	1.3	27	395

Преимущества

- К основным функциональным преимуществам аморфных материалов можно отнести:
 - легкое намагничивание (низкая коэрцитивная сила, высокая проницаемость);
 - низкие магнитные потери (низкая коэрцитивная сила, высокая проницаемость, высокое сопротивление);
 - быстрая обратимость магнитного потока (как результат низкие магнитные потери).



Зависимость электромагнитных потерь от величины индукции для различных магнитных материалов

Таким образом, в ряде случаев, изделия из аморфной ленты уже сейчас значительно превосходят аналогичные изделия из классической ЭАС.

Недостатки

- Большие трудности при промышленном производстве массивных образцов (создание сверхвысоких скоростей охлаждения, для «замораживания» атомов в метастабильной структуре, не имеющей дальнего порядка).
- Нестабильность аморфных металлических материалов при нагреве существенно ограничивает область их применения.
- Низкая индукция насыщения. Это требует увеличения массы медных обмоток сердечников и увеличения габаритов готовых изделий.
- Высокое значение магнитострикции, приводящее к возрастанию шумовых характеристик трансформаторов.

- Аморфные сплавы обладают низкой индукцией насыщения, что требует увеличения массы медных обмоток сердечников и увеличения габаритов готовых изделий. К настоящему времени (2017 г.), за счет варьирования химического состава и термических обработок, удалось достигнуть значения магнитной индукции – 1.64 Тл, что расширяет возможности применения данного класса материалов в трансформаторостроении.

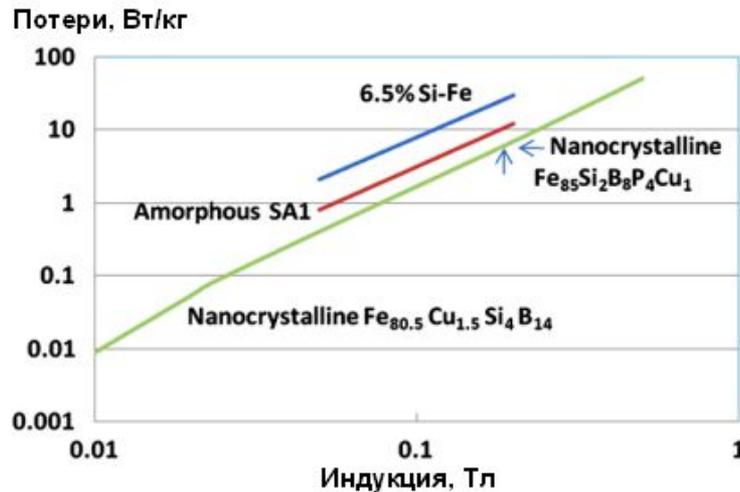
- Еще одним существенным недостатком аморфных сплавов является высокое значение магнитострикции, приводящее к возрастанию шумовых характеристик трансформаторов. Однако, при существующей тенденции по уменьшению рабочих индукций (где различия в магнитострикции минимальны) и габаритов трансформаторов, различия в шуме между сердечниками из аморфных сплавов и ЭАС будут все менее заметны. Таким образом, в ряде случаев, изделия из аморфной ленты уже сейчас значительно превосходят аналогичные изделия из классической ЭАС.

Нанокристаллические магнитомягкие сплавы

- Уникальное сочетание магнитных свойств получается в нанокристаллических сплавах со смешанной аморфно-кристаллической структурой и размером зерен несколько нанометров. Такие сплавы состоят из кристаллитов твердого раствора кремния в α -Fe, и аморфной фазы, образующей тонкую, в несколько атомных слоев, оболочку вокруг кристаллитов α -Fe (Si). Подобная структура образуется при кристаллизации исходного аморфного сплава в результате отжига при определенной температуре.
- Наиболее распространенные системы: *Fe-Cu-Nb-Si-B* и *Fe-M-B* (M=Zr, Nb, Hf, Ta).
- Близость к нулю магнитострикции и константы магнитной анизотропии приводит к исключительно высокой начальной проницаемости нанокристаллических сплавов, на уровне аморфных кобальтовых сплавов и пермаллоев, при сохранении повышенных значений индукции насыщения, свойственных аморфным сплавам на основе железа.

Нанокристаллические магнитомягкие сплавы

После отжига данные сплавы оказываются достаточно хрупкими и находят основное применение в высокочастотных устройствах. На рис. показана зависимость электромагнитных потерь от величины индукции при частоте 10 кГц для кристаллического 6.5% Si-Fe, аморфного на основе железа и нанокристаллического сплавов.



Электромагнитные потери в зависимости от индукции при частоте 10 кГц для кристаллического 6.5% Si-Fe, аморфного на основе железа и нанокристаллического сплавов

- В 2017 году объем производства данных видов продукции в мире составил ~ 200 000 тонн.
- В настоящее время лидером по производству аморфных и нанокристаллических сплавов является компания «Hitachi Metglas».
- Более 40 заводов занимаются производством данного вида продукции.
- Основной сегмент применения аморфных сплавов в массовом трансформаторостроении это: однофазные масляные трансформаторы мощностью до 500 кВА; трехфазные масляные трансформаторы мощностью до 5000 кВА; трехфазные стержневые трансформаторы мощностью до 3000 кВА; трехфазные сухие трансформаторы мощностью до 150 кВА.
- Как видно, изделия из аморфных и нанокристаллических материалов очень интенсивно развиваются и начинают составлять серьезную конкуренцию изделиям из электротехнической стали на массовом рынке. Основным препятствием в развитии данного класса материалов следует считать инерционность основных производителей электротехнического оборудования и длительные сроки окупаемости изделий в электроэнергетике.

Электротехнические стали. Историческая справка

1900 г. Германия.

Открытие положительного влияния кремния на удельные потери в стали (Гадфильд).

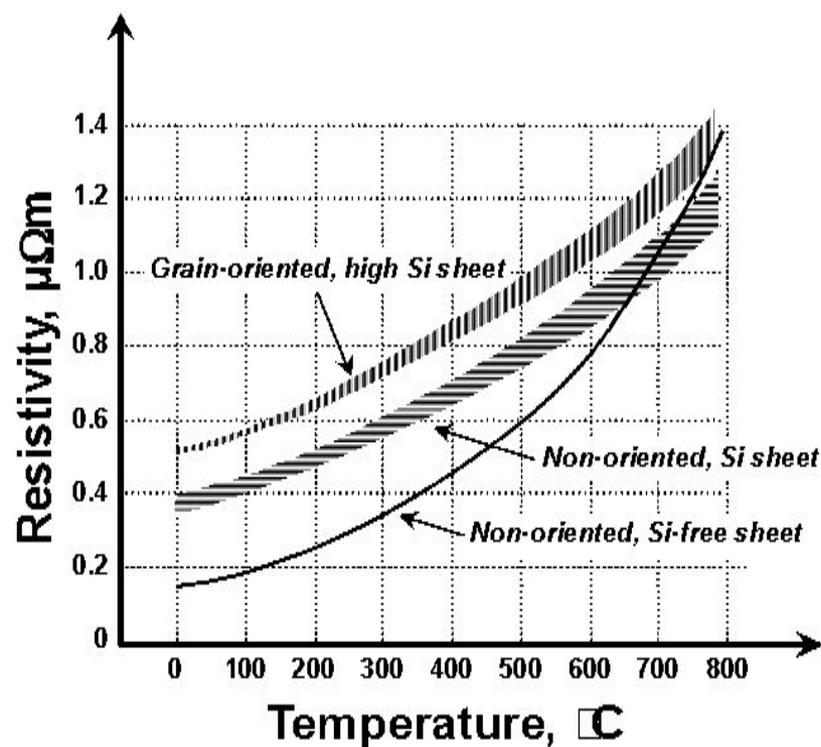
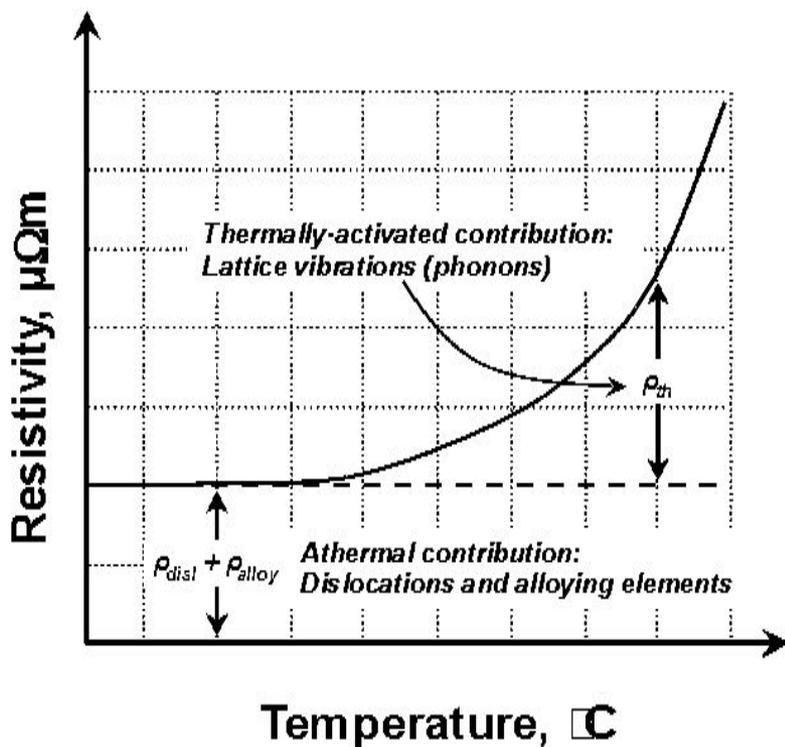
$$\rho = 13.25 + 11.3 * (\text{мас. \% Si}) [\text{мкОм} * \text{см}]$$

1903 г. Германия.

Начало промышленного производства электротехнической кремнистой стали как магнитно-мягкого материала.



Электротехнические стали



Схема, показывающая температурную зависимость удельного сопротивления для металлов (слева):

Атермический вклад обусловлен дефектами решетки, легирующими элементами и дислокациями.

Зависимый от температуры вклад обусловлен фононами, т.е. колебаниями решетки.

Температурная зависимость удельного сопротивления для различных типов Si-сталей (справа).

Электротехнические стали. Историческая справка

No. 745,829.

Patented December 1, 1903.

UNITED STATES PATENT OFFICE.

ROBERT A. HADFIELD, OF SHEFFIELD, ENGLAND.

MAGNETIC COMPOSITION AND METHOD OF MAKING SAME.

SPECIFICATION forming part of Letters Patent No. 745,829, dated December 1, 1903.

Application filed June 12, 1903. Serial No. 161,228. (No specimens.)

To all whom it may concern:

Be it known that I, ROBERT ABBOTT HADFIELD, a subject of the King of Great Britain, and a resident of Sheffield, county of York, England, have invented certain new and useful Improvements in Magnetic Compositions and Methods of Making the Same, of which the following is a specification.

My invention relates to material having magnetic and electrical properties suitable for use in various electrical apparatus, such as ballast-coils, transformer-plates, and the like.

The object of my invention is to produce an improved material of this character having

and low hysteresis for efficient use in transformers and other electrical apparatus in which said qualities are useful.

I have found that the superior qualities of my improved material of alloy can be still further enhanced by a treatment involving alternate heating and cooling and generally carried out as follows: I first heat the material to between about 900° and 1,100° centigrade and allow it to cool, preferably quickly. Then I reheat the material to between about 700° and 850° centigrade—that is, to a temperature lower than the one attained during the first heating—and then allow the metal to cool very slowly. In practice the cooling has been

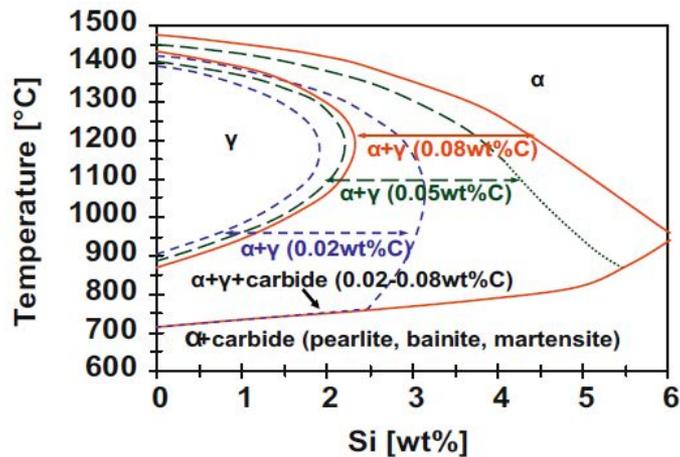
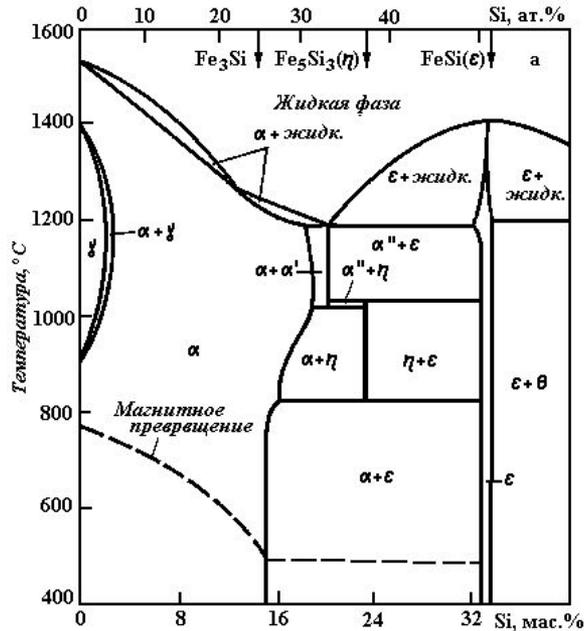
Электротехнические стали. Историческая справка

- Кремнистая электротехническая сталь была получена впервые в 1900 г. в результате использования результатов научных исследований, которые проводили Е. Гумлих (E. Gumlich) в Германии, а также В. Баррет (W.F. Barret), В. Браун (W. Brown) и Р. Гадфилд (R.A. Hadfield) в Великобритании. Было обнаружено, что легирование сплавов на основе железа кремнием существенно повышает удельное электрическое сопротивление материала, и, как следствие, уменьшает потери при перемагничивании на вихревые токи и гистерезис. Производство кремнистой стали, как магнитомягкого материала началось вначале в 1903 г. в Германии. В том же году Р. Гадфилд получил патент, по лицензии которого в США в 1906 г. было начато промышленное производство стали содержащей до 3 мас. % Si.
- Первоначально листы кремнистой стали производились методом многократной горячей прокатки от толщины слитка до конечного размера (в лучшем случае до ~ 0.4 мм). Подобный материал назывался горячекатаной электротехнической сталью. Улучшение свойств сталей происходило главным образом за счет снижения содержания углерода, повышения концентрации кремния, увеличения температуры отжига, а также совершенствования способа выплавки .

Электротехнические стали. Историческая справка

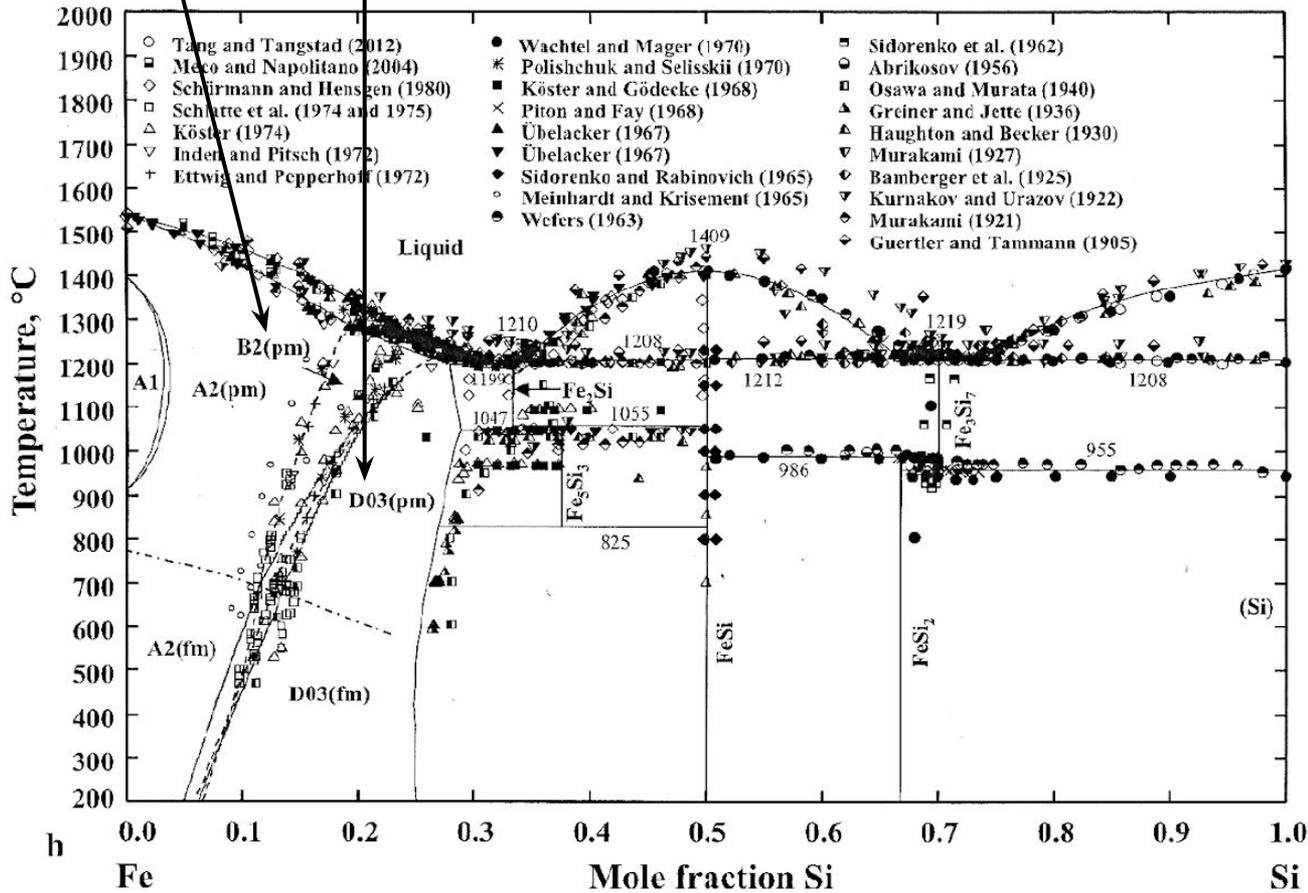
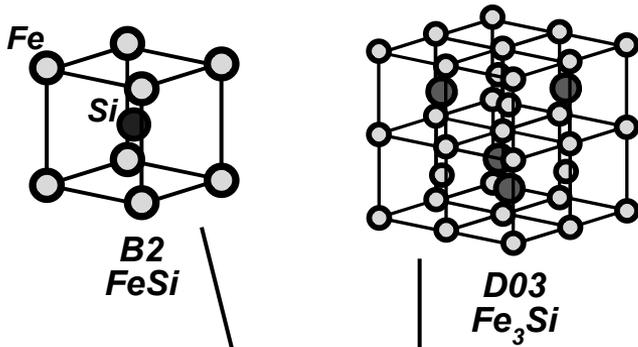
- С момента промышленного использования кремнистых сталей в качестве материала магнитопроводов историю их развития можно рассматривать как историю снижения удельных потерь. Лучшая горячекатаная электротехническая сталь с содержанием кремния до 5 мас. %, толщиной 0.36 мм, производимая в начале двадцатого, века характеризовалась уровнем $P_{1.0/60} \sim 2.2-4.4$ Вт/кг. Такая сталь покрывалась противосварочным покрытием и отжигалась в стопах при температуре 1100°C и выше в течение продолжительного времени. К 1925 г. величина потерь ($P_{1.0/60}$) в горячекатаной промышленной листовой стали снизилась примерно до ~ 1.5 Вт/кг. Развитие технологии холодной деформации привело к замене горячекатаных листов, используемых для производства магнитопроводов двигателей, на холоднокатаную кремнистую сталь. К настоящему времени в лучших марках холоднокатаной ЭИС достигнут уровень потерь по точке $P_{1.5/50}$ менее 2.0 Вт/кг ($P_{1.0/60} = 1.15$ Вт/кг) для толщины 0.35 мм.

Влияние кремния

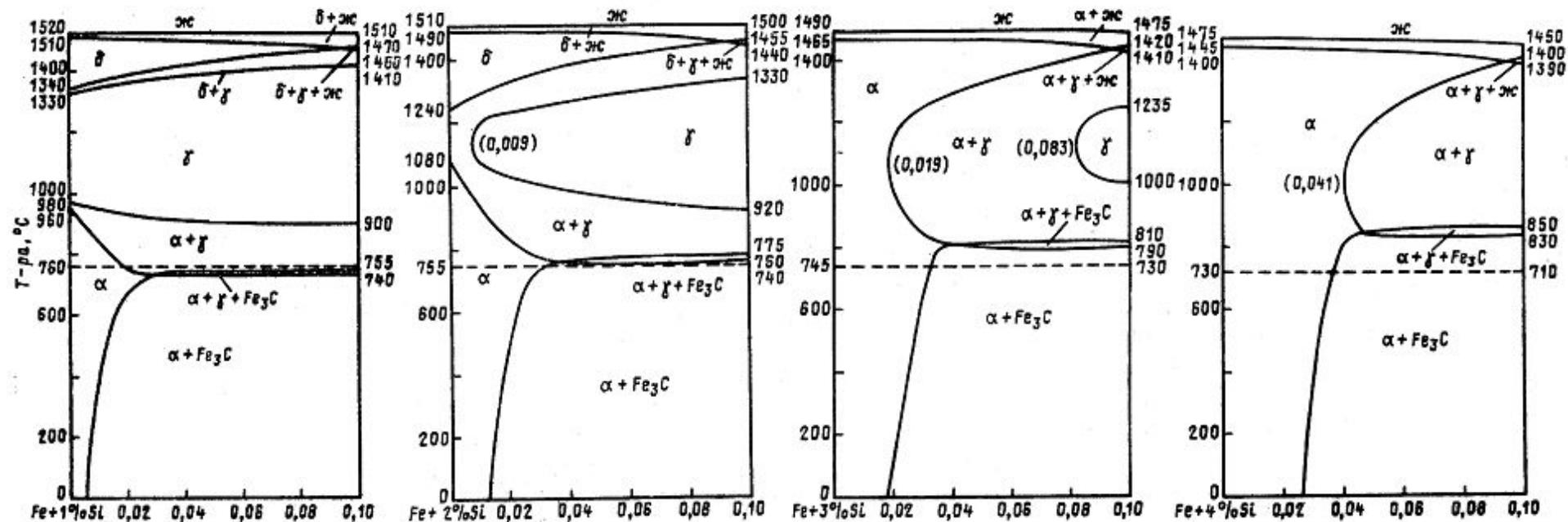


- Одно из преимуществ при добавлении Si к Fe – возможность высокотемпературной обработки для управления зеренной текстурой без вредного влияния α-γ (о.ц.к. - г.ц.к.) фазового перехода.
- Добавление 5-6 % Si ведет к образованию упорядоченной α'-фазы со структурой DO₃. Это приводит к потере пластичности. Поэтому кремнистые стали, практически всех промышленных марок, содержат < 3,5 % Si.
- Кремний оказывает значительное влияние на магнитные свойства сплава. Его добавление:
 - понижает **индукцию насыщения** и **температуру Кюри** и поэтому нежелательно;
 - происходит благоприятное **уменьшение константы магнитно-кристаллической анизотропии K** и **возрастание электросопротивления ρ**.
 - **близкое к нулю значение магнитострикции** при 6%Si – также положительный факт, но как уже отмечалось, материал такого состава хрупок.

Влияние кремния (продолжение)

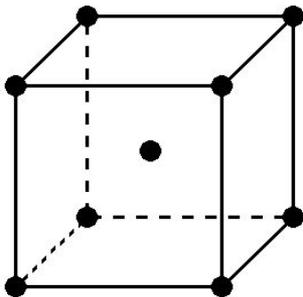
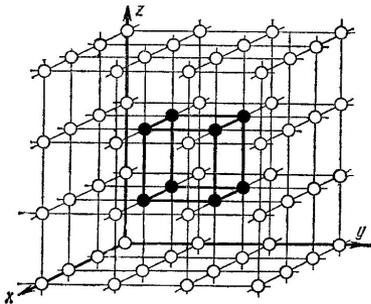


Влияние кремния (продолжение)

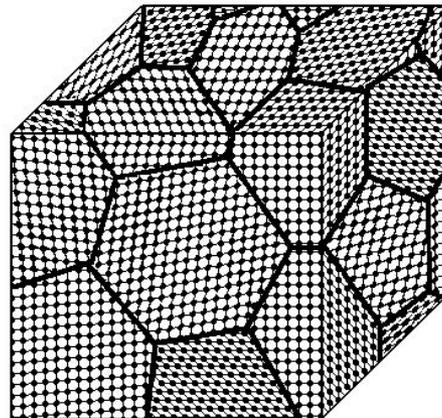


Атомно-кристаллическая структура твердых тел

- Для удобства изображения и изучения кристаллических решеток различных материалов для каждой из них выделяют наименьший объем, элементарную составляющую кристаллической решетки (на рисунке, она выделена жирными линиями), при последовательной трансляции которой в пространстве по всем трем направлениям до бесконечности можно воссоздать решетку в целом.

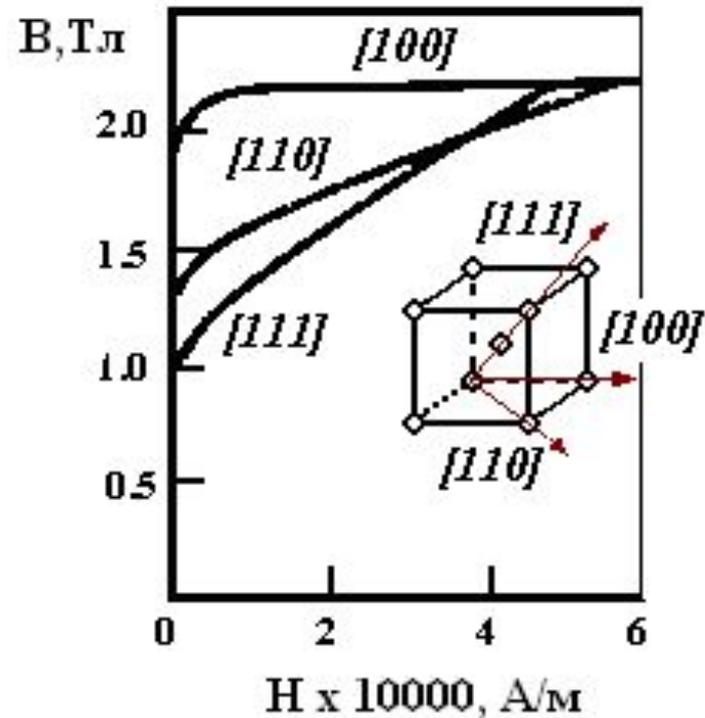
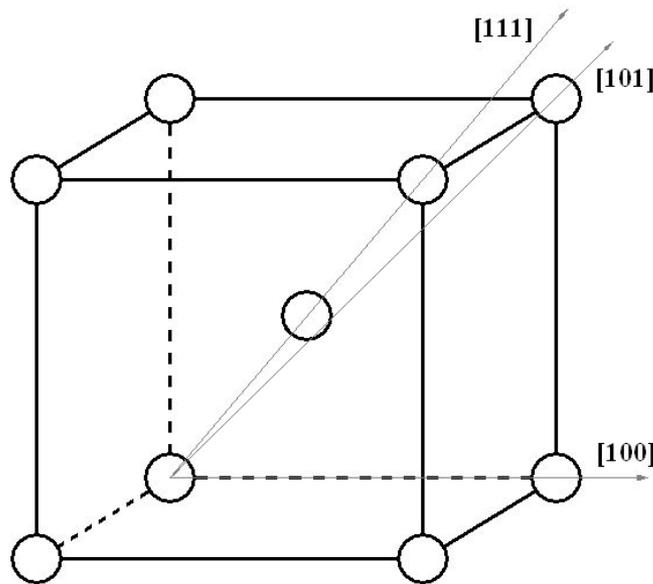


- Идеальное кристаллическое строение, характерное для монокристаллов. Большинство реально используемых металлических материалов находятся в так называемом поликристаллическом состоянии, то есть состоят из большого количества монокристаллов (или зерен), разделенных между собой межзеренными границами.



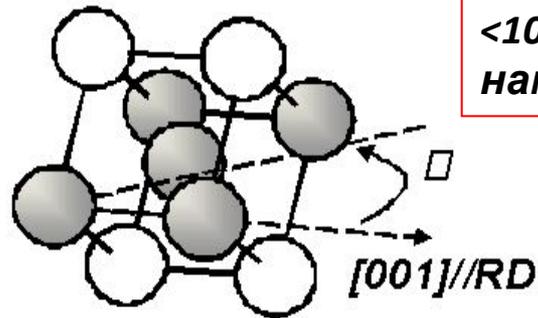
Анизотропия магнитных свойств

1926 г. Япония. Открытие Хонде и Кая магнитной анизотропии монокристаллов железа (наличие осей легкого и трудного намагничивания)

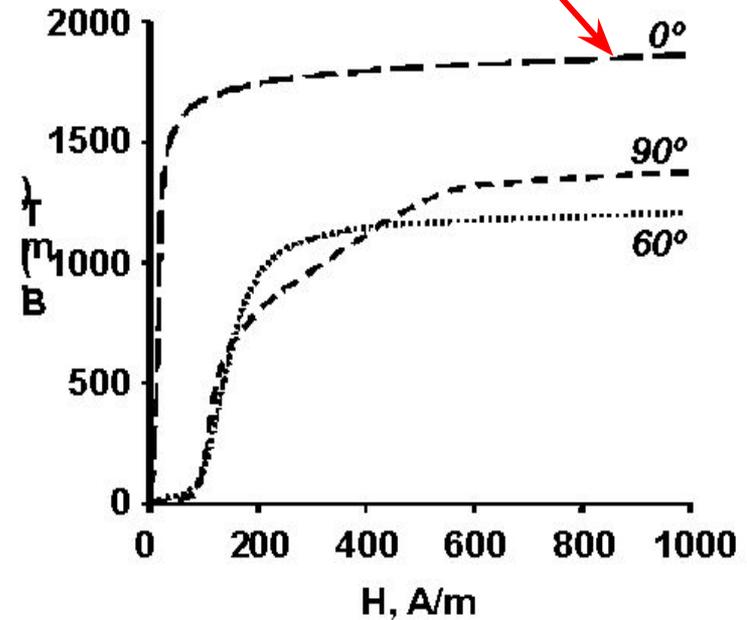
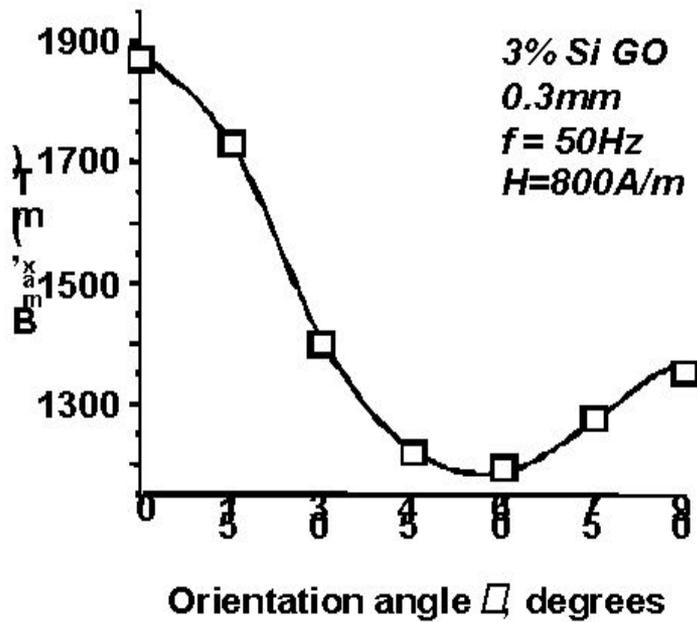


Анизотропия магнитных свойств

ЭАС



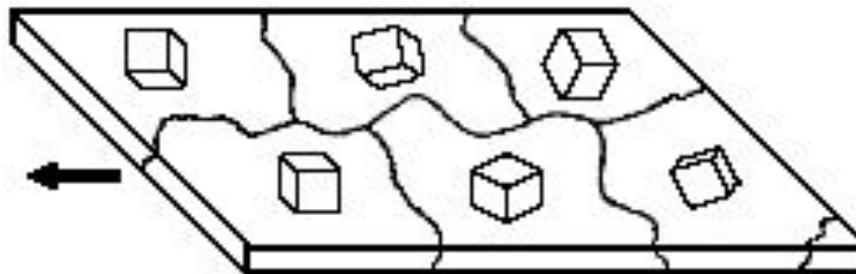
$\langle 100 \rangle$: Направление легкого намагничивания



Зависимость магнитных свойств от угла ориентации (3% Si GO electrical steel).

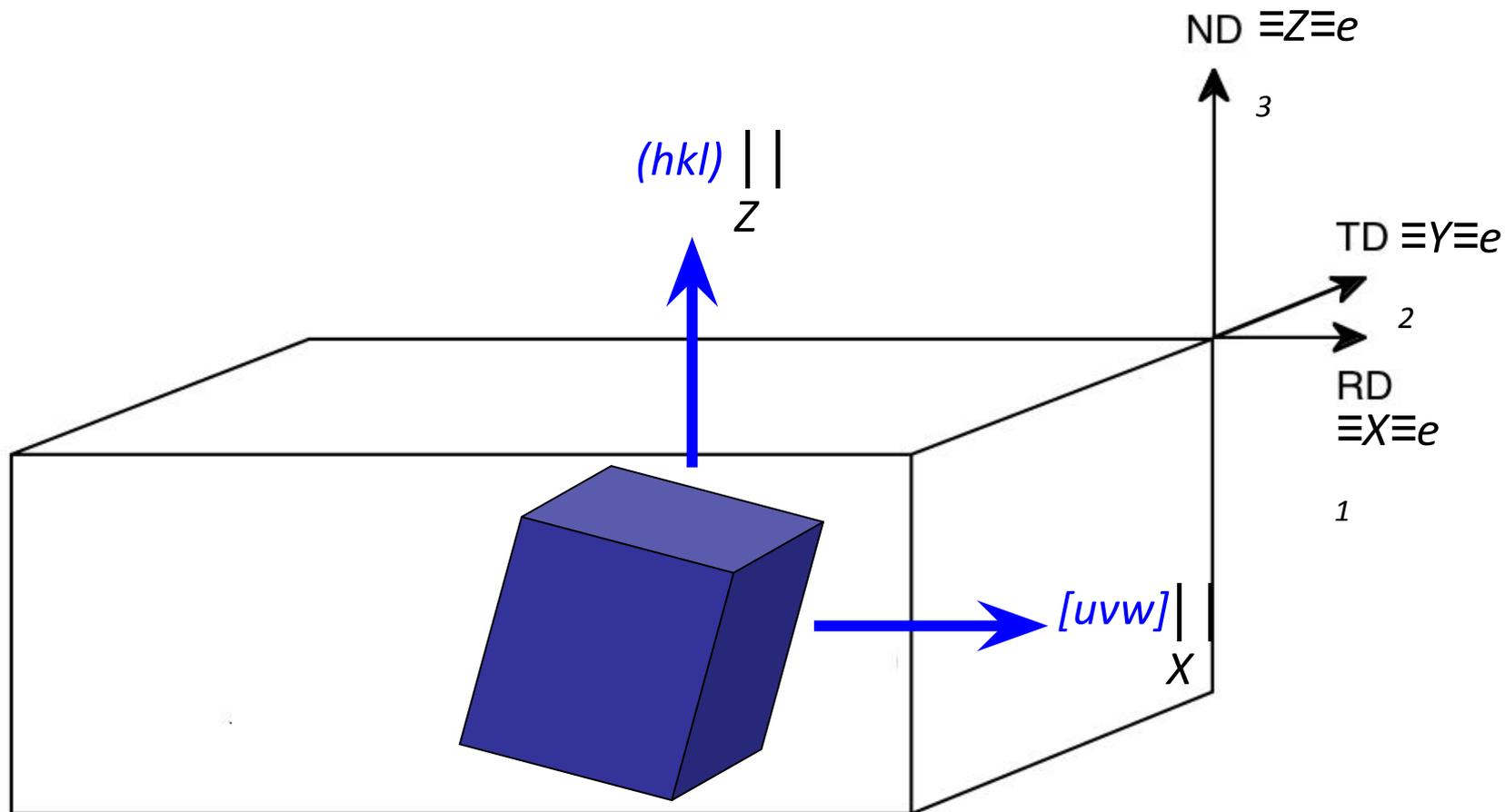
Кристаллографическая текстура

- При намагничивании поликристаллического ферромагнетика с хаотично разориентированными зернами, когда каждое зерно имеет свою собственную ориентировку в пространстве (рис.), параллельным вектору напряженности внешнего магнитного поля \mathbf{H} , может оказаться абсолютно любое кристаллографическое направление в каждом отдельном зерне. Это, в свою очередь, означает, что одно зерно будет намагничиваться по направлению $\langle 110 \rangle$, другое по $\langle 100 \rangle$, третье по $\langle 111 \rangle$, а остальные вообще по другим направлениям, то есть намагничивание такого ферромагнетика было бы чрезвычайно затруднено и неоднородно.



- Трудность в намагничивании и перемагничивании ферромагнетика, работающего в качестве сердечника трансформатора, означает дополнительные потери электроэнергии и снижает КПД последнего. Для избежания этого при изготовлении сердечников трансформаторов используют текстурованную (анизотропную) электротехническую сталь.

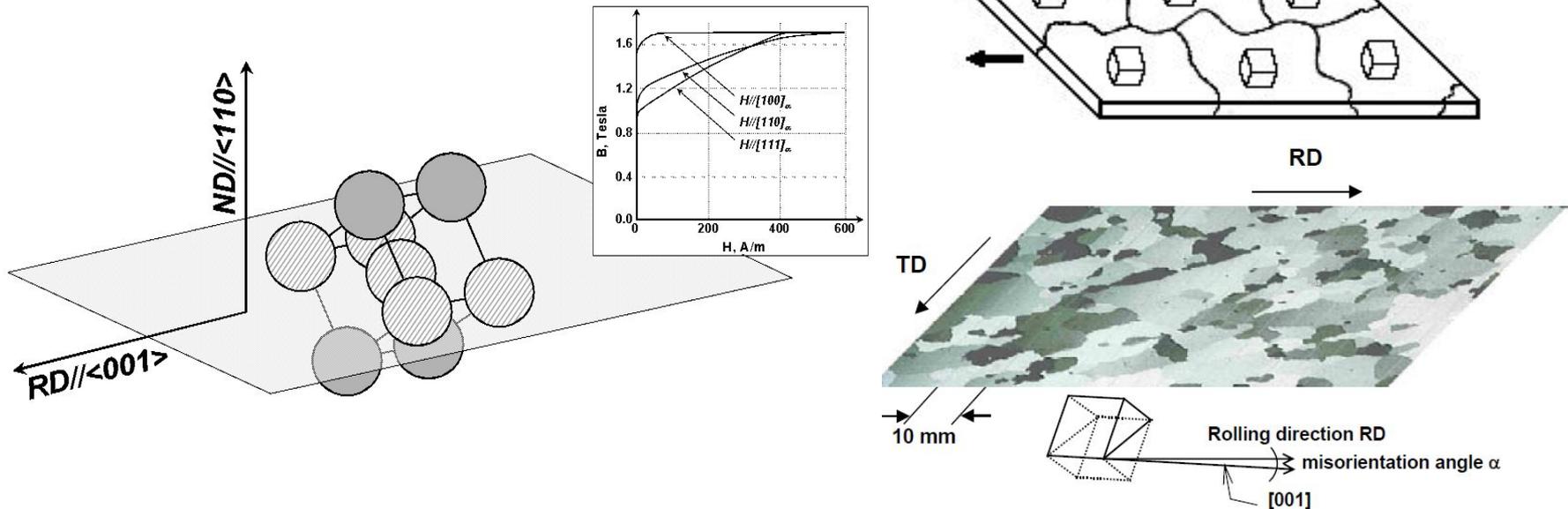
Описание ориентации через $(hkl)[uvw]$



ND (НН) – направление нормали к плоскости прокатки; RD (НП) – направление прокатки; TD (ПН) поперечное к НП и НН направление.

Кристаллографическая текстура

- Если все зерна в образце своими кристаллографическими направлениями наилегчайшего намагничивания будут ориентированы параллельно какому-нибудь внешнему по отношению к образцу направлению, то и весь образец в целом будет намагничиваться и перемагничиваться в этом направлении наилегчайшим образом.
- Текстурой называется преимущественная ориентировка кристаллитов (зерен) в поликристаллическом материале.



Кристаллографическая текстура

Компоненты кристаллографических текстур:

$\{hkl\} \langle uvw \rangle$:

$\langle hkl \rangle // ND$ and $\langle uvw \rangle // RD$

GOSS: $\{110\} \langle 100 \rangle$

Идеальна
для ЭАС

Cube: $\{100\} \langle 001 \rangle$

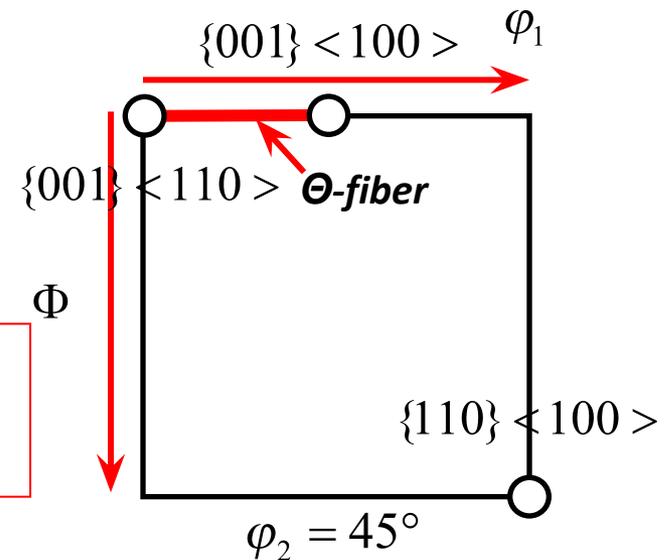
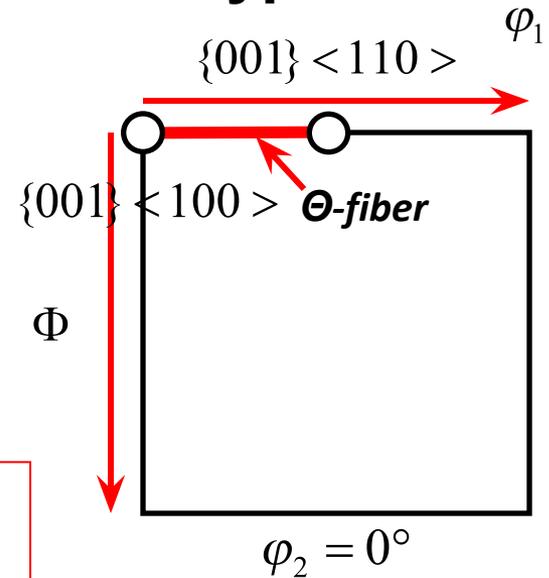
Rotated cube: $\{100\} \langle 011 \rangle$

Fiber orientations:

$\langle 001 \rangle // ND : \theta$ – fiber

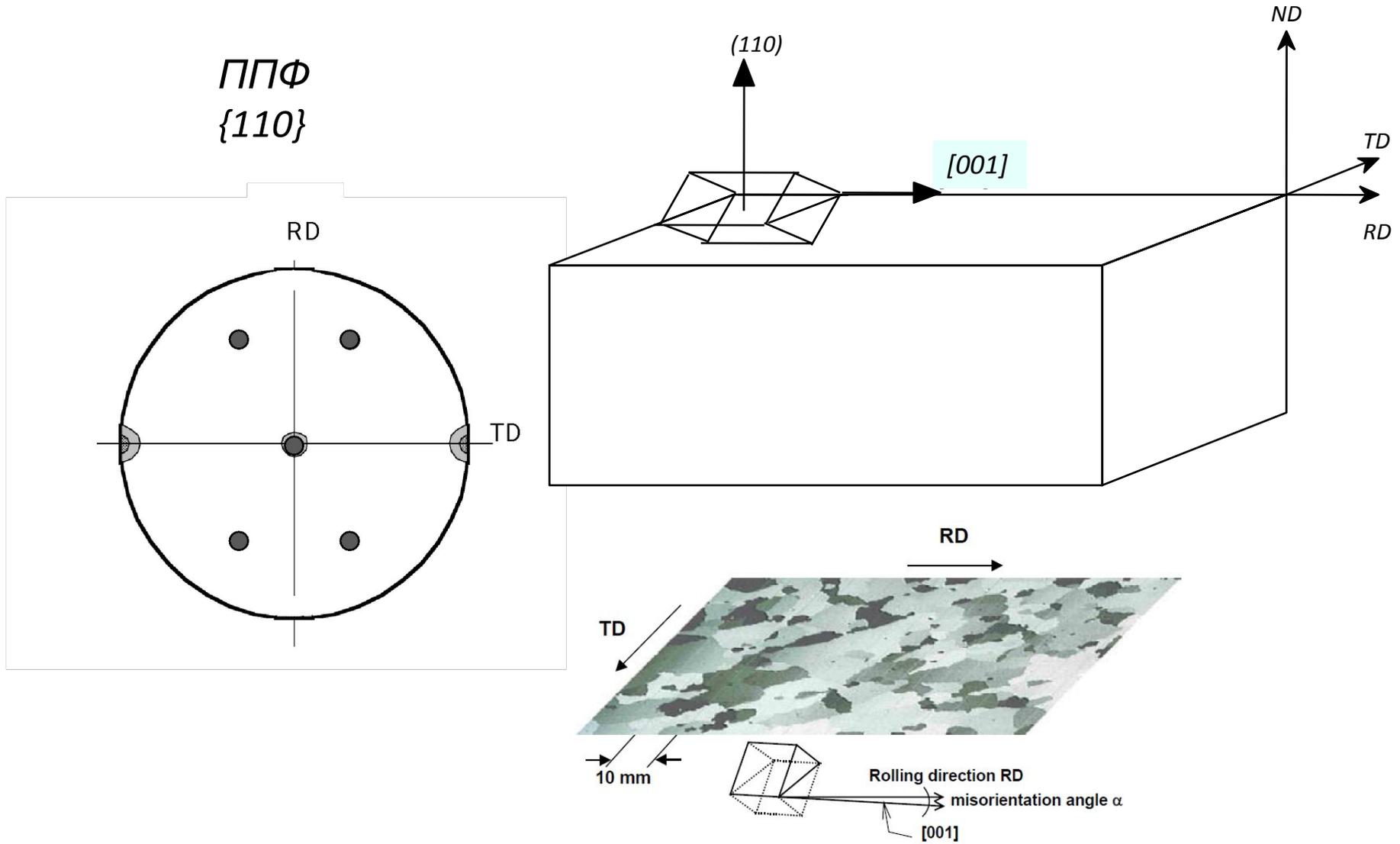
Идеальна
для ЭИС
 $\{001\} \langle 0vw \rangle$

$\langle 001 \rangle // RD$



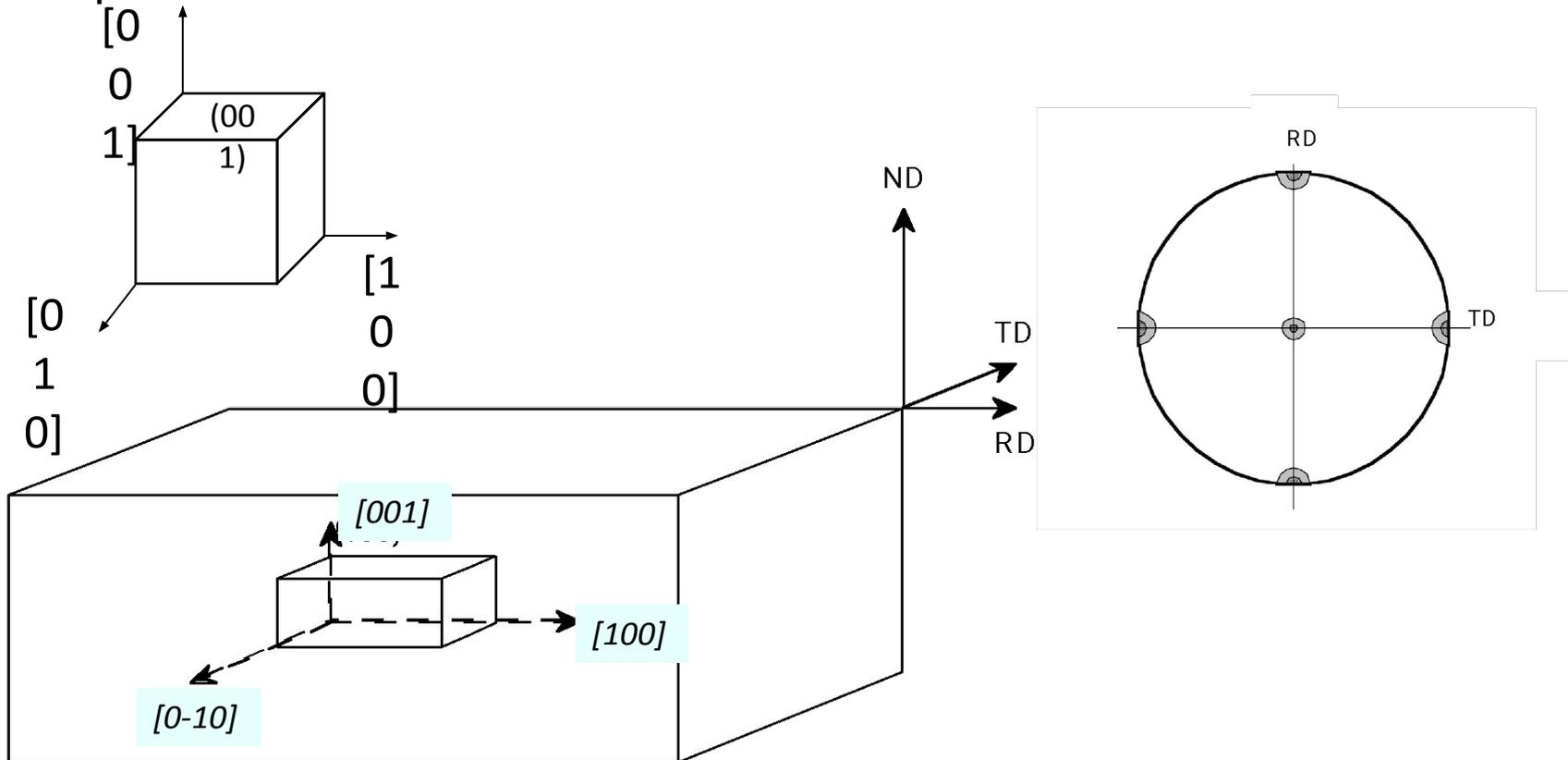
Ребровая текстура (110)[001]: cube-on-edge

ППФ
{110}



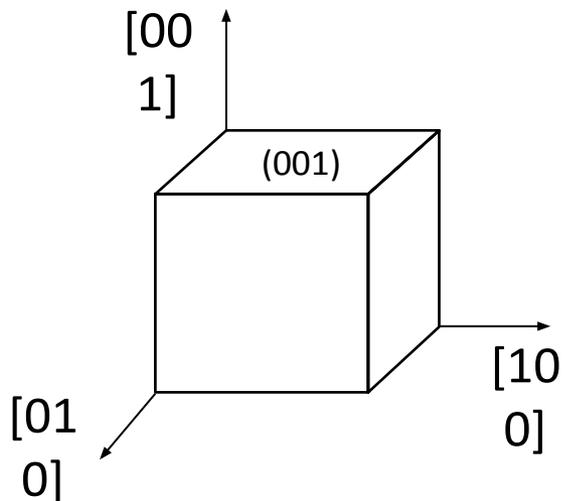
Кубическая текстура (001)[100]: cube-on-face

Три оси $\langle 001 \rangle$ параллельны трем осям образца (системы координат образца), т.е. ND (НН), RD (НП), and TD (ПН) направлениям.



Текстура (001)[0vw]

- В плоскости (001) кубической решетки лежит две оси легкого намагничивания $\langle 100 \rangle$ ($[100]$ и $[010]$).
- Наличие текстуры (001)[0vw] приводит к тому, что в любом из направлений в плоскости листа всегда существуют зерна с осью легкого намагничивания параллельной этому направлению (но при этом есть и зерна с другими кристаллографическими направлениями). Это делает материал изотропным в плоскости листа.



- Наличие зерен с кристаллографическими направлениями отличными от $\langle 100 \rangle$ приводит к некоторому общему снижению свойств (по сравнению со свойствами ЭАС вдоль направления прокатки).

Электротехнические стали

В настоящее время наиболее распространенными материалами для изготовления магнитопроводов электрических машин и трансформаторов являются **электротехнические стали** (98,5% всех производимых магнитомягких материалов):

- 1) Электротехнические изотропные (динамные) стали;
- 2) Электротехнические анизотропные (трансформаторные) стали;
- 3) Электротехнические релейные стали.

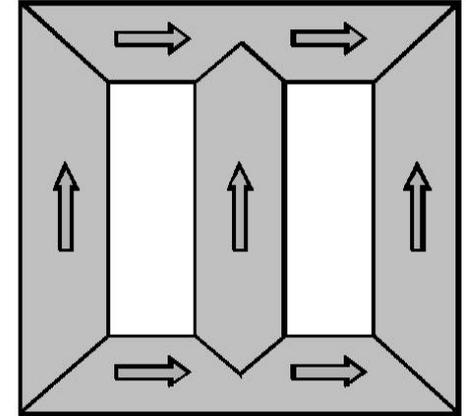
Традиционно они изготавливаются на основе сплавов железа с кремнием (до 3.5 % Si).

Электротехнические

стали

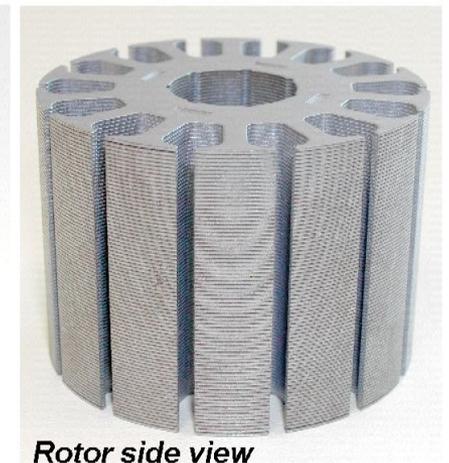
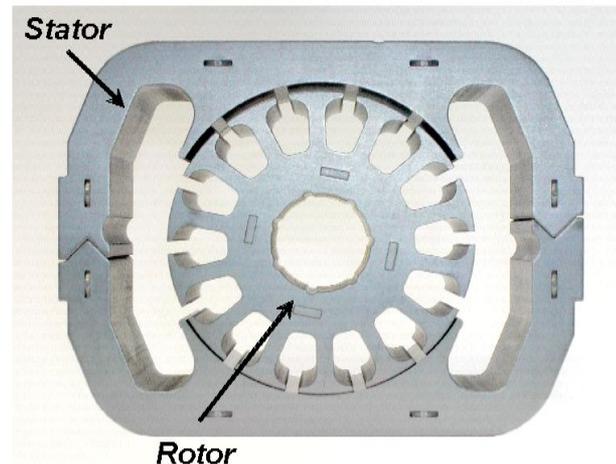
Электротехническая анизотропная сталь (GO Electrical Steel)

- Электротехнические анизотропные (трансформаторные) стали используются для изготовления магнитопроводов трансформаторов, работающих при низких частотах, где **направление магнитного потока неизменно**;



Электротехническая изотропная сталь (NO Electrical Steel)

- Электротехнические изотропные (динамные) стали используются в магнитопроводах электрических машин, где **магнитный поток либо вращается, либо охватывает все направления в плоскости листа**;



Электротехнические релейные стали (далее отдельно не рассматриваются) применяются в качестве материалов для **электромагнитных реле** (пускателей и т.п.) и представляют из себя особочистые низколегированные стали (основное требование – низкая коэрцитивная сила). Нелегированные динамные стали могут использоваться как релейные.

Электротехнические

стали

Современные электротехнические стали представляют из себя сплав железа с кремнием и иногда алюминием, при малом содержании углерода (углерод является вредной примесью, снижающей магнитные свойства).

Отличия кривых намагничивания NO и GO (3-% Si Electrical Steel)

- Индукция насыщения

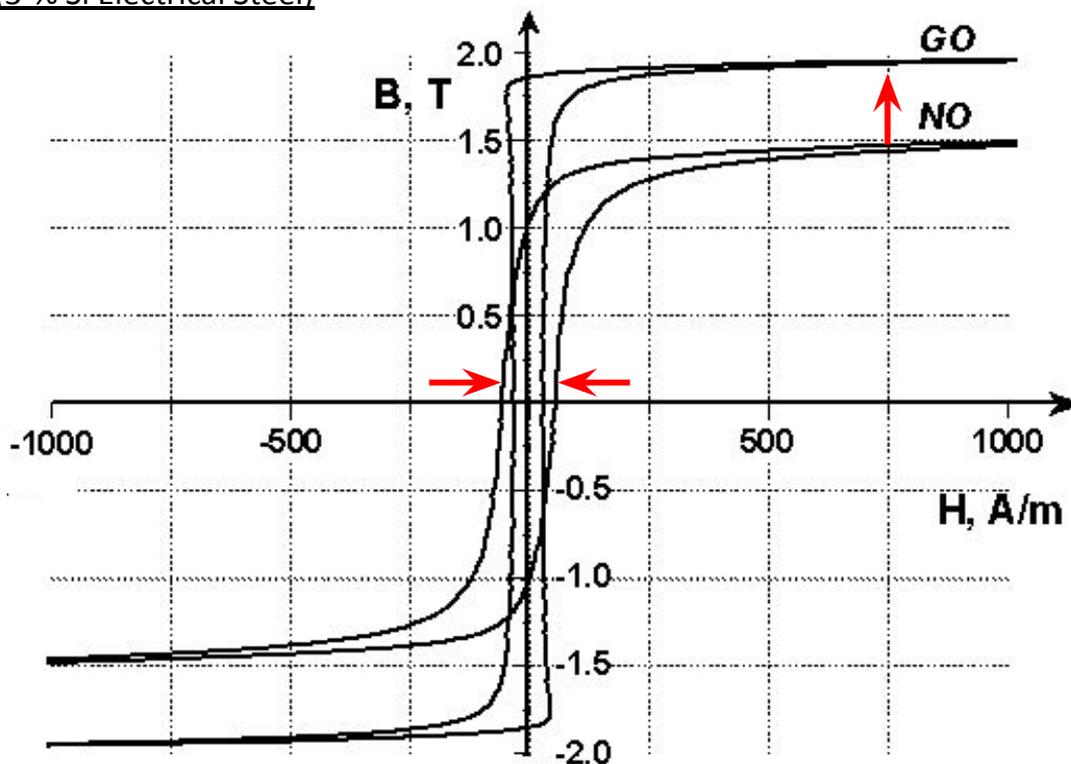
- Ширина петли.

Электротехническая анизотропная сталь (GO Electrical Steel)

- Основная проблема в области получения трансформаторной стали состоит в получении текстуры. Разработаны способы получения стали с текстурой (110)[001], за счет вторичной рекристаллизации.

Электротехническая изотропная сталь (NO Electrical Steel)

- Динамные стали являются изотропными. От них требуется как можно большая величина магнитного потока. Сочетание зеренной структуры с текстурой составляет предмет исследования в этих материалах.



Релейные стали, как правило, представляют из себя особочистые низколегированные стали (основное требование – низкая коэрцитивная сила и высокая индукция), без особенностей в технологии производства. Нелегированные динамные стали (ЭИС) могут использоваться как релейные. Поэтому далее отдельно не рассматриваются.

Удельные магнитные потери на перемагничивание в электротехнической (трансформаторной) стали

- Несмотря на то, что КПД работы трансформаторов очень высок, по сравнению с другими установками, он никогда не будет равен единице, так как невозможно создать устройство, при работе которого количество отводимой от него энергии равнялось бы или превышало количество подводимой к нему энергии
- За один цикл перемагничивания ферромагнитного материала бесполезно затрачивается энергия, переходящая в тепло, пропорциональная площади динамического цикла гистерезиса. Затраты энергии за единицу времени (секунду), отнесенные к единице массы материала (килограмм, фунт), называются удельными магнитными потерями. Общепринято определять потери в Вт/кг (Вт/фунт) при фиксированных значениях частоты электромагнитного поля и магнитной индукции, создаваемой полем в магнитопроводе – например: $P_{1.7/50} = 1.25$ Вт/кг, где значение 1.25 Вт/кг измерено в поле с индукцией 1.7 Тл при частоте поля 50 Гц.

Магнитные

потери

- Полные потери на перемагничивание складываются из потерь на гистерезис (P_H) и вихревые токи (P_B). Последние, в свою очередь, можно разделить на потери, связанные с макровихревыми (P_{MB}) и микровихревыми (P_{AB}) токами:

$$P = P_H + P_B = P_H + (P_{MB} + P_{AB})$$

- Гистерезисная составляющая пропорциональна площади петли гистерезиса, полученной в режиме перемагничивания. Площадь цикла гистерезиса в свою очередь зависит от максимальной индукции (B_m), коэрцитивной силы (H_c), остаточной индукции (B_r), которые определяются свойствами и структурой ферромагнетика (тип и чистота материала, наличие и вид дефектов кристаллического строения, размер кристаллитов (D), наличие и степень совершенства кристаллографической текстуры).

- Гистерезисные потери могут быть рассчитаны по следующей формуле:

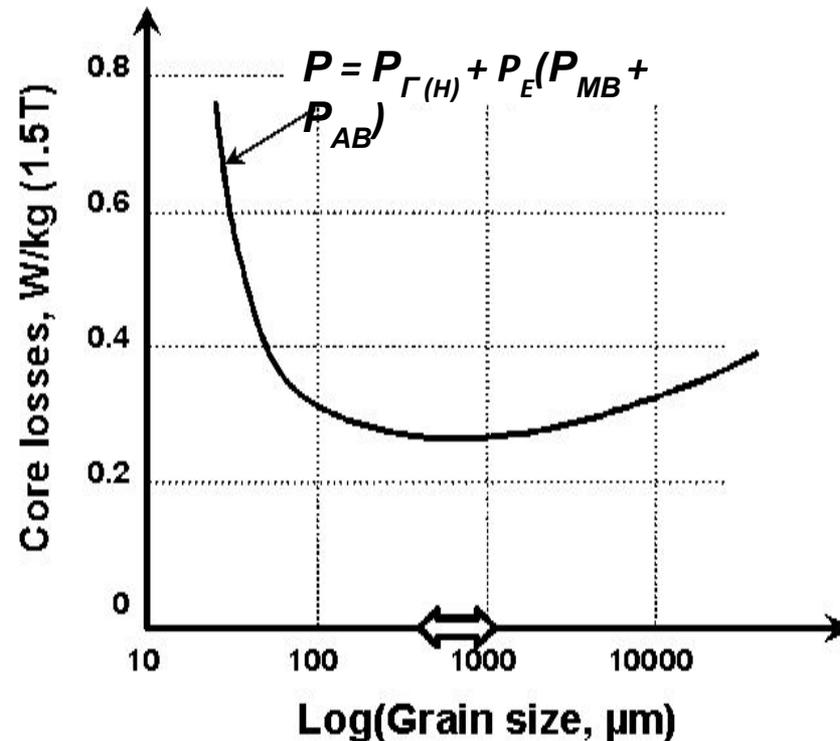
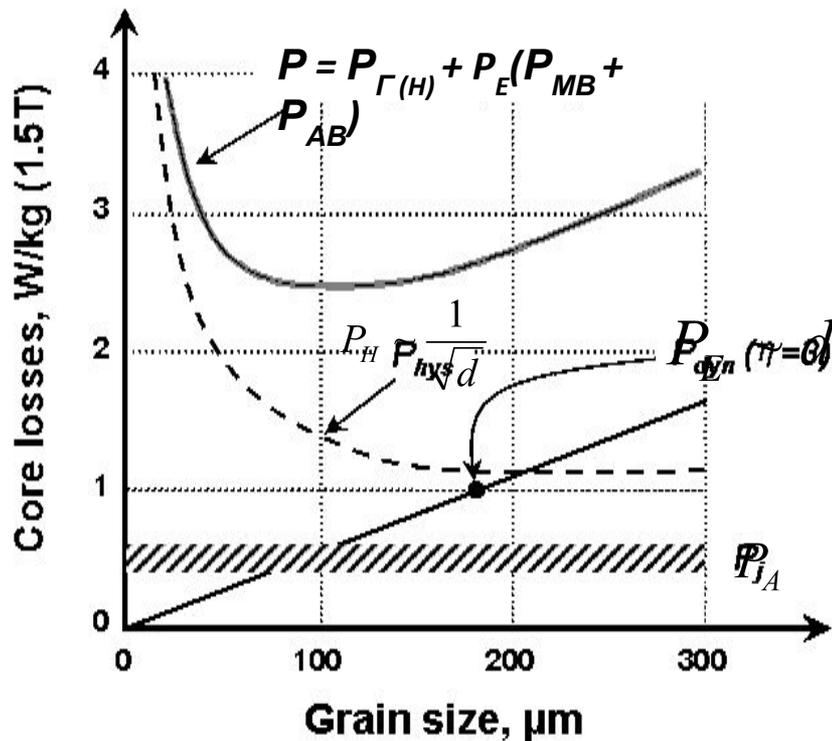
$$P_H = S f \gamma$$

где S – площадь статического цикла гистерезиса, [ТлА/м]; γ – плотность материала, [кг/м³]; f – частота переменного тока, [Гц].

Потери на гистерезис зависят от структурных факторов, в частности, от величины зерна D и текстуры, аналогично тому, как зависит от них «статическая» коэрцитивная сила $H_c \sim D^{-1}$.

Магнитные потери

Влияние среднего размера зерна на потери ($B=1.5$ Тл) для ЭИС (слева) и ЭАС (справа).



Оптимальный размер зерна для ЭИС: 70-150 мкм

Оптимальный размер зерна для ЭАС → CGO: < 1-10 mm

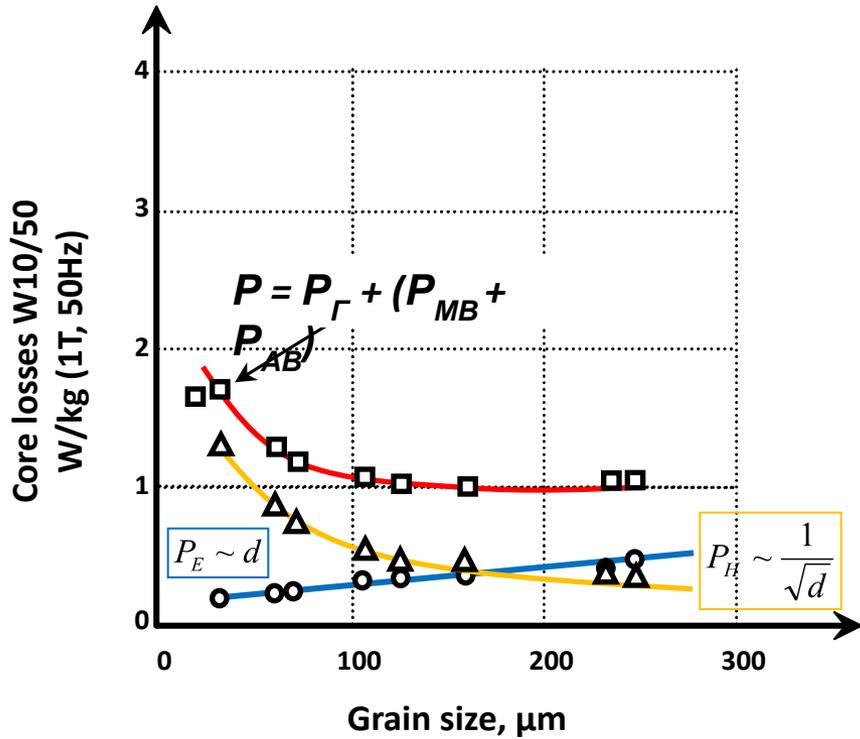
NiB: >10±3 mm

Уменьшение потерь для ЭАС при уменьшении размера зерна происходит из-за уменьшения размера доменов.

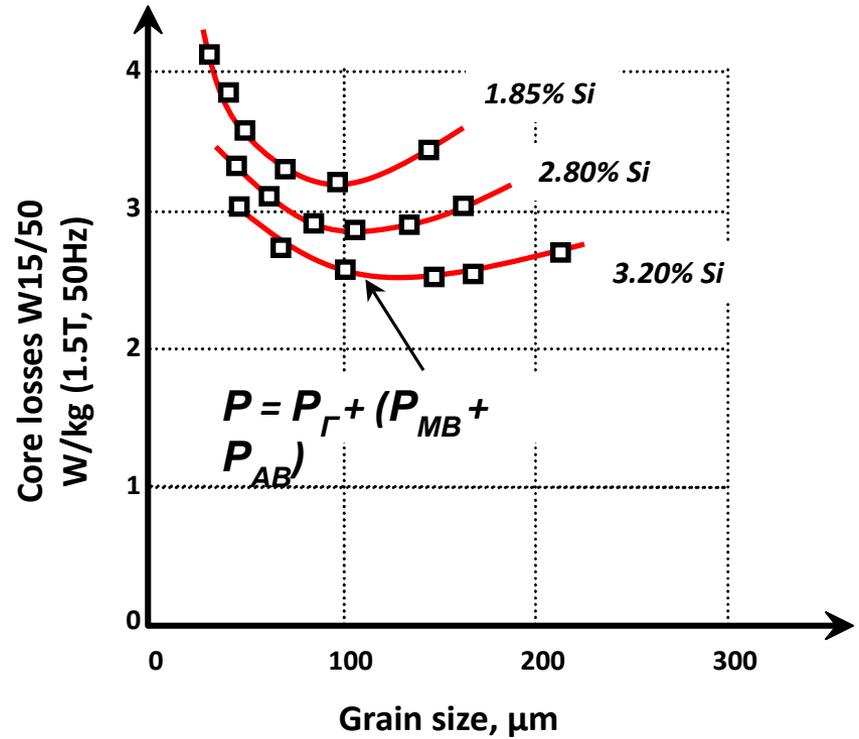
P_H : гистерезисные потери, P_A : аномальные потери, P_E : вихрековые потери

Магнитные потери

Влияние размера зерна на магнитные потери в ЭАС и ЭИС



ЭАС



ЭИС

Магнитные потери

- Вихретоковая составляющая существенно зависит от электросопротивления и, соответственно, от толщины (h) и удельного сопротивления материала (ρ), а также от частоты перемагничивания и ширины магнитных доменов (d).
- Потери на макровихревые токи возникают в результате изменения общей намагниченности идеально однородного в магнитном отношении вещества. Эти потери равны:

$$P_{MB} = A_1 B_M^2 f^2 h^2 / (\gamma \rho)$$

где A_1 – числовая константа.

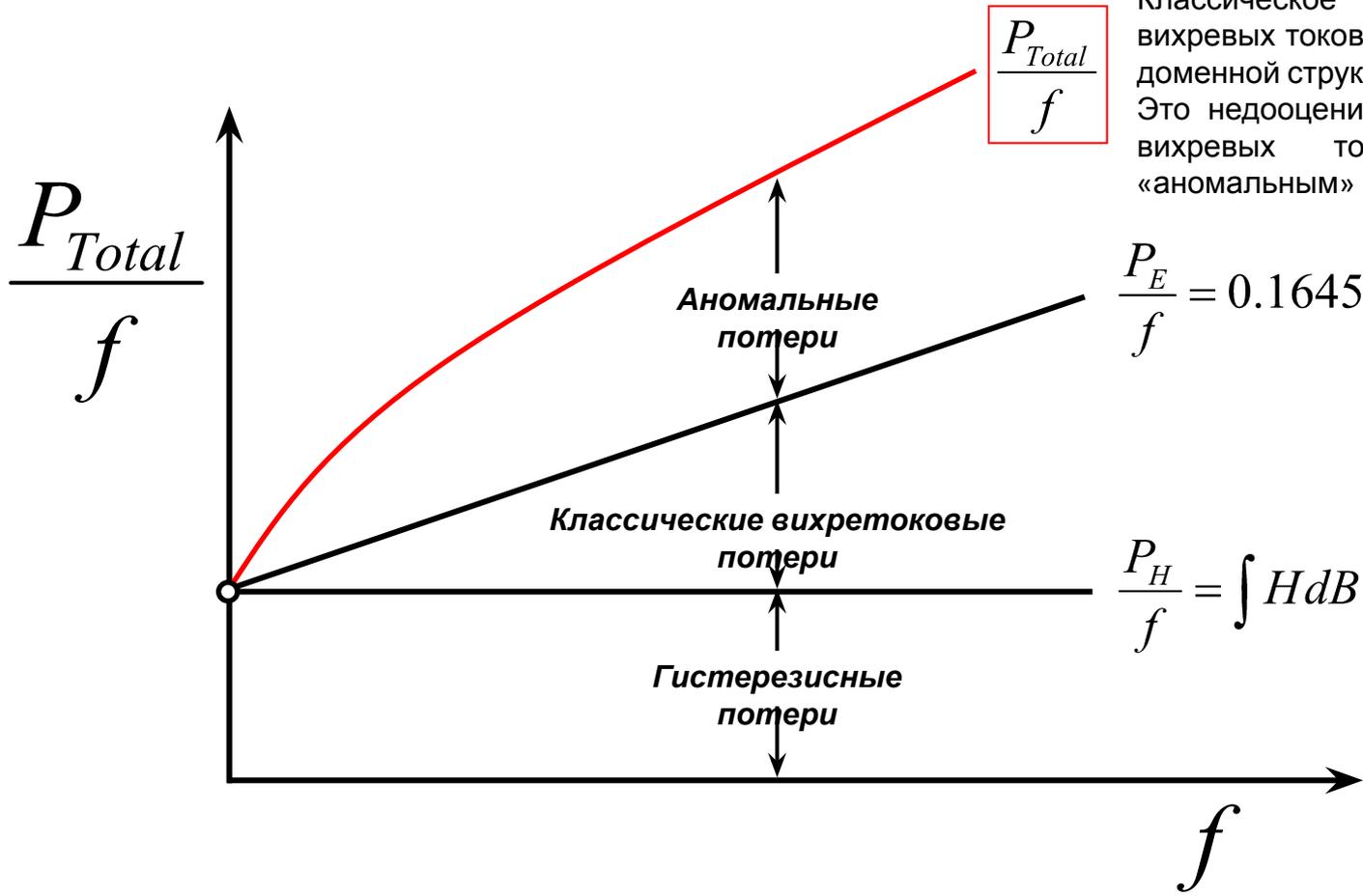
- Составляющая потерь на вихревые токи P_{AB} представляет собой потери на вихревые токи, которые индуцируются внутри доменов в результате локальных изменений индукции при смещении границ. В случае модели плоскопараллельных доменов, которые разделены 180-градусными границами, совершающими синусоидальное движение в тонком листовом материале толщиной h ($d \geq h$), получено следующее выражение для этого вида потерь (Прай и Бин), которое в явном виде дает связь потерь на вихревые токи с характеристиками доменной структуры (шириной доменов d):

$$P_{AB} = A_2 B_M^2 f^2 d h / (\gamma \rho)$$

где A_2 – числовая константа

$$P_{Total} = P_H + P_E + P_A \Rightarrow \frac{P_{Total}}{f} = \frac{P_H}{f} + \frac{P_E + P_A}{f}$$

Магнитные потери



$$\frac{P_{Total}}{f}$$

Классическое уравнение потерь от вихревых токов не учитывает изменения в доменной структуре. Это недооценивает реальные потери от вихревых токов и приводит к «аномальным» потерям.

$$\frac{P_E}{f} = 0.1645 \frac{t^2 f B_{max}^2}{\rho \delta} \propto f$$

$$\frac{P_H}{f} = \int H dB = \text{constant}$$

Примечание. Поскольку поле внутри ЭАС уменьшается к центру листа, доменные стенки не остаются плоскими во время изменения поля: часть доменной стенки в центре листа отстает от части стенки на поверхности. Этот эффект более выражен при более высоких частотах и большей толщине.

Магнитные потери

Параметр	Гистерезисные потери P_H	Макровихревые потери (P_{MB})	Микровихревые потери (P_{AB})
Высокое содержание кремния	Увеличиваются	Снижаются	-
Толщина полосы	Снижаются	Увеличиваются	-
Шероховатость поверхности	Увеличиваются	не влияет	-
Низкое содержание примесей	Снижаются	не влияет	не влияет
Кристаллографическая текстура	Увеличиваются	не влияет	-
Крупный размер зерна	Снижаются	не влияет	Увеличиваются
Механические напряжения	Увеличиваются	не влияет	Увеличиваются
Повышение температуры	-	Снижаются	-
Пиковая индукция	$\sim B^{1.5}-B^2$	$\sim B^2$	$\sim B^{1.5}$
Частота	$\sim f$	$\sim f^2$	$\sim f^{1.5}$

Магнитные потери при высоких частотах

Для высокочастотных машин основное значение имеют удельные магнитные потери, т.к. нагрев участков магнитопровода, перемагничиванием с высокой частотой f , вызывает необходимость ограничения амплитуды B . Повышение частоты приводит к снижению μ , и увеличению потерь. Резкое снижение проницаемости начинается с частоты f , при которой глубина проникновения магнитного поля становится меньше половины толщины листа. Удельные магнитные потери возрастают главным образом за счет потерь от вихревых токов, т.е. $\sim f^2$. Следовательно необходимо максимально снижать толщину листа.

Сталь для высоких частот должна иметь:

1. Высокое удельное электросопротивление;
2. Минимальная толщина для каждой частоты;
3. Минимальный размер зерна D ;
4. Высокая доля кубической компоненты текстуры.

Спасибо за внимание!