

Тема 2

**Электротехническая анизотропная сталь (ЭАС)
холоднокатаная листовая – трансформаторная сталь,
технический сплав Fe-3%Si, Grain Oriented Silicon Steel
(GOSS, GO), HI-B (для стали с высокой индукцией)**

1.2 Электротехническая анизотропная сталь (ЭАС) холоднокатаная листовая – трансформаторная сталь, технический сплав Fe-3%Si, Grain Oriented Silicon Steel (GOSS, GO), HI-B (для стали с высокой индукцией)

Назначение: пластины или ленты для сердечников (магнитопроводов) преобразующих электроэнергию устройств (трансформаторов).

Требования к ЭАС:

- 1. Легкость намагничивания и перемагничивания (т.е. высокие значения магнитной проницаемости);
- 2. Высокие значения магнитной индукции (B_{800} , B_{2500} , B_{100} , Тл);
- 3. Минимальные потери при перемагничивании ($P_{1.7/50}$, $P_{1.5/50}$, Вт/кг).

• *Выполнение первых двух требований определяет размеры и вес электрических обмоток и магнитных сердечников трансформаторов. Минимальные потери на перемагничивание определяют КПД трансформаторов и их рабочую температуру. Уровень потерь при перемагничивании определяется, главным образом, потерями на гистерезис и потерями на вихревые токи, которые зависят от площади петли гистерезиса, т.е. величины коэрцитивной силы материала, и от удельного электросопротивления.*

1. Электротехнические стали. Историческая справка

1900 г. Германия.

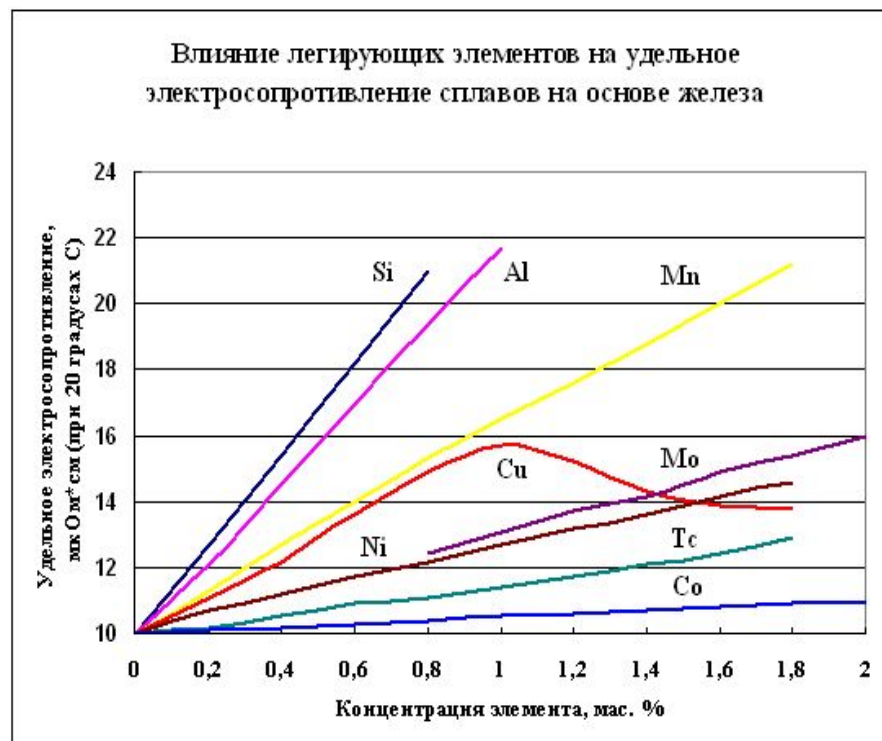
Открытие положительного влияния кремния на удельные потери в стали (Гадфильд).

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

*[мкОм * см]*

1903 г. Германия.

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



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

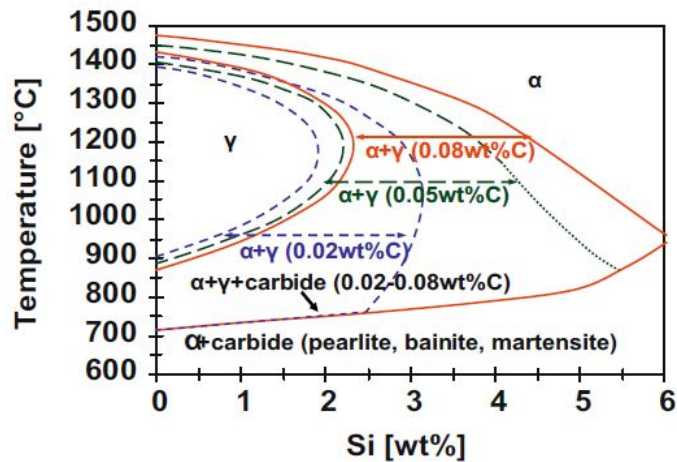
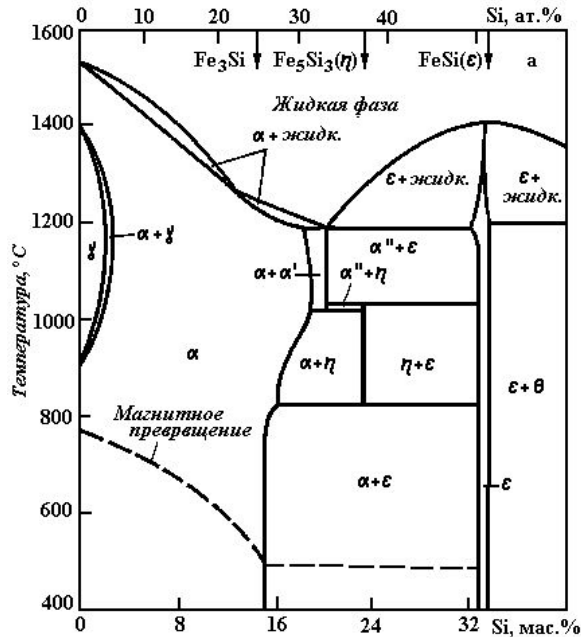
and low hysteresis for efficient use in transformers and other electrical apparatus in which said qualities are useful.

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

- 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 .

- 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

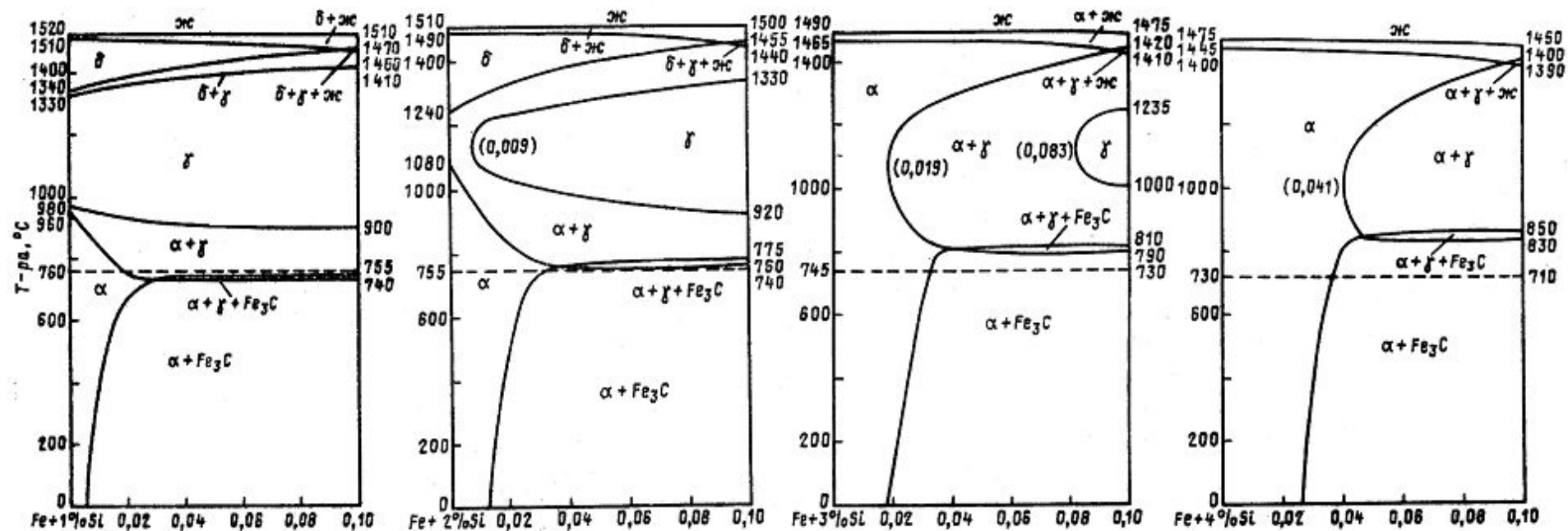


- Одно из преимуществ при добавлении Si к Fe – возможность высокотемпературной обработки для управления зеренной текстурой без вредного влияния α-γ (о.ц.к. - г.ц.к.) фазового перехода.

- 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.

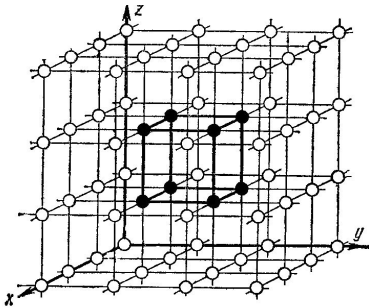
- Кремний оказывает значительное влияние на магнитные свойства сплава. Его добавление понижает индукцию насыщения и температуру Кюри и поэтому нежелательно. С другой стороны, происходит благоприятное уменьшение константы магнитно-кристаллической анизотропии и возрастание электросопротивления. Близкое к нулю значение магнитострикции при 6%Si – также положительный факт, но как уже отмечалось, материал такого состава хрупок.

Влияние кремния (продолжение)

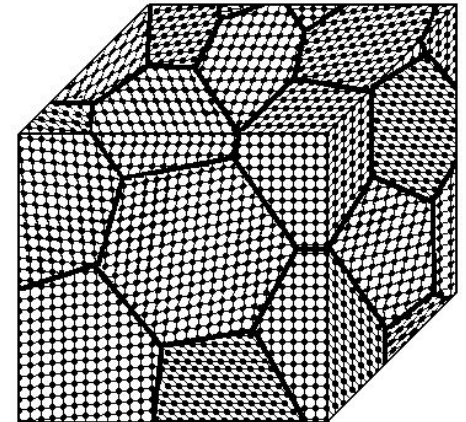
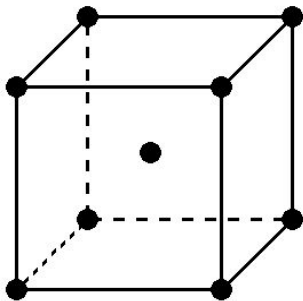


Атомно-кристаллическая структура твердых тел

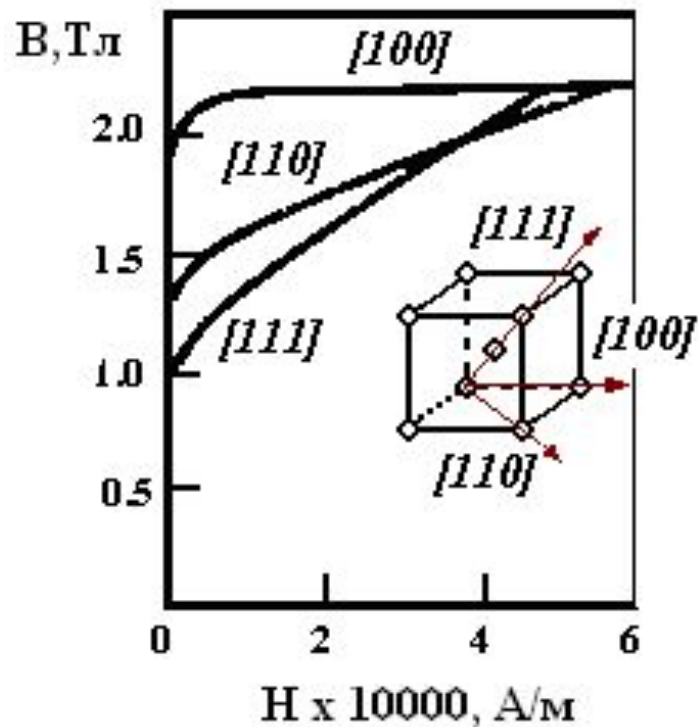
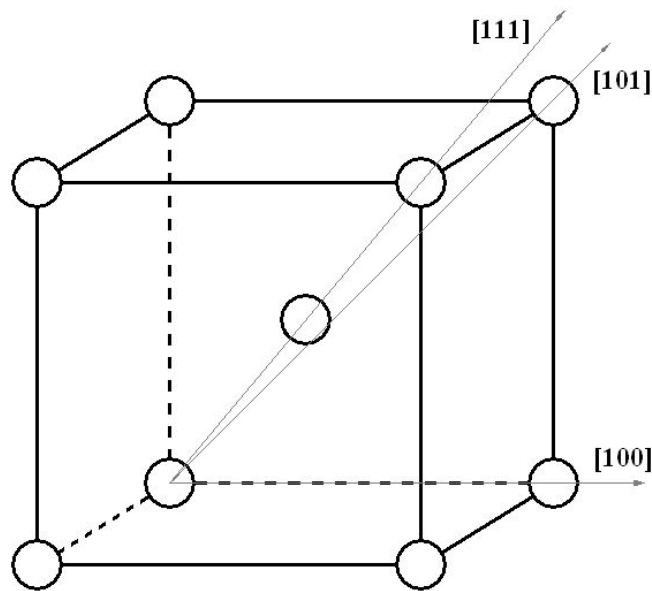
• Для удобства изображения и изучения кристаллических решеток различных материалов для каждой из них выделяют наименьший объем, элементарную составляющую кристаллической решетки (на рисунке, она выделена жирными линиями), при последовательной трансляции которой в пространстве по всем трем направлениям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

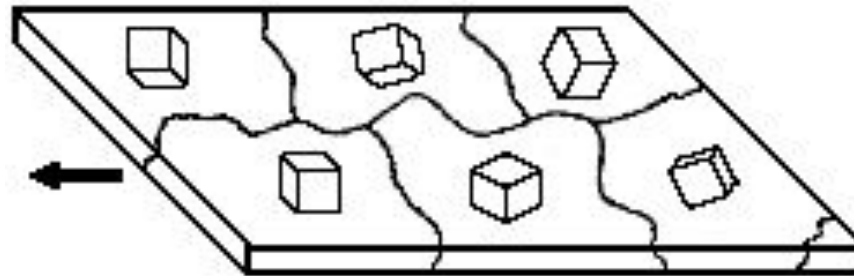


1926 г. Япония. Открытие Хонде и Кая магнитной анизотропии монокристаллов железа (наличие осей легкого и трудного намагничивания)



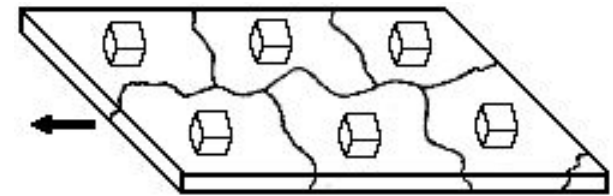
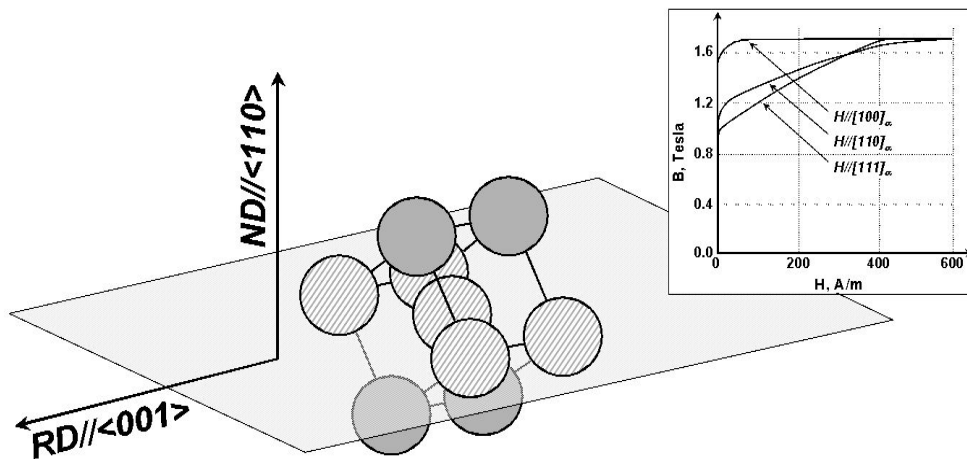
Текстура

- 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.

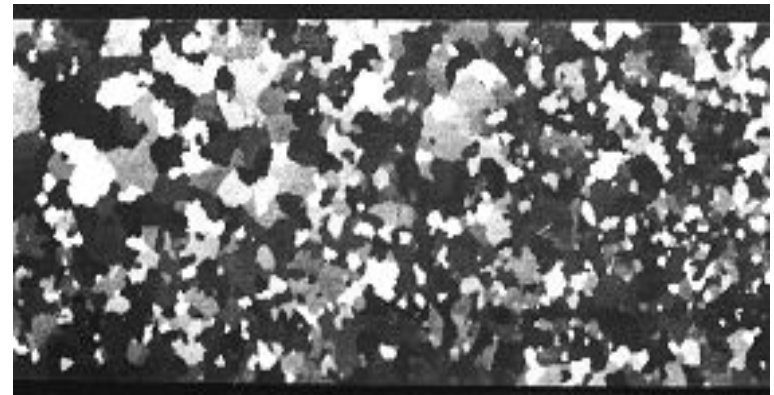
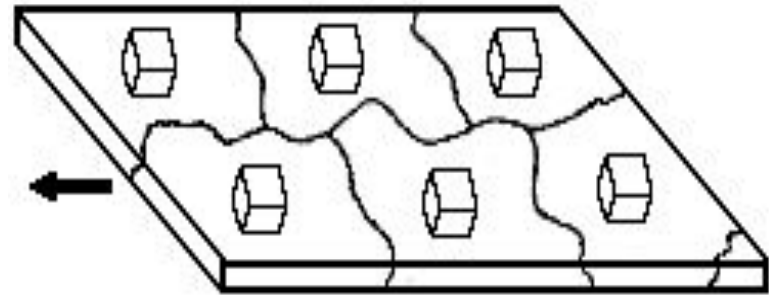
- Если все зерна в образце своими кристаллографическими направлениями наиболее легчайшего намагничивания будут ориентированы параллельно какому-нибудь внешнему по отношению к образцу направлению, то и весь образец в целом будет намагничиваться и перематничиваться в этом направлении наиболее легчайшим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



1934 г. США. Патент Н.П.Госса. Способ получения электротехнической стали содержащей около 3 мас.% Si из листов толщиной 2.5-3.5 мм путем холодной прокатки в две стадии с промежуточным и окончательным отжигами в непрерывном агрегате.

В 1935 г. было показано, что высокие магнитные свойства сталь имеет за счет наличия кристаллографической текстуры $(110)[001]$, которая возникла в результате вторичной рекристаллизации (показано в 1951).

В первых образцах только в ~ 40 % материала прошел аномальный рост зерен.



UNITED STATES PATENT OFFICE

1,965,559

ELECTRICAL SHEET AND METHOD AND APPARATUS FOR ITS MANUFACTURE AND TEST

Norman P. Goss, Youngstown, Ohio, assignor to The Cold Metal Process Company, Youngstown, Ohio, a corporation of Ohio

Application August 7, 1933, Serial No. 684,111

20 Claims. (Cl. 175-21)

My invention relates to electrical steel and method of manufacturing and testing the same. The desirability of high grade steel in sheet form for the manufacture of electrical apparatus is well recognized. Ordinary low carbon steel has been considered to have fairly satisfactory initial magnetic properties, including reasonably high permeability at high flux density. The difficulty with this material, however, is that it rapidly ages and its qualities suffer a marked deterioration.

trical sheets, there have been developed certain alloys for special uses. These are usually high nickel alloys and are used chiefly in apparatus requiring high permeability and low losses, such as in communication service. These alloys are too costly to permit their general use in ordinary electrical apparatus. They are also characterized by a tendency toward saturation at low flux densities, which further militates against their use in electrical power equipment.

July 3, 1934.

N. P. GOSS

1,965,559

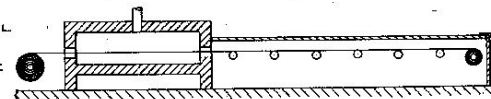
ELECTRICAL SHEET AND METHOD AND APPARATUS FOR ITS MANUFACTURE AND TEST

Filed Aug. 7, 1933

3 Sheets-Sheet 1

Fig. 1.

HOT ROLLED SI STEEL STRIP HEAT TREATED IN REDUCING ATMOSPHERE COOLED



COLD ROLLED BACKED MILL

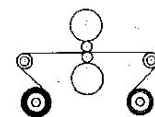


Fig. 1a.

HEAT TREATED IN REDUCING ATMOSPHERE COOLED

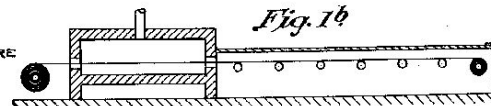


Fig. 1b.

COLD ROLLED BACKED MILL

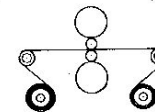


Fig. 1c.

FINALLY HEAT TREATED REDUCING ATMOSPHERE COOLED RAPIDLY

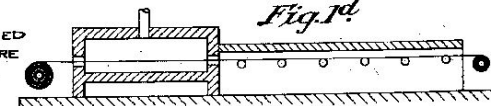


Fig. 1d.

STAMPED AND BATCH ANNEALED

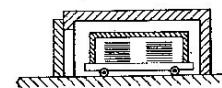


Fig. 1e.

INVENTOR
Norman P. Goss
by his attorney
Albert Grobstein

July 3, 1934. N. P. GOSS 1,965,559
ELECTRICAL SHEET AND METHOD AND APPARATUS FOR ITS MANUFACTURE AND TEST
Filed Aug. 7, 1933 3 Sheets-Sheet 2

Fig. 3.

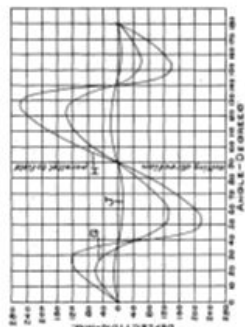


Fig. 5.

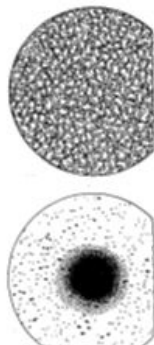
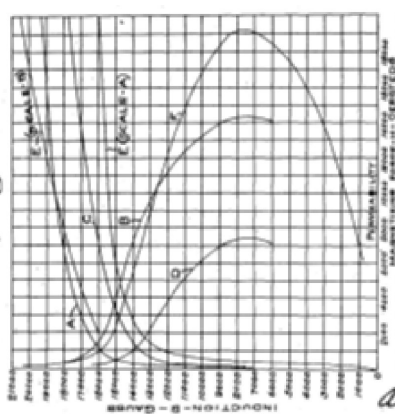


Fig. 2.

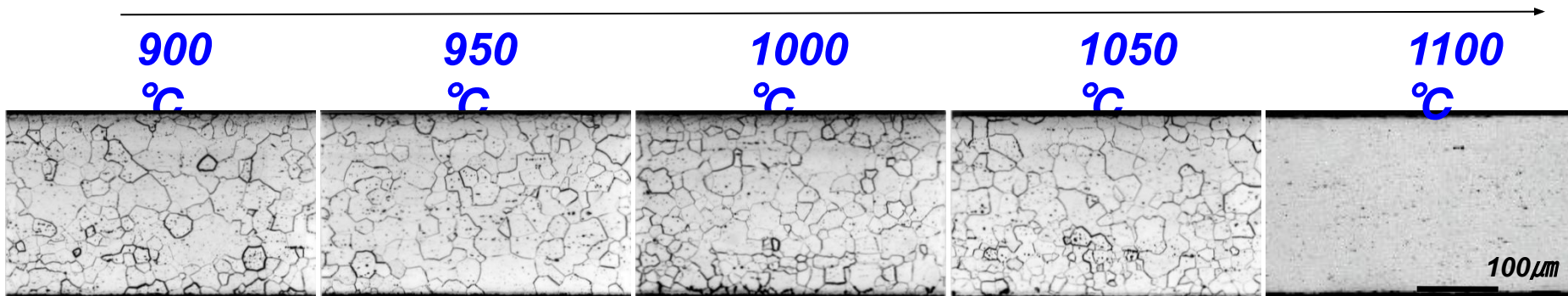


INVENTOR
Norman P. Goss
by his attorney
Albert Grobstein

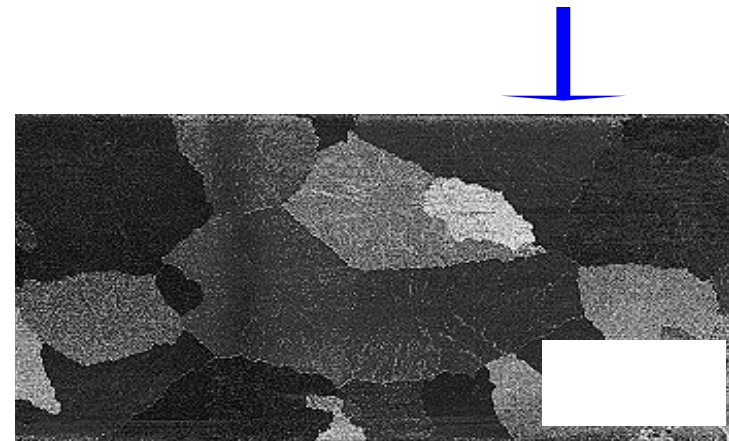
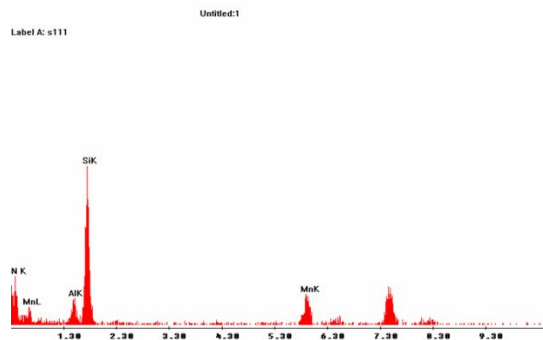
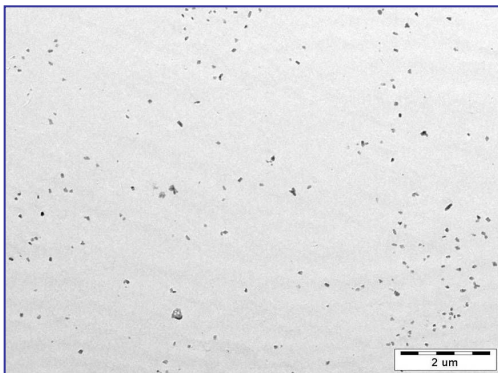
1.2 Электротехническая анизотропная сталь

- В 1935 году Р. Бозортом (R.M. Vozorth) показал рентгеновскими исследованиями, что высокие магнитные свойства стали вдоль направления холодной прокатки объясняются наличием в материале благоприятной текстуры (110)[001] (ребровая текстура, текстура Госсса).
- В 1949 году Данн (C.G. Dunn) указал на вторичную рекристаллизацию (ВР, аномальный рост зерен), как на процесс ответственный за развитие ориентировки (110)[001] в ЭАС. Еще позже были установлены основные условия реализации аномального роста в материалах – **предотвращение собирательной рекристаллизации за счет наличия дисперсных частиц второй (ингибиторной) фазы.**

Вторичная рекристаллизация



• В настоящее время в качестве ингибиторных фаз при производстве ЭАС используются сульфиды и селениды марганца – MnS, MnSe и нитриды алюминия – AlN. В русскоязычной литературе технологию производства ЭАС зачастую называют по типу используемой ингибиторной фазы (сульфидная, сульфо-нитридная, нитридная и т.п.).



Параметры ингибиторной фазы (AlN, MnS):

- объёмная доля $\sim 0.015\%$;
- количество частиц $\sim 10^{12}-10^{14}$ шт/см³;
- размер частиц $< 1000 \text{ \AA}$.

Удельные электромагнитные 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.

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

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

- 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:

$$P_G = S f / \gamma.$$

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 $H_c \sim D^{-1}$.

- 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

Удельные электромагнитные потери на перемагничивание в электротехнической (трансформаторной) стали

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	$\sim f$	$\sim f^2$	$\sim f^{1.5}$

1.2 Электротехническая анизотропная сталь

- Традиционно ЭАС по величине магнитной индукции ($B_{800} \geq 1.88$ Тл) разделяют на два класса: сталь обычного качества (коммерческого класса, CGO) и высокопроницаемую сталь (HGO, HI-B).
- Сталь с ограниченной проницаемостью, как правило, применяется в сердечниках распределительных трансформаторов и вращающихся машин малой мощности, работающих при достаточно низких индукциях. Область применения высокопроницаемой стали – сердечники силовых трансформаторов большой мощности, где соображения минимизации габаритов и энергоэффективности имеют первостепенное значение.
- На 2017 год высокопроницаемая сталь ($B_{800} \geq 1.90$ Тл) занимает ~ 60 % от объема производства анизотропных сталей. Общий объем производства ЭАС ~ 3 млн. т/год

Спасибо за внимание!