

Открытое акционерное общество  
«Новолипецкий металлургический комбинат»  
Дирекция по персоналу и общим вопросам  
Управление профессионального развития персонала  
Центр корпоративного обучения

## Производство трансформаторной стали

ЦЕЛЬ КУРСА: повышение квалификации действующих руководителей и  
кадрового резерва

РАЗРАБОТАНО: Инженерный центр

РАЗРАБОТЧИК: зам. начальника Инженерного центра  
по электротехническим сталям С.В. Бахтин



# Новолипецкий металлургический комбинат (НЛМК)

# ОГЛАВЛЕНИЕ

- Классы металлов по магнетизму
- Основные характеристики электротехнических сталей (ЭТС)
- Классификация электротехнических сталей по ГОСТ 21427.1 и ГОСТ 21472.2
- Текстура и структура электротехнических сталей
- Технические характеристики электроизоляционных покрытий на трансформаторной стали
- История производства электротехнических сталей
- Область применения электротехнических сталей
- Варианты производства трансформаторной стали
- Основные мировые производители электротехнической стали
- Схема производства горячекатаного подката ЭАС
- Выплавка и разливка ЭАС
- Горячая прокатка ЭАС

# ОГЛАВЛЕНИЕ

- Автоматическая система контроля качества поверхности горячекатаных полос
- Химический состав ЭАС. Режим горячей прокатки
- Требования к горячекатаному подкату
- Технологическая схема производства трансформаторной стали
- Лазерная обработка трансформаторной стали
- Сортамент
- Основные характеристики
- Новое и реконструированное оборудование
- Этапы освоения технологии производства высокопроницаемой электротехнической анизотропной стали
- Схема производства высокопроницаемой ЭАС (с азотированием при обезуглероживающем отжиге) – ОАО «НЛМК»
- Магнитные свойства стали производства «НЛМК» и других производителей
- Приложения

## Классы металлов по магнетизму:

- магнитно неупорядоченные (диамагнитные и парамагнитные металлы);
- магнитно упорядоченные (ферромагнитные и антиферромагнитные).

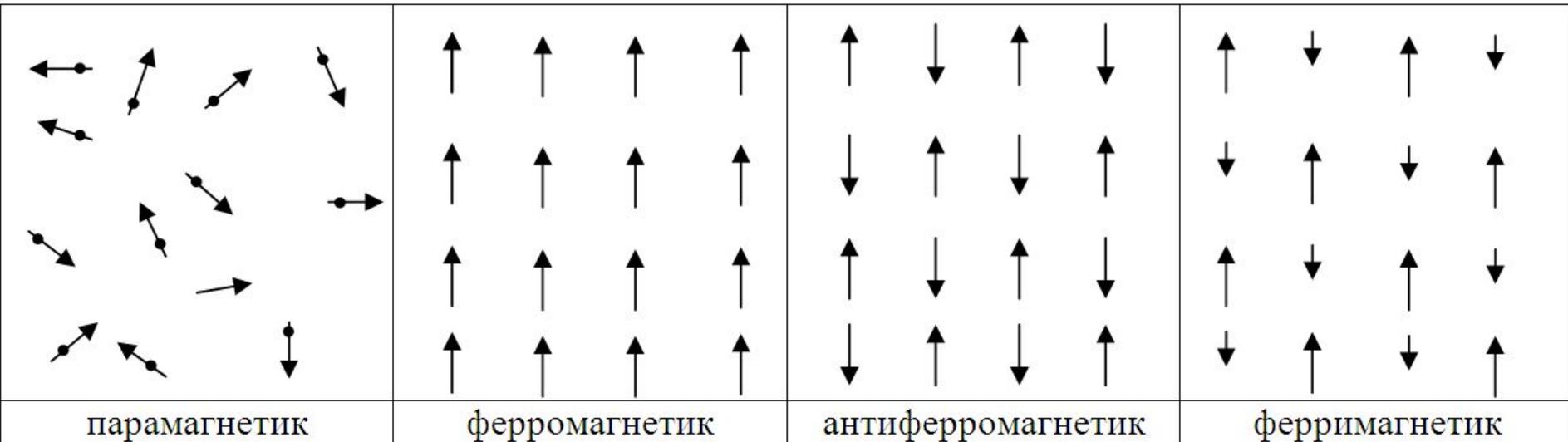
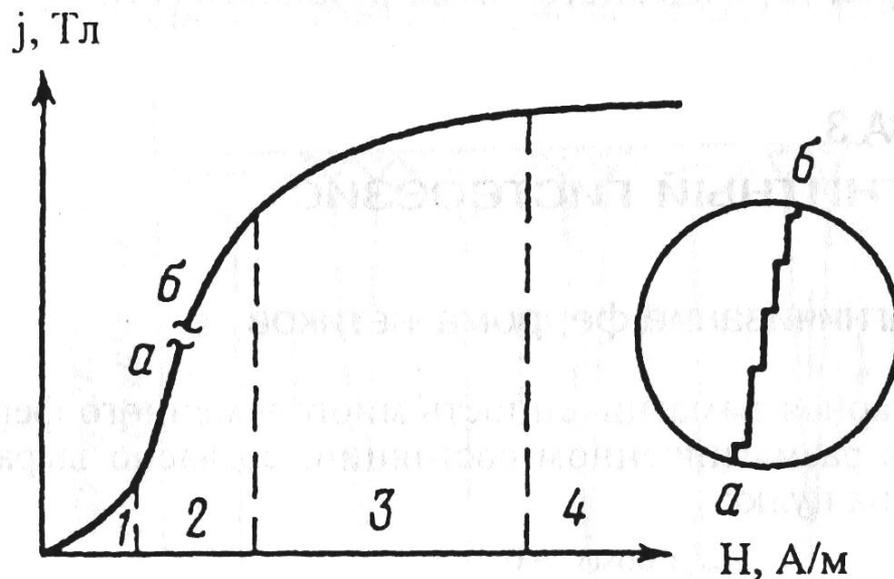


Схема упорядочения атомных моментов

## Основные характеристики электротехнических сталей (ЭТС)



Кривая намагничивания:

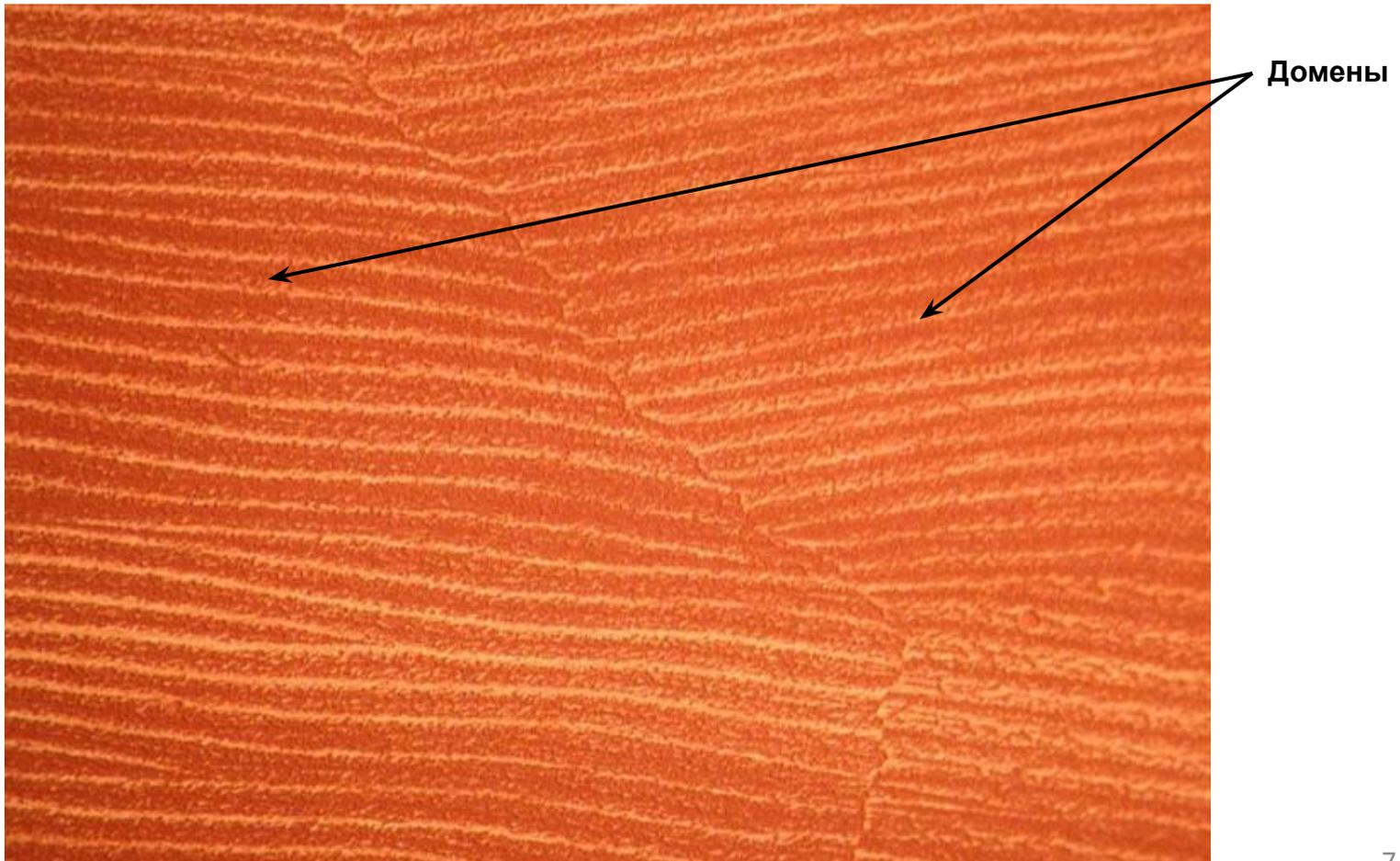
Процесс намагничивания материала во внешнем магнитном поле характеризуется **основной кривой намагничивания**, представляющей собой изменение магнитной индукции  $B$  в зависимости от напряженности внешнего поля  $H$ . Намагничивание осуществляется за счет процесса смещения границ доменов.

На кривой намагничивания различают четыре участка

- 1 – начальное (обратимое) смещение
- 2 – необратимое смещение;
- 3 – процессы вращения;
- 4 – область парапроцесса.

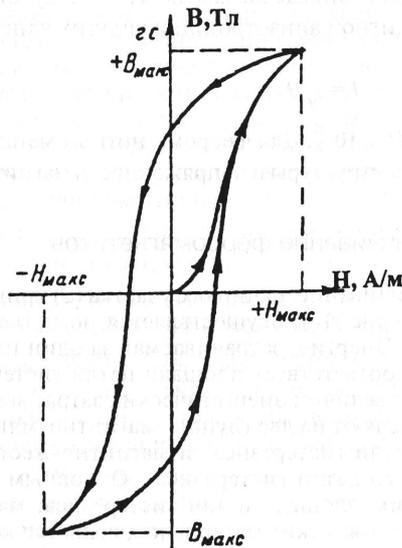
### Основные характеристики электротехнических сталей (ЭТС)

**Домены (области самопроизвольной намагниченности)** – намагниченные до насыщения части объема ферромагнетика (обычно имеющие линейные размеры  $\sim 10^{-3}$ - $10^{-1}$  см).



## Основные характеристики электротехнических сталей (ЭТС)

- **Магнитная проницаемость  $\mu$**  – отношение индукции к напряженности поля В/Н при намагничивании предварительно размагниченого образца.
- **Начальная магнитная проницаемость  $\mu_0$**  – предел нормальной проницаемости при В и Н, стремящихся к нулю.
- **Максимальная магнитная проницаемость  $\mu_{\max}$**  – значение проницаемости, соответствующее максимуму на кривой нормальной проницаемости
- **Индукция насыщения  $B_s$**  – предел возрастания внутренней индукции (В-Н) ферромагнетиков при увеличении напряженности внешнего поля.



- Кривая, показывающая изменение магнитной индукции за один период изменения магнитного поля, получила название **петли гистерезиса**. При некотором значении амплитуды напряженности поля  $H_m$  площадь петли гистерезиса достигает наибольших размеров. Эта наибольшая петля называется **предельной петлей гистерезиса**

Величина напряженности, обратной магнитному полю, необходимая для полного размагничивания образца  $B=0$ , называется **коэрцитивной, или размагничивающей, силой  $H_c$** .  
Значение магнитной индукции на петле гистерезиса при устранении поля  $H=0$  А/м называется **остаточной магнитной индукцией  $B_r$** .

### Основные характеристики электротехнических сталей

- **Магнитная индукция  $B$  (Тл)** – величина магнитного потока, отнесенная к единице площади поперечного сечения магнитопровода. Нижний цифровой индекс у буквы  $B$  показывает напряженность магнитного поля (в ампервитках на м), при которой получается заданная индукция (например,  $B_{100}$ ,  $B_{800}$ )
- **Напряженность магнитного поля  $H$  (А/м)** – магнитодвижущая сила на единицу длины магнитной цепи, которая необходима для создания указанного магнитного потока.
- **Удельные магнитные потери  $P$  (Вт/кг)** – потери энергии в сердечнике, отнесенные к его массе. Обозначаются буквой  $P$  с двумя нижними индексами, первый из которых обозначает индукцию в Тл, а второй – частоту переменного тока. (например,  $P_{1,7/50}$ ,  $P_{1,5/50}$  и т.д.)
- **Удельные магнитные потери** состоят из двух составляющих:
  - **потери на гистерезис  $P_g$**  – энергия, выделяющаяся в форме теплоты при намагничивании и размагничивании сердечника ;
  - **потери на вихревые токи  $P_v$**  – потери энергии в виде тепла из-за возникновения при намагничивании вихревых токов.
- **в действующих российских и международных стандартах на электротехническую анизотропную сталь нормируются:**
  - *удельные магнитные потери при частоте тока 50, 60 Гц и магнитной индукции  $B=1,5; 1,7$  Тл -  $P_{1,5/50}$ ,  $P_{1,5/60}$ ,  $P_{1,7/50}$ ,  $P_{1,7/60}$  соответственно;*
  - *магнитная индукция при напряженности магнитного поля при напряженности магнитного поля  $H=100; 800$  А/м -  $B_{100}$ ,  $B_{800}$  соответственно.*
- **Магнитострикция** – изменение размеров тела при намагничивании
- **Линейная магнитострикция  $\lambda$**  – отношение  $\Delta L/L$  ( $L$  – длина образца в ненамагниченном состоянии,  $\Delta L$  – изменение длины образца в направлении, параллельном полю).
- **Объемная магнитострикция** – изменение объема тела при намагничивании и определяется из отношения  $\Delta V/V$  ( $V$  – объем образца в ненамагниченном состоянии, а  $\Delta V$  – изменение объема при наложении магнитного поля).
- **Магнитная анизотропия** – изменение магнитных свойств электротехнических сталей в разных кристаллографических направлениях

## Классификация электротехнических сталей по ГОСТ 21427.1 и ГОСТ 21472.2

### □ по структурному состоянию и виду прокатки на классы

- 1 – горячекатаная изотропная
- 2 – холоднокатаная изотропная
- 3 – холоднокатаная анизотропная с ребровой текстурой

### □ по содержанию кремния и алюминия на группы

- 0 – до 0,4 % (нелегированная);
- 1 – от 0,4 до 0,8 %
- 2 – от 0,8 до 1,8 %
- 3 – от 1,8 до 2,8 %
- 4 – от 2,8 до 3,8 %

### □ по основной нормируемой характеристике на группы

- 0 – удельные потери  $P_{1,7/50'}$
- 1 – удельные потери  $P_{1,5/50'}$
- 2 – удельные потери  $P_{1,0/400}$

В обозначении марки стали цифры означают: - первая – класс по структурному состоянию и вид прокатки; вторая – содержание кремния; третья – группа по основной нормируемой характеристике; четвертая – порядковый номер типа стали (качество материала – чем больше цифра, тем выше качество стали).

**Пример.** 3408 – холоднокатаная электротехническая анизотропная сталь, 4-ая группа легирования (содержание кремния и алюминия от 2,8 до 3,8 %), нормируемая характеристика - удельные потери  $P_{1,7/50'}$  порядковый номер 8 (для толщины 0,30 мм  $P_{1,750} \leq 1,20$  Вт/кг,  $B_{100} \geq 1,71$  Тл)

## Классификация электротехнических сталей по EN 10107

- **буква М** – электротехническая сталь;
- **число после буквы М** – удельные магнитные потери, умноженные на 100 (для индекса N –  $P_{1,5/50}$ , для индексов S и P –  $P_{1,7/50}$ );
- **число после потерь** – толщина проката, умноженная на 100;
- **индекс после толщины** – N – нормальный материал, S – материал с пониженными потерями, P – материал с высокой проницаемостью

**Пример.** M130-27S – холоднокатаная электротехническая анизотропная сталь, толщина 0,27 мм, удельные магнитные потери  $P_{1,7/50} \leq 1,30 \text{ Вт/кг}$

### Примечание.

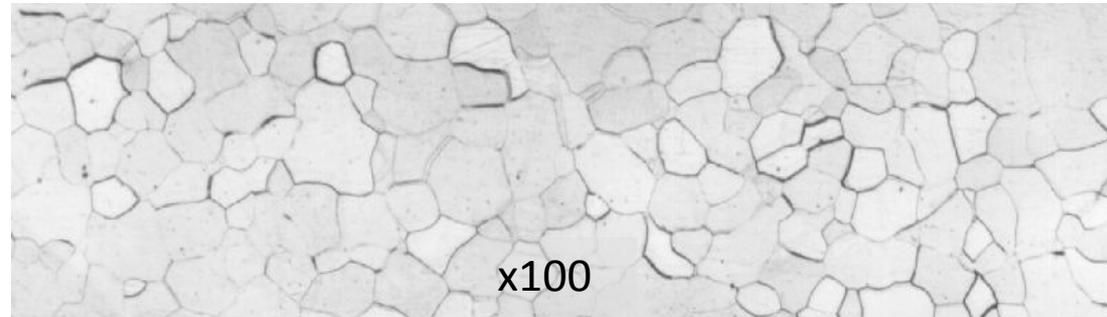
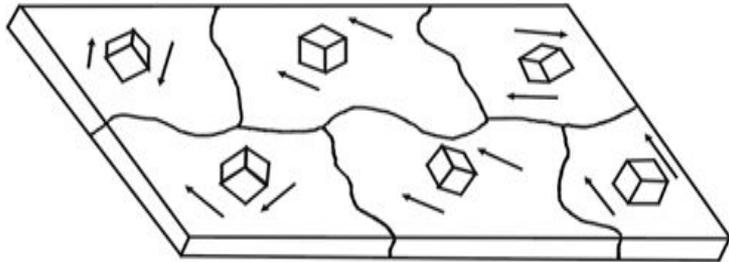
Различия в классификации по ГОСТ 21427.1 и EN 10107:

- меньшее количество марок в EN 10107 (большой разбег по удельным потерям внутри марки);
- нормируемой характеристикой в EN 10107 является  $B_{800}$ , а не  $B_{100}$ .

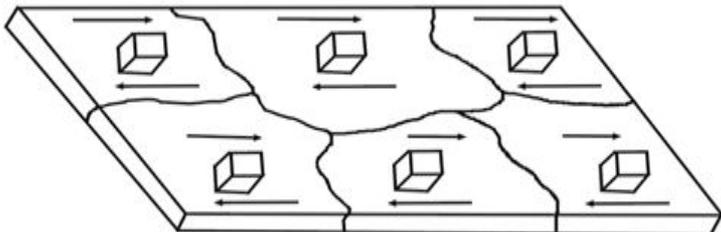
# Производство трансформаторной стали

## Текстура и структура электротехнических сталей

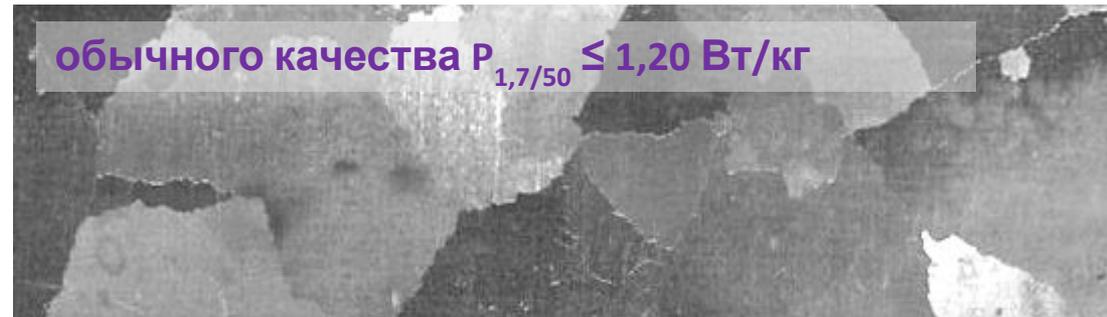
### Изотропная (динамная) сталь со смешанной текстурой



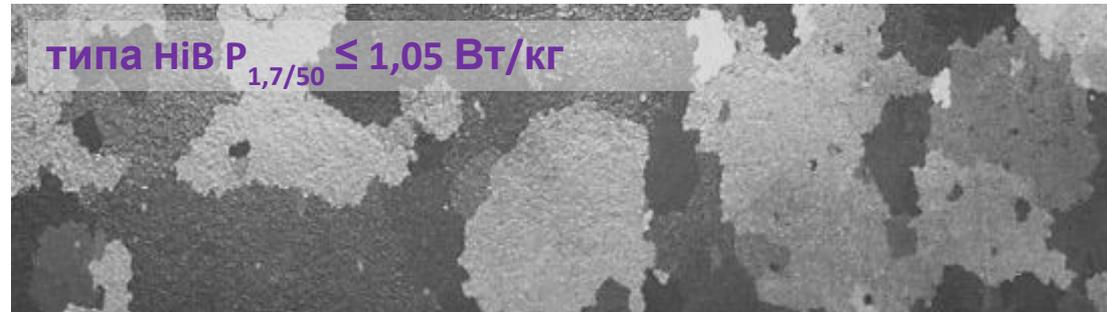
### Анизотропная (трансформаторная) сталь с ребровой текстурой (110)[001]



обычного качества  $P_{1,7/50} \leq 1,20$  Вт/кг

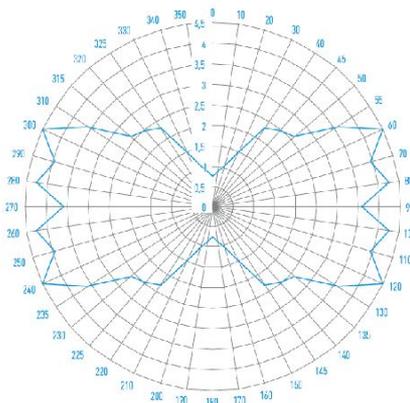


типа HiB  $P_{1,7/50} \leq 1,05$  Вт/кг

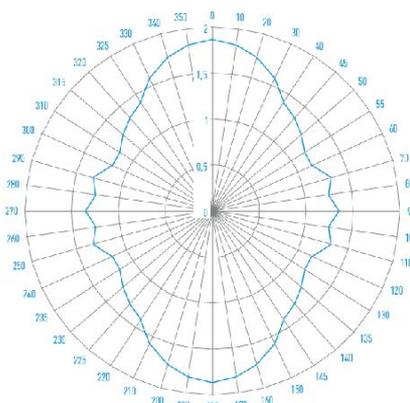


## Изменение удельных магнитных потерь и магнитной индукции в зависимости от угла к направлению прокатки

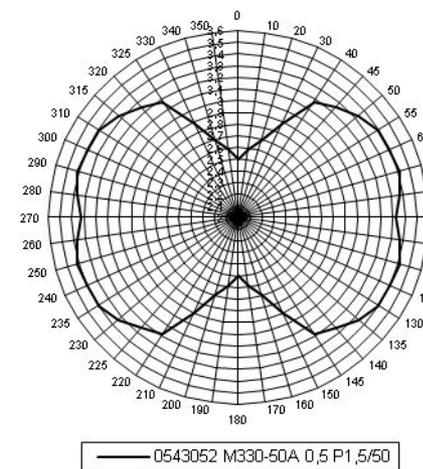
Удельные магнитные потери  $P_{1,5/50}$  в зависимости от угла к направлению прокатки  
0,27 мм, 3409



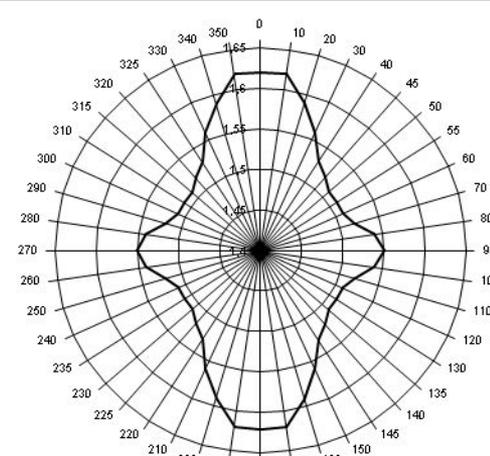
Магнитная индукция  $B_{300}$  в зависимости от угла к направлению прокатки  
0,27 мм, 3409



Трансформаторная сталь



0543052 M330-50A 0,5 P1,5/50



0543052 M330-50A 0,5 B2500

Динамическая сталь

## Технические характеристики электроизоляционных покрытий на трансформаторной стали

Классификация покрытий				Тип раствора	Основа	Внешний вид	Толщина мкм	R Ом·см <sup>2</sup>	Термостойкость	Влагостойкость
ГОСТ 21427.1	ASTM 976	EN 10342	Nippon Steel							
ЭТ	C-4	EC-4	-	Фоскон-302	Фосфаты	Серое, шероховатое	До 5	Не менее 20	840 °С Нейтральная среда	Гигроскопично в среде с повышенной влажностью
ЭТ	C5	EC-5-G	S2	Фоскон-307 S3	Силикаты, фосфаты	Серое, глянцевое	До 5	Не менее 70	840 °С Нейтральная среда	Влагостойкое

### История производства электротехнических сталей

**Электротехнические стали (ЭТС)** – специальный класс магнитно-мягких ферромагнитных материалов (сплавы технического железа с кремнием и иногда с алюминием), которые используются для изготовления магнитопроводов и магнитоактивных частей разнообразных электротехнических устройств.

Сплавы Fe – Si в зависимости от структуры, текстуры, уровня магнитных свойств и назначения подразделяют на анизотропную (трансформаторную) и изотропную (динамную). Трансформаторная сталь является одним из наиболее высокотехнологичных и дорогостоящих видов продукции, поскольку требует значительных производственных затрат. Отношение затрат на переработку к стоимости исходного сырья, энергетических и вспомогательных материалов для трансформаторной стали составляет 65-80%, а для автолиста и высокопрочных сварных труб этот показатель составляет 20 – 40%.

- **1900 г.** – первые исследования магнитных свойств сплава железа с кремнием (В. Баррет, В. Браун и Р. Гадфилд – Великобритания)
- **1903 г.** – первая в мире промышленная партия электротехнического железа с добавками кремния
- **1933 г.** – освоение промышленного производства холоднокатаной трансформаторной стали с текстурой (110)[001] (текстура Госса)
- **1966 г.** – освоение производства высокопроницаемой трансформаторной стали типа Ni-B (высокотемпературный нагрев слябов)
- **1968-1985 гг.** – оптимизация доменной структуры (насечка, лазерное скрайбирование, плазменная обработка)
- **1995 г.** – производство высокопроницаемой трансформаторной стали типа Ni-B с азотированием в конечной толщине (низкотемпературный нагрев слябов)

# Производство трансформаторной стали

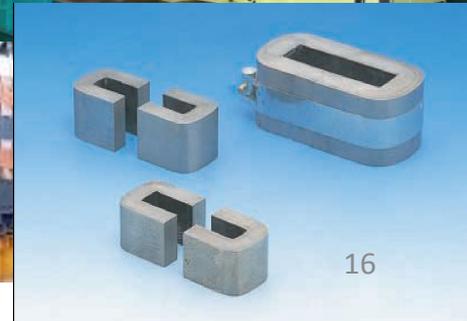
## Область применения электротехнических сталей

*Изотропная сталь  
(Динамная)*

*Анизотропная сталь  
(Трансформаторная)*

Изготовление статоров и  
роторов электродвигателей

Изготовление сердечников  
трансформаторов



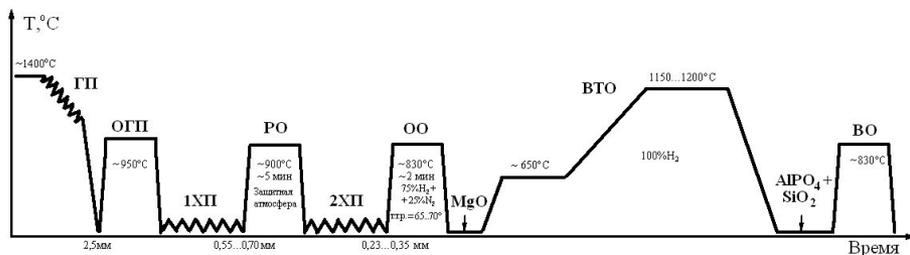
# Производство трансформаторной стали

## Использование анизотропной стали для производства магнитопроводов трансформаторов

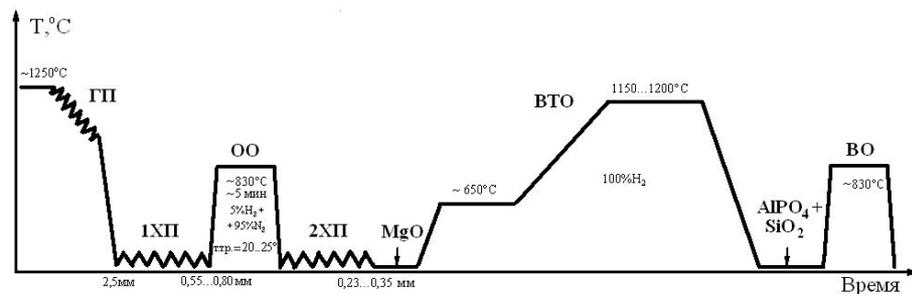


# Производство трансформаторной стали

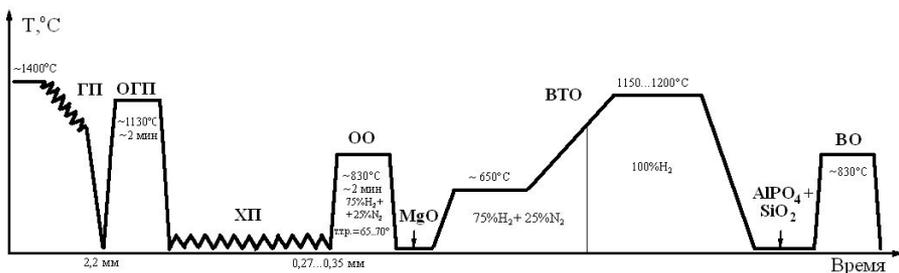
## Варианты производства трансформаторной стали



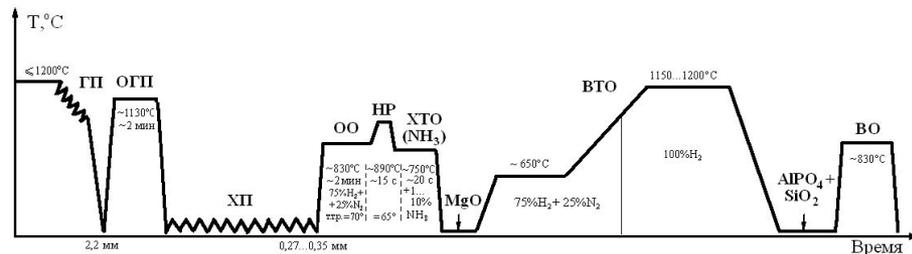
сульфидный вариант



нитридно-медный вариант

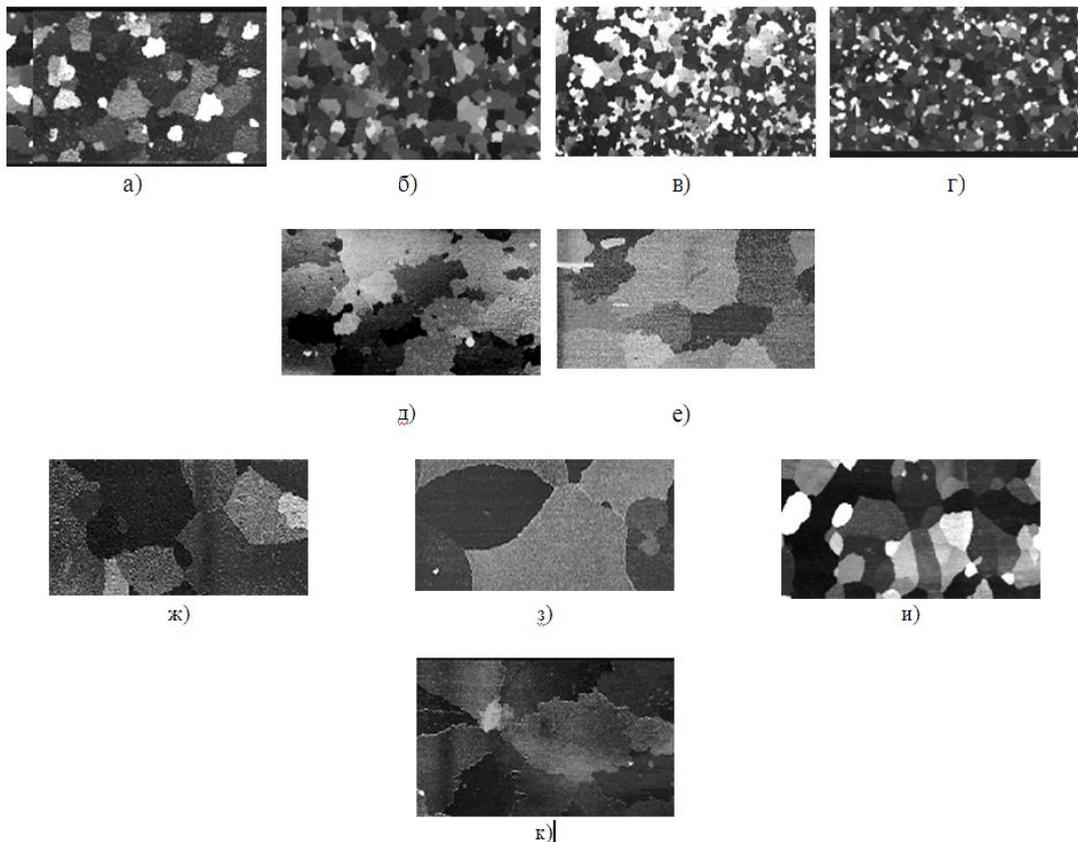


сульфо-нитридный вариант



метод приобретенного ингибитора

## Варианты производства трансформаторной стали



### Макроструктура ЭАС различных вариантов производства (толщина всех образцов 0,30 мм):

- а - сульфидная технология (Armco, США)  $V_{800}=1,83$  Тл,  $P_{1,7/50}=1,24$  Вт/кг;
- б - сульфидная с селеном технология (Kawasaki, Япония)  $V_{800}=1,87$  Тл;  $P_{1,7/50}=1,05$  Вт/кг;
- в - сульфидная технология (ЧМК-ВИЗ, Россия)  $V_{800}=1,82$  Тл,  $P_{1,7/50}=1,32$  Вт/кг;
- г - сульфидная технология (WISCO, Китай)  $V_{800}=1,85$  Тл,  $P_{1,7/50}=1,16$  Вт/кг;
- д - сульфо-нитридная технология (NSC, Япония)  $V_{800}=1,92$  Тл,  $P_{1,7/50}=1,03$  Вт/кг;
- е - сульфо-нитридная технология (Armco, США)  $V_{800}=1,92$  Тл,  $P_{1,7/50}=1,01$  Вт/кг;
- ж – нитридная с медью технология (НЛМК; ММК-ВИЗ, Россия)  $V_{800}=1,90$  Тл;  $P_{1,7/50}=1,12$  Вт/кг
- з – нитридная с медью технология (НЛМК; ММК-ВИЗ, Россия)  $V_{800}=1,88$  Тл;  $P_{1,7/50}=1,22$  Вт/кг;
- и – нитридная технология (Valcovny Plechu, Чехия)  $V_{800}=1,80$  Тл;  $P_{1,7/50}=1,43$  Вт/кг;
- к – технология приобретенного ингибитора (NSC, Япония)  $V_{800}=1,92$  Тл;  $P_{1,7/50}=1,03$  Вт/кг.

## Основные мировые производители электротехнической стали



# Производство трансформаторной стали

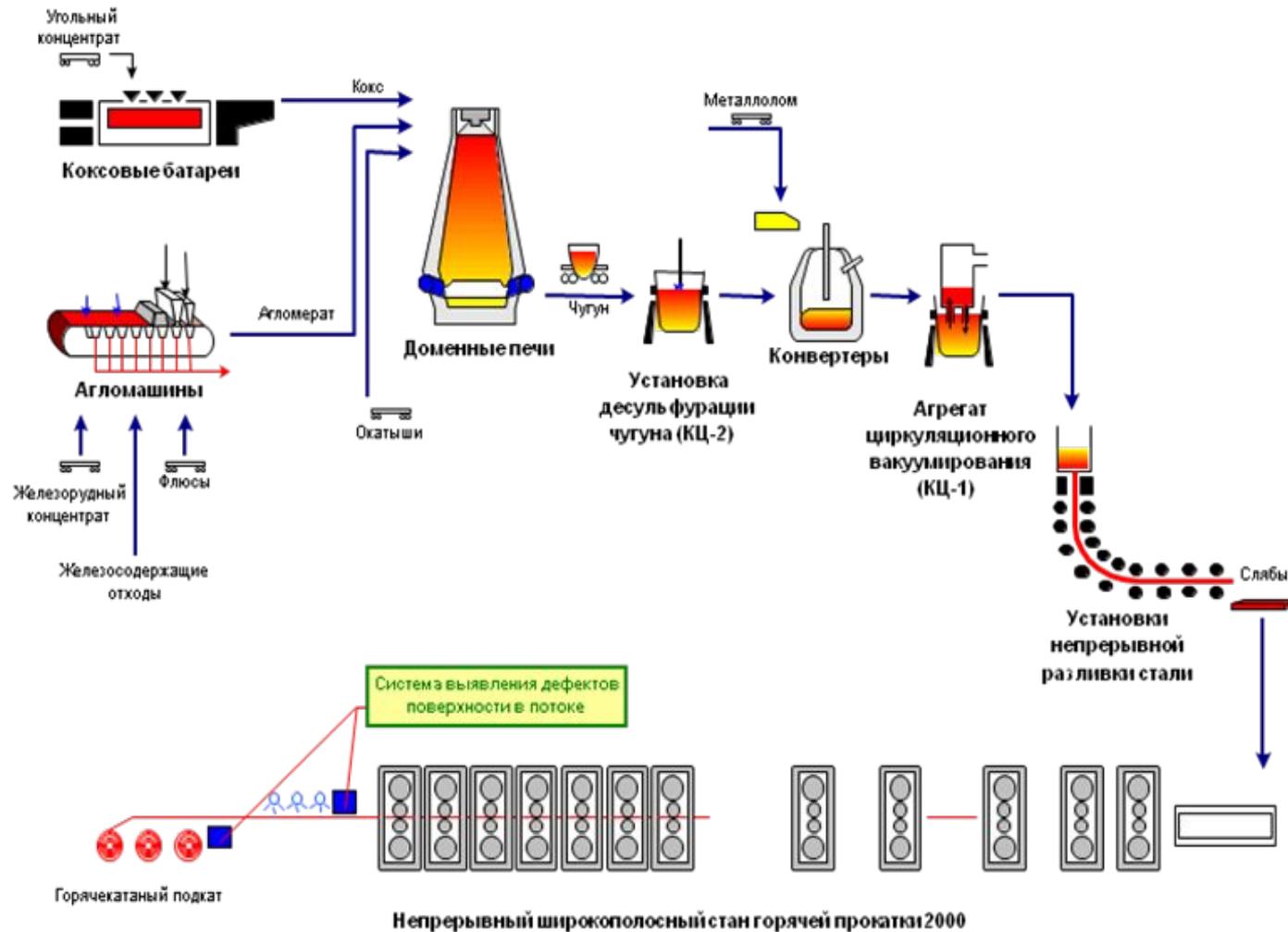
## Варианты производства трансформаторной стали (2008 г.)

Фирмы-производители ЭАС	Используемые технологии производства ЭАС	Производство ЭАС (НН-В), тыс. т /%***
1. Nippon Steel Corporation (NSC) 1.1 (о. Хирохата, Япония) 1.2 (о. Явата, Япония)	1) Технология «NSC» (сульфонитридная) 2) Вероятно технология «Агтсо» (сульфидная) Метод приобретенного ингибитора (МПИ) с серединных 90-х	240/11 (215/32)
2. JFE (ранее Kawasaki Steel Corporation – KSC) (Япония)	1) Технология «Kawasaki» (сульфидно-селеново-сурьмяная) 2) Вероятно МПИ	180/8 (125/19)
3. Posco (г. Похан Ю.Корея)	1) До конца 20-го века нитридная с медью технология 2) с начала 21-го века вероятно МПИ	200/9 (155/23)
4. НЛМК 4.1 ОАО «НЛМК» (г. Липецк, Россия) 4.2 ООО «ВИЗ-Сталь» (г. Екатеринбург, Россия), («НЛМК» с 2006г)	Нитридная с медью технология 1) С 1973 по . технология «Агтсо» 2) С . нитридная с медью технология	350/16
5. ThyssenKrupp Electrical Steel EBG GmbH – EBG 5.1 Thyssen Krupp Stahl AG (г. Гильзенкирхен, Германия) 5.2 Ugine (г. Дульсбург, Франция) 5.3 Ramond (Индия)	1) Технология «Агтсо» (сульфидная) 2) Технология «NSC» (сульфонитридная) 3) Вероятно МПИ с . 1) Технология «Агтсо» (сульфидная) 2) Технология «NSC» (сульфонитридная) Вероятно технология «Агтсо» (сульфидная)	260/12 (115/17)    10/0
6 Cogent ORB (г. Нью-Порт, Великобритания)	1) Технология «Агтсо» (сульфидная) 2) Технология «NSC» (сульфонитридная)	70/3 (5/1)
7 Stalproduct (г. Бохня Польша)	1) До конца 20-го века технология «Агтсо» (сульфидная) 2) С начала 21-го века нитридная с медью технология	60/3
8 Arcelor Mittal (Valcovny Plechu, г. Фридек-Мистек, Чехия)	1) До конца 20-го века нитридная технология 2) с начала 21-го века нитридная с медью технология	
9 АК (ранее «Агтсо») (США)	1) Технология «Агтсо» (сульфидная) 2) Технология «NSC» (сульфонитридная)	310/14 (55/8)
10 Allegheny (США)	Технология близкая к «Агтсо»	100/5
11 Acesita (Бразилия)	Технология «Агтсо» (сульфидная)	60/3
12 WISCO (г. Ухань, КНР)	1) До . технология «Агтсо» (первая линия) 2) С . нитридная с медью технология (вторая линия) 3) С . вероятно МПИ (третья линия)	280/13
13 BAO Steel (г. Шанхай, КНР)	Вероятно МПИ.	100/5 <sup>21</sup>
ВСЕГО		2 220 (670)

# Производство трансформаторной стали

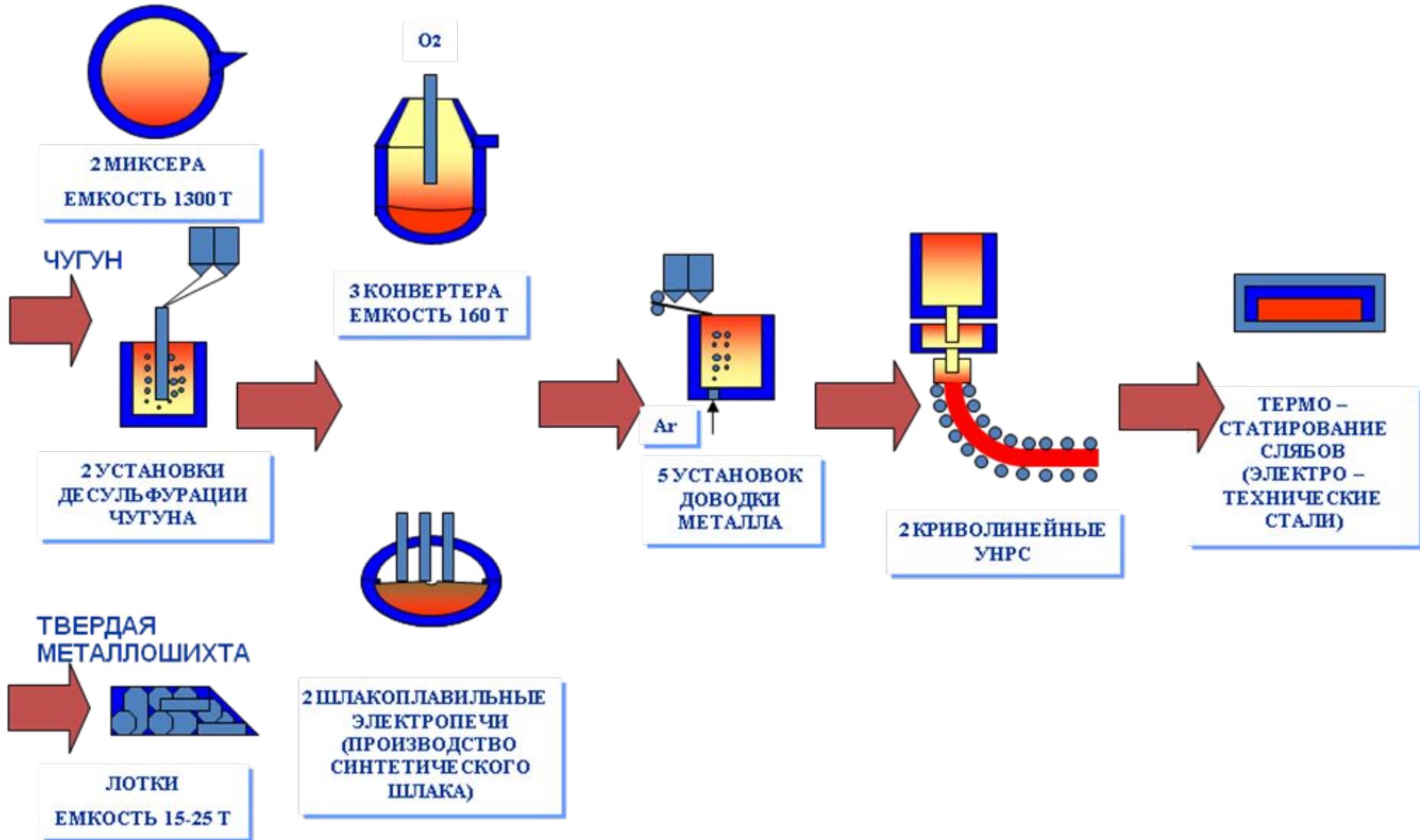
## Схема производства горячекатаного подката ЭАС

### *Чугун - Слябы - Горячекатаный подкат*

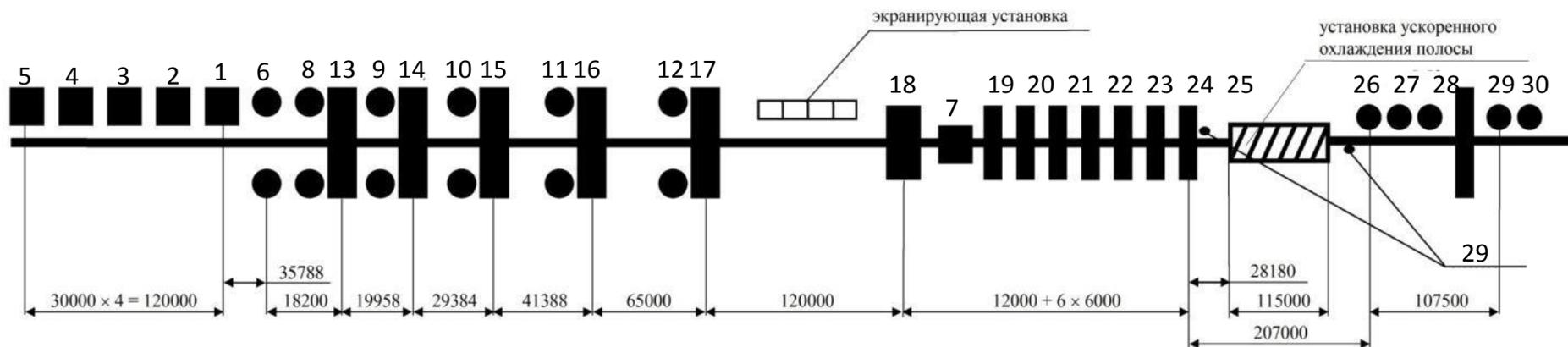


# Производство трансформаторной стали

## Выплавка и разливка ЭАС



## Горячая прокатка ЭАС



- 1÷2 – методические печи (толкательного типа)
- 3 – реконструкция методической печи
- 4÷5 – методические печи (с шагающими балками)
- 6 – вертикальный окатиноломатель
- 7 – горизонтальный окатиноломатель
- 8÷12 – вертикальные клети черновой группы
- 13÷17 – горизонтальные клети черновой группы
- 18 – летучие ножницы
- 19÷25 – горизонтальные клети чистовой группы
- 26÷28 – 1 группа моталок
- 29 – автоматическая система контроля качества поверхности горячекатаной полосы



# Производство трансформаторной стали

## Автоматическая система контроля качества поверхности горячекатаных полос



04/11/2004 15:21:59 bot00105963.xim  
Марка: 0403 Плавка: 420509 Партия: 530254  
Ркв (размер: 84x44мм) 47577.947 мм

10.06.2005 4:12:02 bot00122074.xim  
Марка: 0401 Плавка: 2510295 Партия: 515682  
Печь№3 Дефект: ПЛЛ(ПлСл)  
Положение: 539523 : 868 Размер: 312 : 127

28.05.2005 12:36:09 bot00158695.xim  
Марка: 0401 Плавка: 1509480 Партия: 514429  
Печь№5 Дефект: В.кат(РвКр)  
Положение: 33351 : 14 Размер: 88 : 26

Топография дефектов полос позволяет оперативно принимать корректирующие действия при холодной прокатке.

# Производство трансформаторной стали

## Химический состав ЭАС. Режим горячей прокатки

Марка стали (толщина, мм)	Массовая доля элементов в литой стали, %											
	C	Si	Mn	Al	Cu	N	S	P	Cr	Ni	Ti	Sn
							не более					
"S+N" (0,23; 0,27; 0,30)	0,030-0,038	3,05-3,25	0,28-0,38	0,014-0,019	0,50-0,60	0,010-0,013	0,008	0,015	0,03	0,08	0,004	0,007
"O" (0,30; 0,35; 0,50)	0,030-0,040	3,00-3,25	0,18-0,38	0,014-0,019	0,45-0,60	0,009-0,013	0,009	0,015	0,05	0,10	0,006	0,009
"P" (0,35; 0,50; 0,30)	0,028-0,045	3,00-3,25	0,18-0,38	0,013-0,020	0,45-0,60	0,008-0,013	0,010	0,015	0,05	0,10	0,006	0,009

Нагрев слябов в печах с шагающими балками производят в автоматическом режиме (уставка на целевую температуру выдачи – 1260 °С).

Температура за клетью №5 (температура конца чистовой прокатки):

- для печей с шагающими балками – 1005±15 °С;
- для печей толкательного типа – 1025±15 °С.

Горячую прокатку в чистовой группе стана 2000 производят по следующему режиму:

- температура конца прокатки – 925±15 °С;
- заправочная скорость – 700÷750 м/мин;
- нагрузки на двигатели главных приводов: клетки №11 – 2,0÷4,5 кА, клетки №12 – 1,5÷4,8 кА;
- температура смотки – 550±20 °С;

– душирование полос производят, начиная с полусекции №?, с использованием "нулевых" полусекций. Температура воды на охлаждение полос – 30÷40 °С;

## Требования к горячекатаному подкату

Горячекатаные рулоны, должны удовлетворять следующим требованиям:

- толщина полосы  $(2,5 \pm 0,15)$  мм;
- ширина полосы  $(1060 + 15)$  мм;
- масса рулона от 8 до 20 т;
- внутренний диаметр рулона  $(850 \pm 50)$  мм.

Телескопичность рулонов не должна быть более 30 мм (за исключением первых трех внутренних витков и последних двух наружных витков).

Отдельные витки не должны выступать более чем на 15 мм (за исключением первых трех внутренних витков и последних двух наружных витков).

Разнотолщинность по длине одной полосы без учета концов длиной 15 м не должна быть более 0,24 мм.

Поперечное сечение горячекатаной полосы должно быть симметричным и выпуклым. Поперечная разнотолщинность, определяемая как разность между толщиной в середине полосы и толщиной на расстоянии 40 мм от более тонкой кромки, должна быть от 0,01 до 0,06 мм. Допускается смещение выпуклости от осевой линии полосы на величину не более 150 мм.

Разнотолщинность («клиновидность») полосы, определяемая как разность по абсолютной величине толщин, измеренных на расстоянии 40 мм от кромок, не должна быть более 0,03 мм.

Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) профиля горячекатаного подката, получаемый в результате аппроксимации фактического профиля кривой второго порядка, не должен быть меньше 0,60.

Наибольшая высота местных утолщений, определяемая как разность между наибольшей толщиной местного утолщения и полусуммой толщины в его основании, не должна быть более 0,02 мм.

Допускаются рванины на кромках глубиной не более половины допуска по ширине и не выводящие полосу за номинальный размер по ширине.

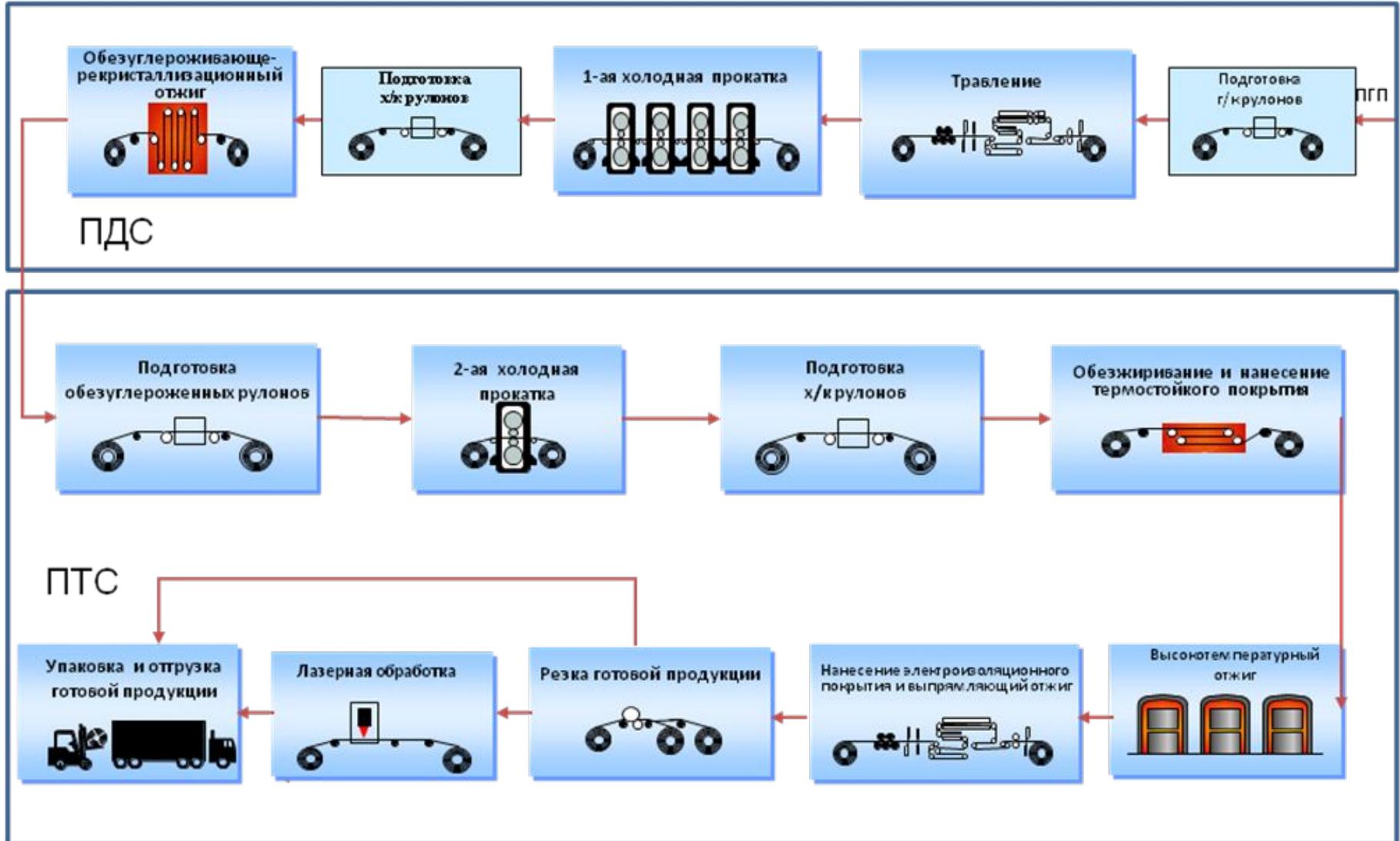
Полосы не должны иметь скрученных или смятых витков, складок. Допускаются в отдельных местах загнутые кромки под углом не более  $45^\circ$ .

Высота отклонения от плоскостности полосы не должна быть более 20 мм на одном метре длины.

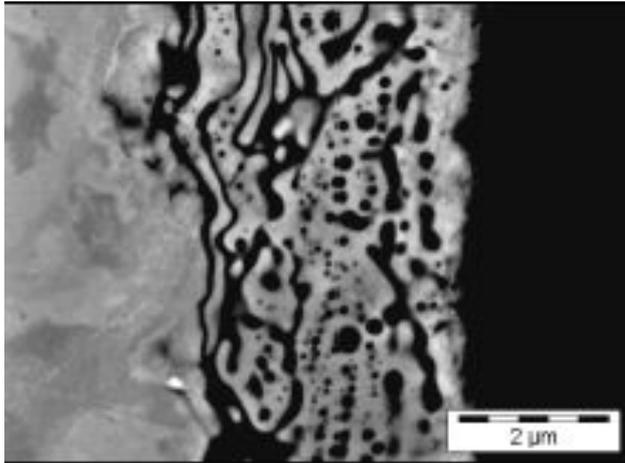
Серповидность полосы не должна быть более 3 мм на одном метре длины (без учета концевых участков по 15 м).

# Производство трансформаторной стали

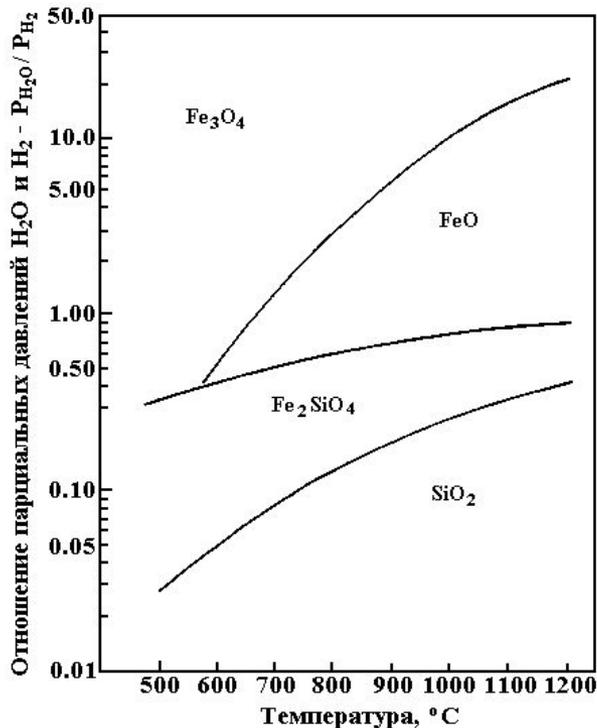
## Технологическая схема производства трансформаторной стали



## Производство трансформаторной стали

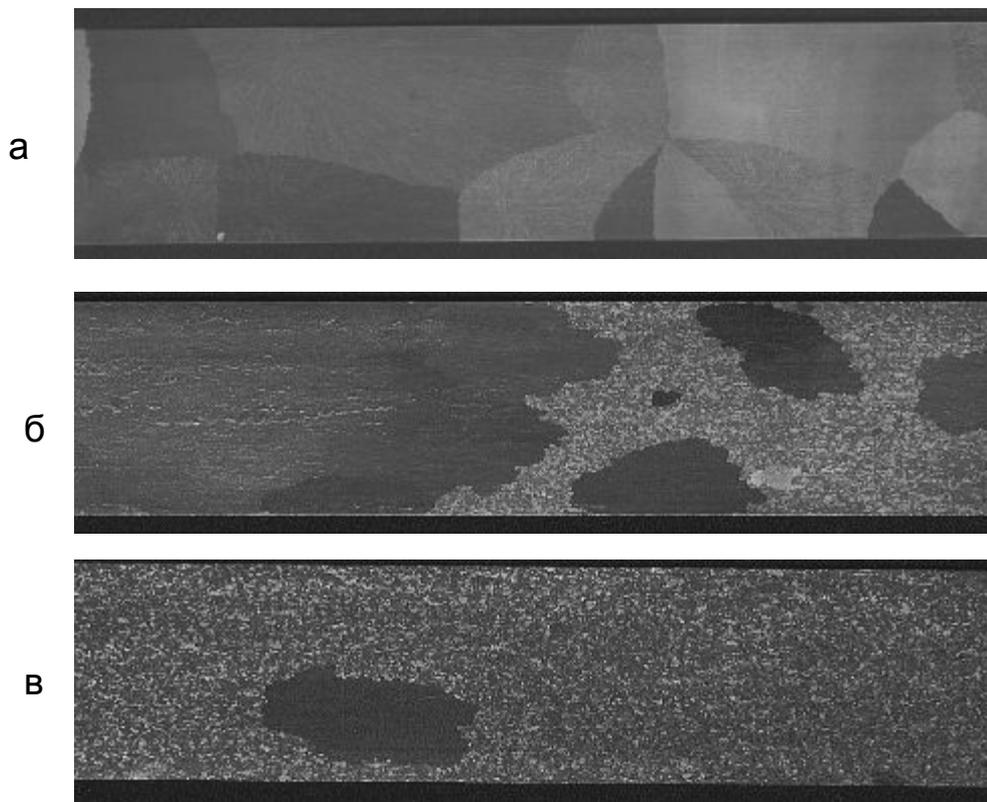


Структура поверхности ЭАС  
после обезуглероживающего отжига



Формирование окислов на поверхности технического сплава Fe-3 % Si в зависимости от температуры и соотношения парциальных давлений паров воды и водорода в атмосфере при обезуглероживающем отжиге

## Производство трансформаторной стали

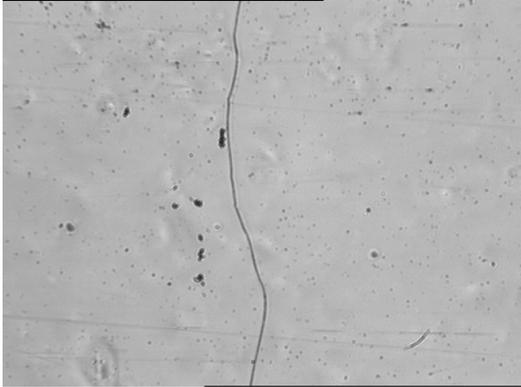


Макроструктура готовой ЭАС:

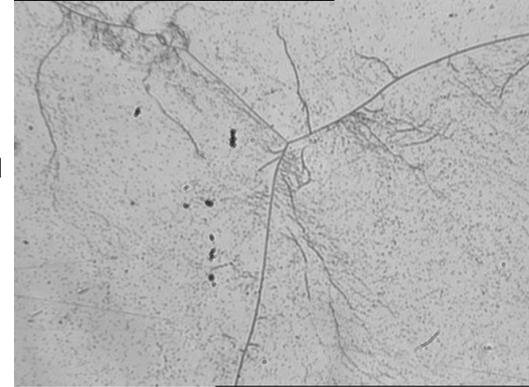
- а) вторичная рекристаллизация полностью прошла;
- б), в) вторичная рекристаллизация прошла не полностью

## Производство трансформаторной стали

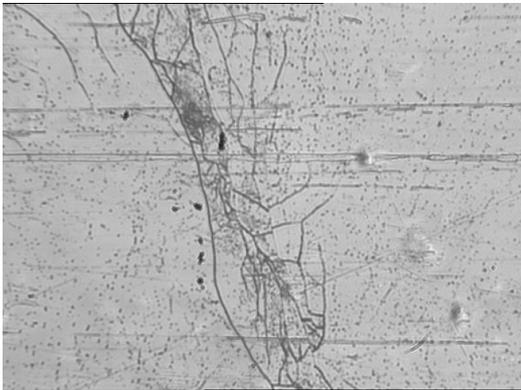
0 мм/м



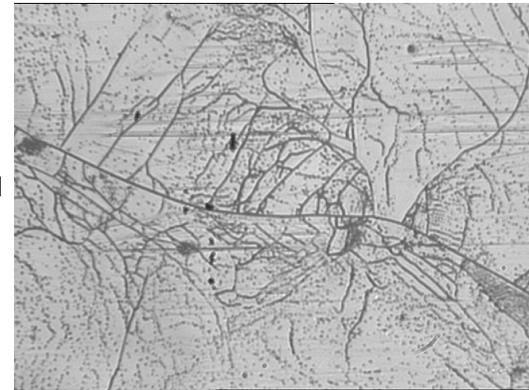
~ 1.5 мм/м



~ 2 мм/м



~ 3,5 мм/м



Влияние вытяжки полосы при выпрямляющем отжиге ЭАС  
на дислокационную структуру вблизи границ зерен

## Производство трансформаторной стали



до кантовки ножей – порезка ~250 партий металла



после кантовки ножей – ножи после шлифовки

Структура зерна в прикромочной зоне аттестационных образцов  
ЭАС  
при порезке металла гильотинными ножницами

## Лазерная обработка трансформаторной стали



### Основные технические характеристики ЛТК:

- Обрабатываемый сортамент: полоса готовой трансформаторной стали с электроизоляционным покрытием размером  $0,23 \div 0,30 \times 600 \div 1040$  мм;
- Технологический лазер: оптоволоконный иттербиевый, выходная мощность до 3,5 кВт, длина волны 1,07 мкм;
- Скорость обработки полосы - до 50 м/мин;
- Производительность агрегата - 40 тыс. тонн в год.

### Отличительные особенности технологии лазерной обработки трансформаторной стали «НЛМК»

- Разработанная технология позволяет снижать удельные магнитные потери  $P_{1,7/50}$ 
  - в толщине 0,23 мм - на 10-16 %;
  - в толщине 0,27 мм - на 8-12 %;
  - в толщине 0,30 мм – на 4-6 %
- Лазерная обработка приводит к незначительному снижению магнитной индукции  $B_{800}$  - не более 0,004 Тл.
- Следы лазерной обработки на поверхности трансформаторной стали визуально не наблюдаются.

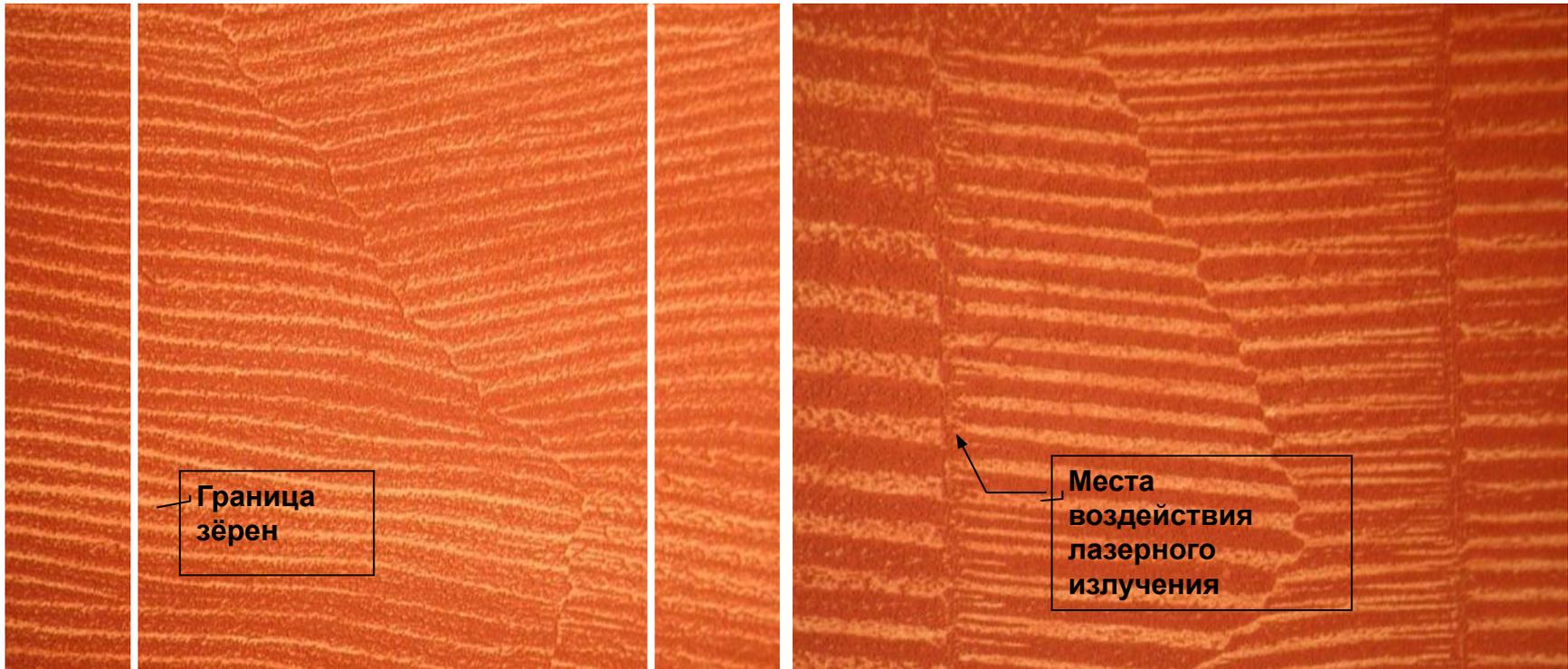
## Изменение доменной структуры трансформаторной стали в результате лазерной обработки

До лазерной обработки

$P_{1.7/50} = 1,127$  Вт/кг  
 $B_{800} = 1,909$  Тл

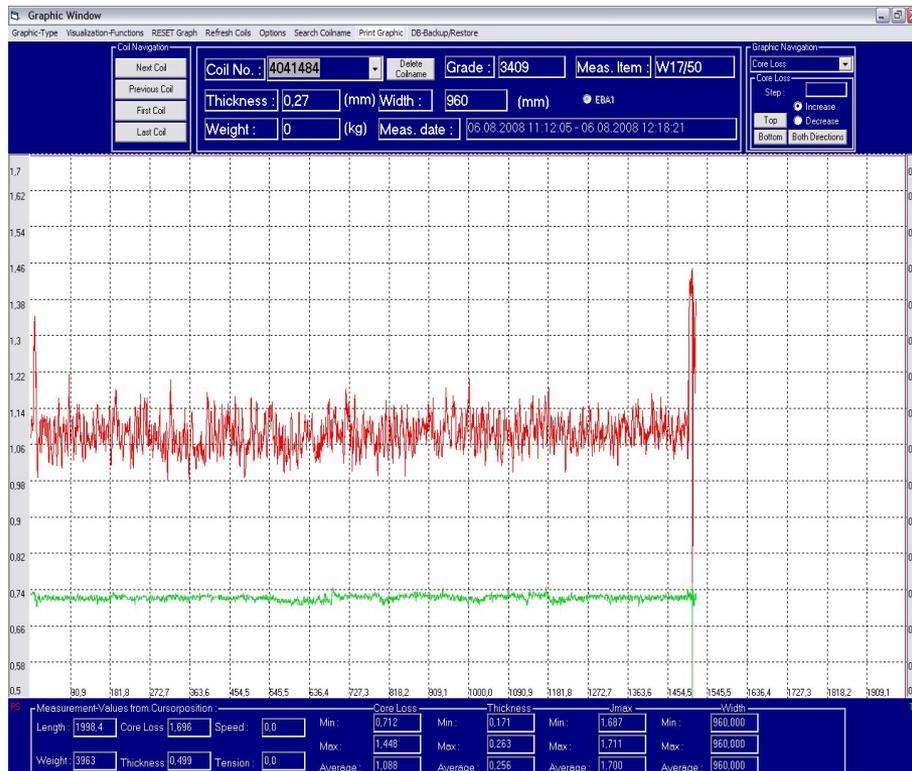
После лазерной обработки

$P_{1.7/50} = 0,976$  Вт/кг ( $\Delta P_{1.7/50} = 13,4$  %)  
 $B_{800} = 1,905$  Тл ( $\Delta B_{800} = 0,2$  %)

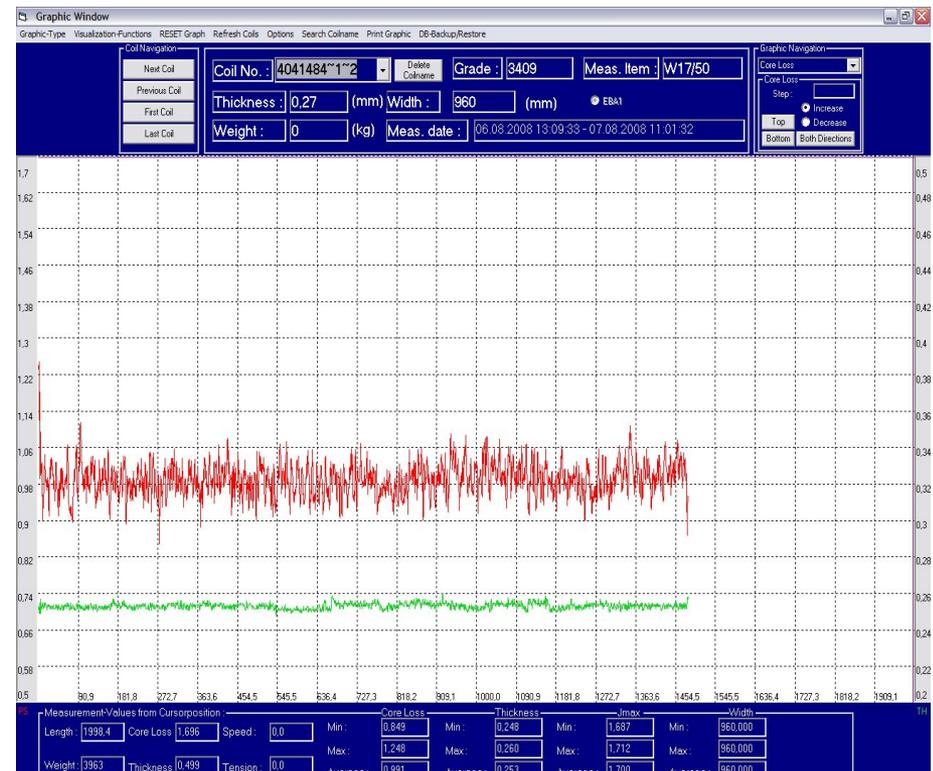


*Лазерная обработка полосы приводит к снижению удельных магнитных потерь за счёт дробления доменной структуры и увеличению количества замыкающих 180-градусных доменов.*

## Результаты измерений ЕВА до и после лазерной обработки (толщина 0,27 мм; Р1,7/50, Вт/кг) ОАО «НЛМК»



Исходные свойства  
 $P_{1,7/50} \text{ ср} = 1,088 \text{ Вт/кг}$



Свойства после лазерной обработки  
 $P_{1,7/50} \text{ ср} = 0,991 \text{ Вт/кг}$

### Внешний вид стали с лазерной обработкой

По внешнему виду металл, с измельченной лазером доменной структурой не отличается от металла, не прошедшего обработку лазером. Следы лазерного воздействия визуально не наблюдаются.

Следы обработки лазером различимы после снятия электроизоляционного покрытия.



## Прокат поставляется в виде рулонов, ленты и листов

<i>Толщина проката</i>	<i>0,15; 0,20; 0,23; 0,27; 0,28; 0,30; 0,35; 0,50; 0,70; 0,80 мм</i>
<i>Ширина проката, поставляемого</i>	
<i>В виде рулонов</i>	<i>От 914 до 1000 мм вкл.</i>
<i>В виде ленты</i>	<i>От 90 до 500 мм</i>
<i>В виде ленты толщиной 0,15</i>	<i>От 16 до 80 мм вкл.</i>
<i>Внутренний диаметр рулонов</i>	<i>270 мм (лента толщиной 0,15); 500 мм</i>
<i>Размеры листов</i>	
<i>Ширина</i>	<i>750 мм</i>
<i>Длина</i>	<i>1500 мм</i>
<i>Масса рулонов</i>	<i>До 5 т</i>
<i>Масса пачек</i>	<i>До 5 т</i>
<i>Масса одного отрезка в рулоне ленты не менее массы, вычисленной из расчета 0,5 кг на 1 мм ширины ленты.</i>	
<i>Масса рулонов ленты толщиной 0,15 мм</i>	<i>4 – 18 кг</i>

## Сортамент

Стандарт	Марка стали
ГОСТ 21427.1 – 83	3409, 3408, 3407, 3406, 3405, 3404, 3414, 3413, 3412, 3311
СТО 05757665-008-2007	NV23S-100L*, NV23S-110, NV23S-120, NV23S-127, NV27P-100, NV27S-105L,* NV27S-100, NV27S-120, NV27S-130, NV27S-140, NV30P-105, NV30S-110L*, NV30S-120, NV30S-130, NV30S-140, NV35S-120, NV35S-130, NV35S-145, NV50S-150, NV50S-200
EN 10107	M100-23P, M110-23S, M120-23S, M127-23S, M120-27S, M130-27S, M140-27S, M105-30P, M111-30P, M130-30S, M140-30S, M150-30S, M125-35P, M140-35S, M150-35S, M165-35S
AISI	M3, M4, M5, M6
ASTM A876M	23P060, 23H070, 23G045, 27P066, 27H074, 27G051, 30H083, 30G058
GB/T 2521	27QG110, 27QG120, 27Q130, 27Q140, 30QG120, 30QG130, 30Q130, 30Q140, 30Q150, 35QG125, 35QG135, 35Q135, 35Q145, 35Q165

\*Индекс L – лазерная обработка

# Производство трансформаторной стали

## Основные

Номинальная толщина проката, мм	<b>характеристики</b> 0,23; 0,27; 0,30; 0,35; 0,50
Ширина проката, мм:	
- в рулонах	до 1000
- в ленте	90-500
Внутренний диаметр рулонов, мм	500
Масса рулонов, т	до 5

Номинальная толщина проката, мм	0,23; 0,27; 0,30	0,35; 0,50
Максимальные отклонения по толщине стали, мм	± 0,020	± 0,030
Максимальные отклонения толщины в области сварного шва, не более, мм	0,02	
Поперечная разнотолщинность, не более, мм	0,02	
Продольная разнотолщинность на длины, не более, мм	0,02	
Заусенец, не более, мм	0,02	

Отношение высоты неплоскостности к ее длине, %, не более	1,5
Высота волны, не более, мм	3,0
Серповидность стали на длины, не более, мм	0,5

Удельная плотность, кг/м <sup>3</sup>	7650
Число перегибов	≥2
Коэффициент старения, %	≤2

## Программа-2. Основные направления развития производства трансформаторной стали в группе «НЛМК»

В 2006 г. утверждены основные направления развития производства трансформаторной стали в группе НЛМК (Программа-2). Программа направлена на достижение мирового уровня качества производимой трансформаторной стали и обеспечение перспективных требований рынка.

Программа предусматривает организацию производства высокопроницаемой стали и улучшение качества стали коммерческого типа и включает в себя строительство нового (станы, печи ВТО, АЭИП, АЗП) и реконструкцию существующего оборудования.

Площадка	Стоимость программы, млрд. руб	Реализовано, млрд.руб	Затраты на завершение проектов, млрд. руб
ОАО «НЛМК»	9,0	8,2	0,8
ООО «ВИЗ-Сталь»	8,6	2,7	5,9
<b>Итого по группе</b>	<b>17,6</b>	<b>10,9</b>	<b>6,7</b>

## Выполнение Программы-2 в ОАО «НЛМК»

### Реализованные проекты

- Агрегат продольной резки с линией упаковки
- Реконструкция реверсивного стана 1200
- Агрегат травления толкательного типа
- Лазерный технологический комплекс
- Реконструкция узлов приготовления оксида магния
- Станок для нарезки роликов термостойкого и электроизоляционного покрытий
- Строительство колпаковых печей высокотемпературного отжига
- Строительство агрегата электроизоляционного покрытия и выпрямляющего отжига

### Объекты на завершающей стадии реализации

- Строительство реверсивного стана
- Реконструкция агрегата нормализации
- Строительство агрегата нанесения защитного покрытия

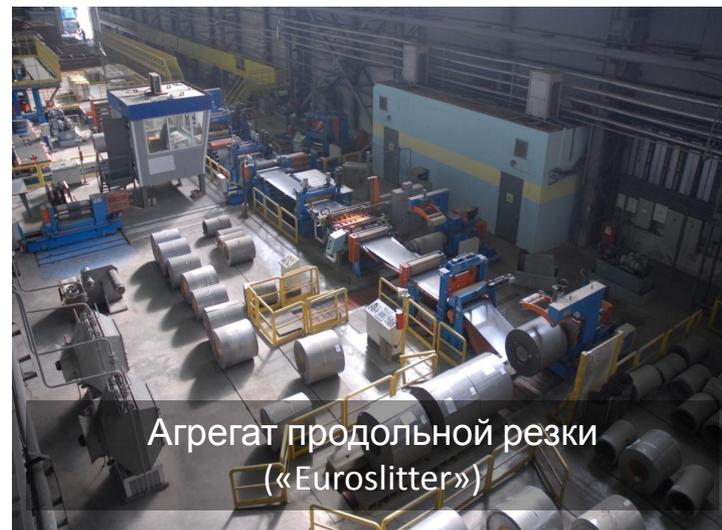
### Объекты с завершением во 2-ой половине 2011 г.

- Реконструкция агрегата непрерывного отжига под азотирование электротехнической анизотропной стали

## Новое и реконструированное оборудование



Агрегат травления толкательного типа («Andritz»)



Агрегат продольной резки («Euroslitter»)



Установка приготовления MgO («Kovofinish»)



Реконструированный реверсивный стан («Уралмаш МО»)

## Новое и реконструированное оборудование



Лазерный технологический комплекс



Агрегат электроизоляционного покрытия и выпрямляющего отжига

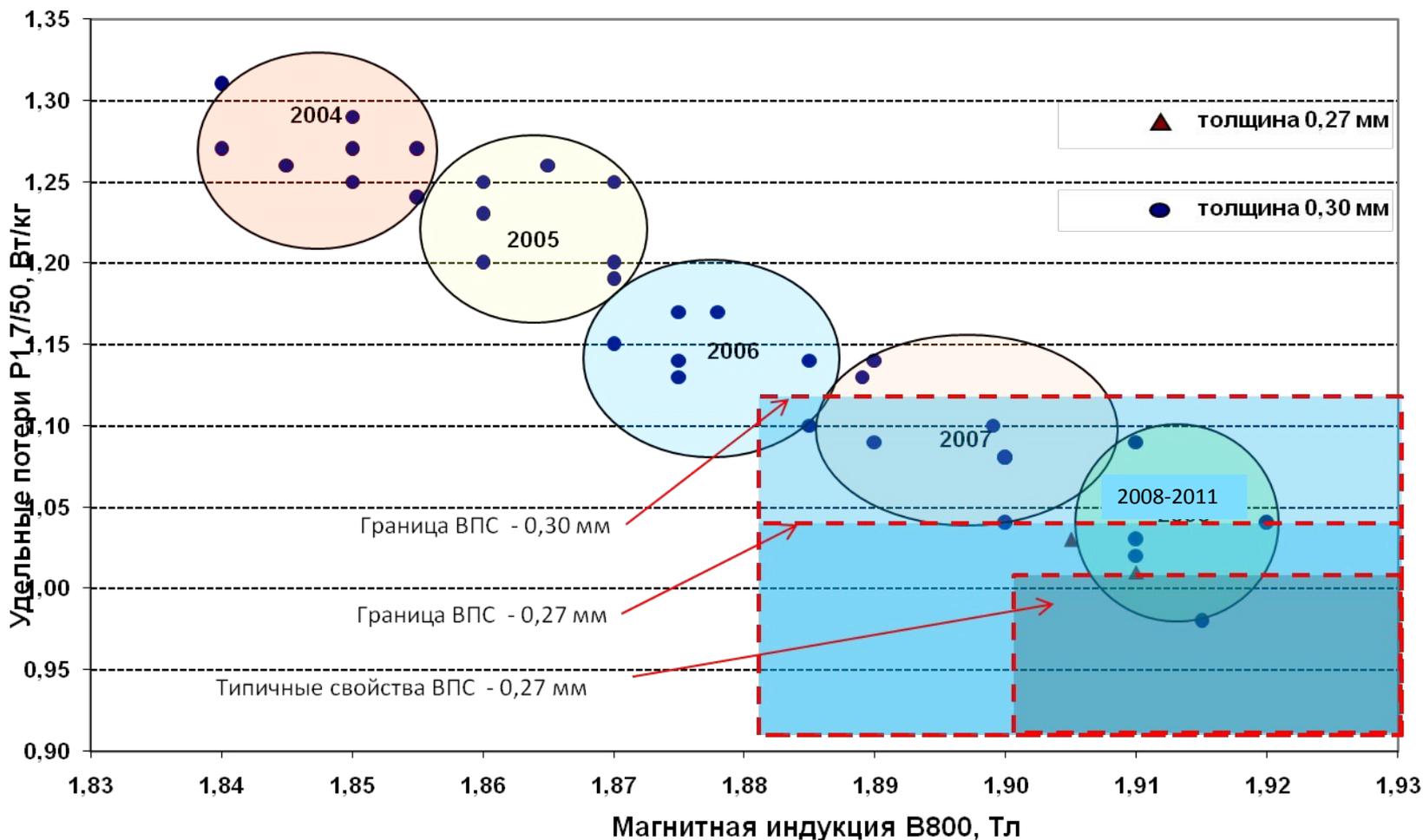


Станок для нарезки роликов термостойкого и электроизоляционного покрытий



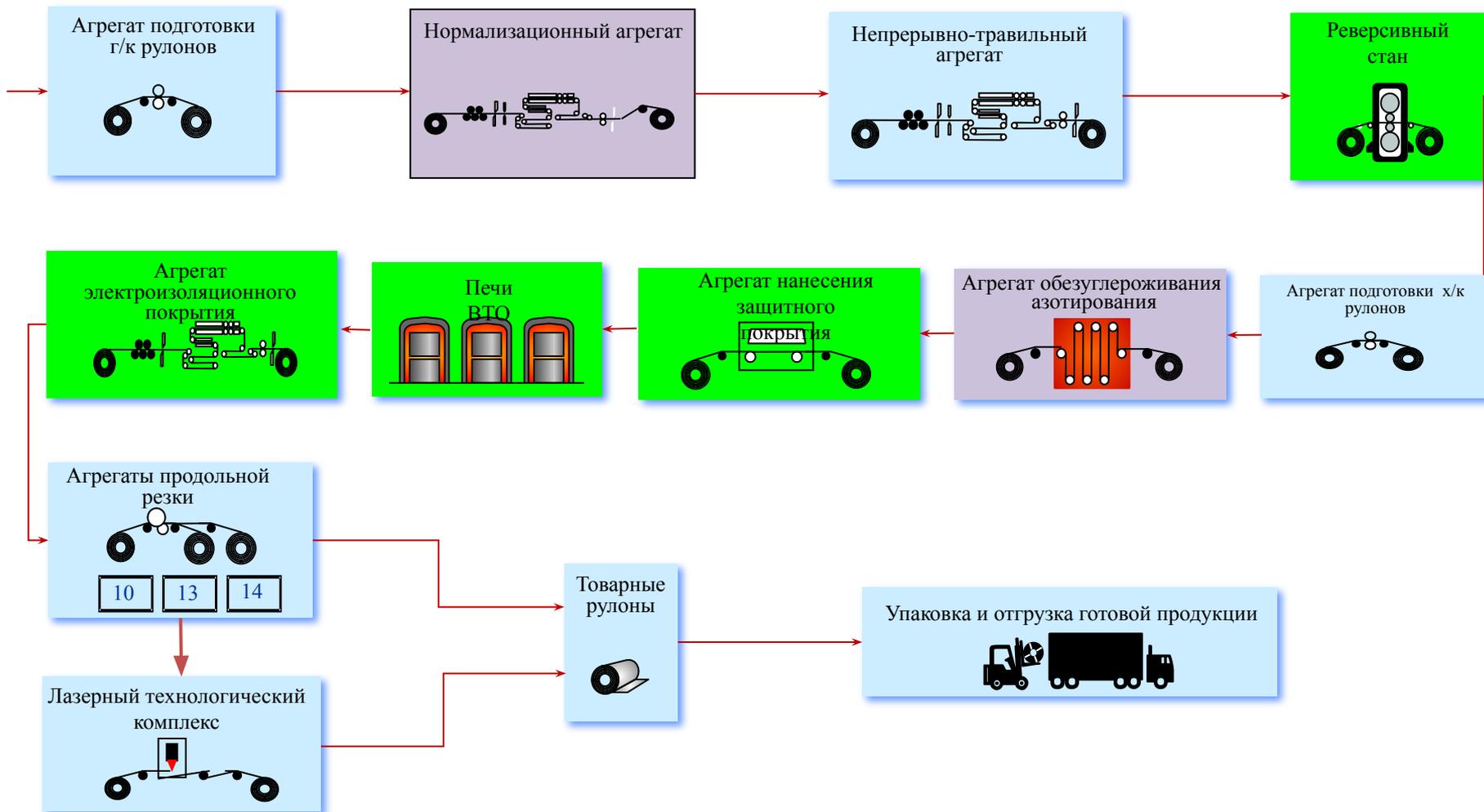
Колпаковые печи высокотемпературного отжига

## Этапы освоения технологии производства высокопроницаемой электротехнической анизотропной стали



# Производство трансформаторной стали

## Схема производства высокопроницаемой ЭАС (с азотированием при обезуглероживающем отжиге) – ОАО «НЛМК»

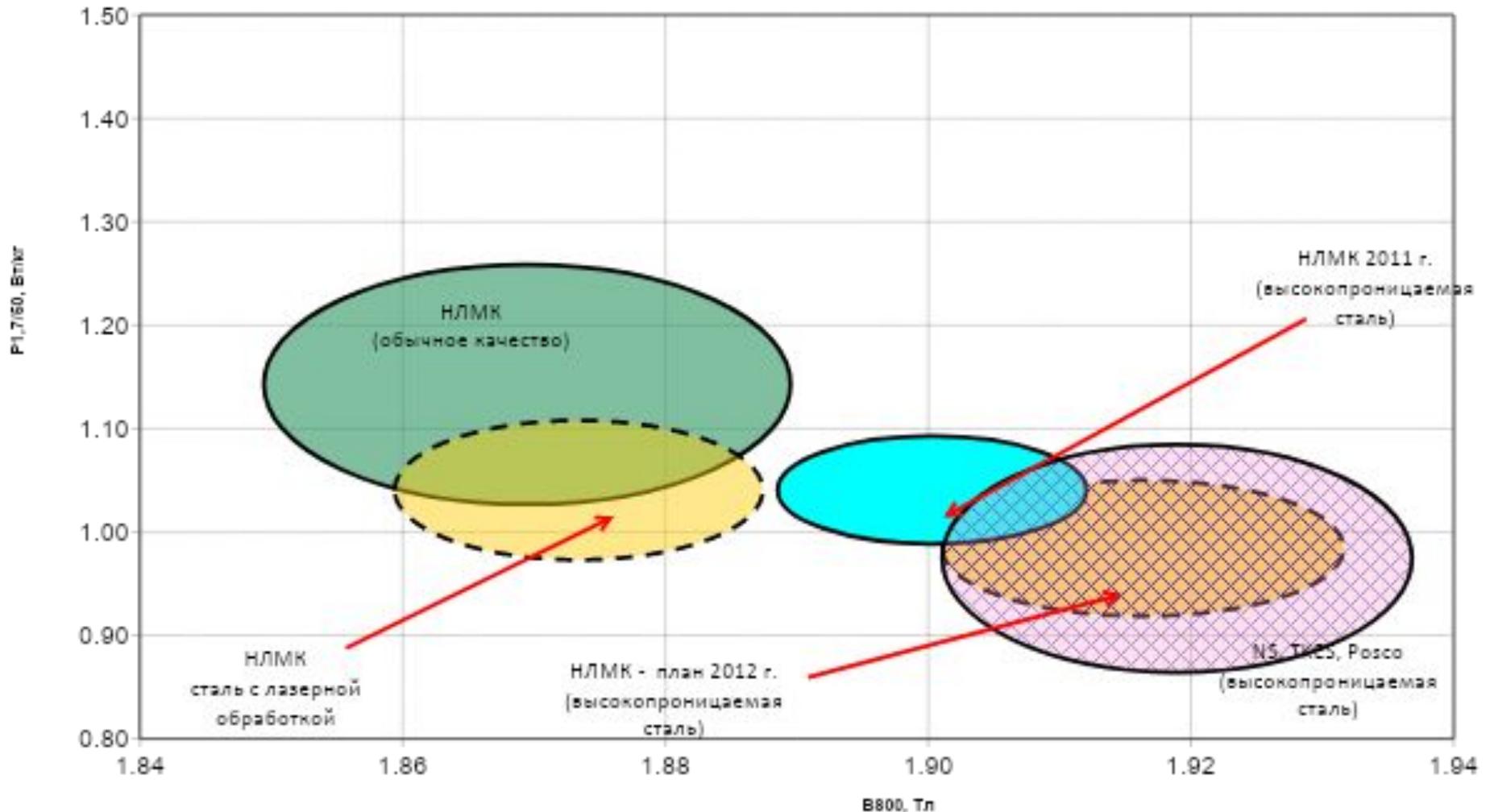


— действующие агрегаты

— новые агрегаты

— реконструируемые агрегаты 45

## Магнитные свойства стали производства «НЛМК» и других производителей



# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Производство трансформаторной стали

Соотношение марок стали по ГОСТ 21427.1, GB/T 2521,  
JIS 2553, AISI, ASTM F 876, EN 10107,

Толщина, мм	ГОСТ 21427.1-83		GB/T 2521-96, Китай		JIS G2553-2000, Япония		AISI 1983,США		ASTM A 876M, США		EN 10107	
	Марка	P <sub>1,7/50</sub> Вт/кг	Марка	P <sub>1,7/50</sub> Вт/кг	Марка	P <sub>1,7/50</sub> Вт/кг	Марка	P <sub>1,7/50</sub> Вт/кг	Марка	P <sub>1,7/50</sub> Вт/кг	Марка	P <sub>1,7/50</sub> Вт/кг
0,23							M3	1,18			M120-23S	1,20
											M127-23S	1,27
0,27	3409	1,08	27QG100	1,00	27P110	1,10						
	3408	1,14	27QG110	1,10								
	3407	1,20	27Q120	1,20	27G120	1,20	M3	1,21	27H163M	1,24	M120-27S	1,20
	3406	1,27	27Q130	1,30	27G130	1,30	M4	1,27			M130-27S	1,30
	3405	1,38	27Q140	1,40	27G140	1,40					M140-27S	1,40
0,30	3409	1,14	30QG110	1,10								
	3408	1,20	30QG120	1,20	30P120	1,20	M3	1,23				
	3407	1,26	30QG130	1,30	30G130	1,30					M130-30S	1,30
	3406	1,33	30Q130	1,30			M4	1,32				
	3405	1,40	30Q140	1,40	30G140	1,40	M5	1,39	30H183M	1,39	M140-30S	1,40
	3404	1,50	30Q150	1,50	30G150	1,50					M150-30S	1,50
0,35	3409	1,24	35QG125	1,25	35P125	1,25						
	3408	1,30										
	3407	1,36	35QG135	1,35	35G135	1,35						
			35Q135	1,35								
	3406	1,43	35Q145	1,45	35G145	1,45	M5	1,45			M140-35S	1,40
	3405	1,50	35Q155	1,55	35G155	1,55			35H207M	1,57	M150-35S	1,50
	3404	1,60					M6	1,57			M165-35S	1,65

# Производство трансформаторной стали

Соотношение марок стали по ГОСТ 21427.1, СТО 05757665-008, каталогам  
Nippon Steel , JFE, Posco, TKES

Толщина, мм	ГОСТ 21427.1-83			Стандарт НЛМК (СТО 05757665-008)			Nippon Steel			JFE			POSCO			TKES		
	Марка	P <sub>1,7/50</sub> Вт/кг	B <sub>100</sub> Тл	Марка	P <sub>1,7/50</sub> Вт/кг	B <sub>800</sub> Тл	Марка	P <sub>1,7/50</sub> Вт/кг	B <sub>800</sub> Тл	Марка	P <sub>1,7/50</sub> Вт/кг	B <sub>800</sub> Тл	Марка	P <sub>1,7/50</sub> Вт/кг	B <sub>800</sub> Тл	Марка	P <sub>1,7/50</sub> Вт/кг	B <sub>800</sub> Тл
0,27				NV27P-100	1,00	1,88	27ZH100	1,00	1,88	27RGH100	1,00	1,87	27PH100	1,00	1,88	H103-27	1,03	1,85
	3409	1,08	1,72	NV27S-105L	1,05	1,87	27ZH110	1,10	1,88	27RGH110	1,10	1,87	27PH145	1,10	1,87			
	3408	1,14	1,71	NV27S-110	1,10	1,86												
	3407	1,20	1,68	NV27S-120	1,20	1,84	27Z120	1,20	1,80	27RG120	1,20	1,80	27PG158	1,20	1,80	C120-27	1,20	1,80
	3406	1,27	1,62	NV27S-130	1,30	1,83	27Z130	1,30	1,80	27RG130	1,30	1,80	27PG172	1,30	1,80	C130-27	1,30	1,78
	3405	1,38	1,61	NV27S-140	1,40	1,82							27PG185	1,40	1,76	C140-27	1,40	1,75
0,30				NV30P-105	1,05	1,88	30ZH105	1,05	1,88	30RGH105	1,05	1,87	30PH105	1,05	1,88	H105-30	1,05	1,88
	3409	1,14	1,72	NV30S-110L	1,10	1,87	30ZH110	1,10	1,88	30RGH110	1,10	1,87	30PH145	1,10	1,87	H111-30	1,11	1,85
	3408	1,20	1,71	NV30S-120	1,20	1,86	30Z120	1,20	1,80	30RG120	1,20	1,80	30PH158	1,20	1,87			
	3407	1,26	1,68				30Z130	1,30	1,80	30RG130	1,30	1,80	30PG172	1,30	1,80	C130-30	1,30	1,80
	3406	1,33	1,62	NV30S-130	1,30	1,84												
	3405	1,40	1,61	NV30S-140	1,40	1,78	3Z140	1,40	1,80	30RG140	1,40	1,80	30PG185	1,40	1,80	C140-30	1,40	1,78
	3404	1,50	1,60										30PG198	1,50	1,77	C150-30	1,50	1,75

# Производство трансформаторной стали

## Магнитные свойства – корпоративный стандарт НЛМК СТО 05757668-008

Марка стали	Номинальная толщина, мм	Гарантированные магнитные свойства			Типичные магнитные свойства		
		$P_{1,5/50}$ , не более, Вт/кг	$P_{1,7/50}$ , не более, Вт/кг	$B_{800}$ , не менее, Тл	$P_{1,5/50}$ , Вт/кг, средние	$P_{1,7/50}$ , Вт/кг, средние	$B_{800}$ , Тл, средняя
NV23S-100	0,23	-	1,00	1,87	0,68	0,99	1,88
NV23S-110		0,73	1,10	1,85	0,69	1,06	1,86
NV23S-120		0,77	1,20	1,83	0,74	1,13	1,86
NV23S-127		0,80	1,27	1,82	0,78	1,22	1,85
NV27P-100	0,27	-	1,00	1,88	0,68	0,99	1,88
NV27S-105L		-	1,05	1,87	0,74	1,04	1,88
NV27S-110		0,75	1,10	1,86	0,74	1,07	1,88
NV27S-120		0,80	1,20	1,84	0,78	1,13	1,87
NV27S-130		0,85	1,30	1,83	0,81	1,24	1,85
NV27S-140		0,89	1,40	1,82	0,86	1,35	1,83
NV30P-105	0,3	-	1,05	1,88	0,77	1,04	1,88
NV30S-110L		-	1,10	1,87	0,78	1,08	1,88
NV30S-120		0,80	1,20	1,86	0,80	1,16	1,88
NV30S-130		0,85	1,30	1,84	0,84	1,25	1,86
NV30S-140		0,89	1,40	1,78	0,88	1,34	1,83
NV35S-120		0,35	0,90	1,20	1,86	0,86	1,18
NV35S-130	0,95		1,30	1,83	0,91	1,26	1,85
NV35S-145	1,00		1,45	1,81	0,95	1,35	1,84