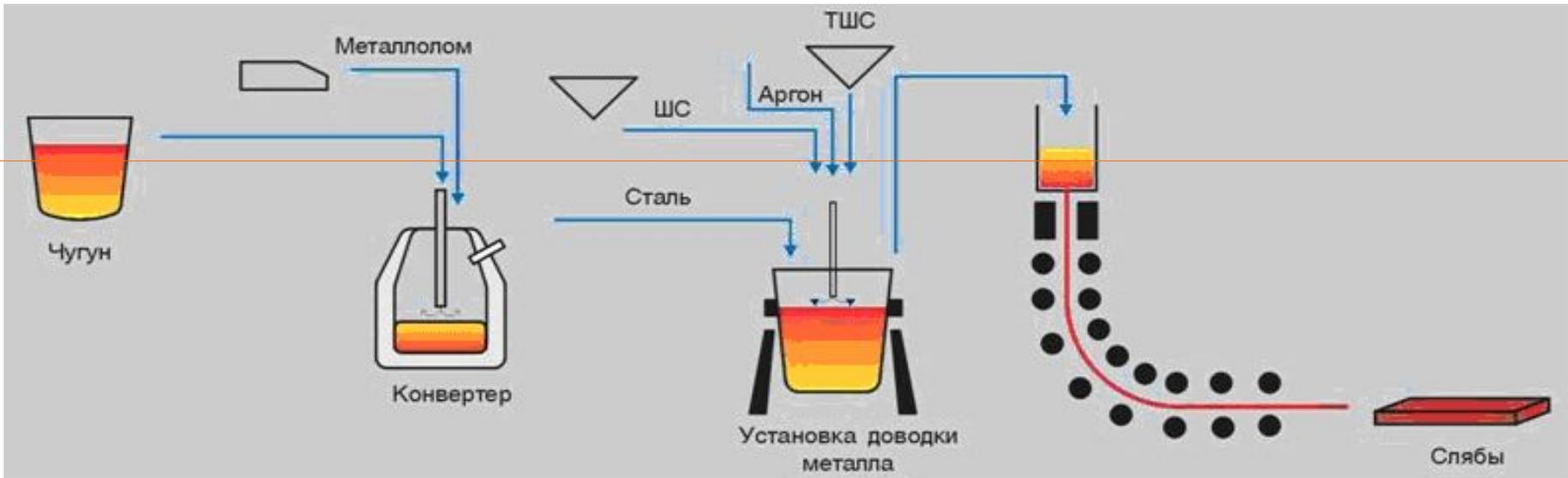




# **Поверхность электротехнической анизотропной стали**

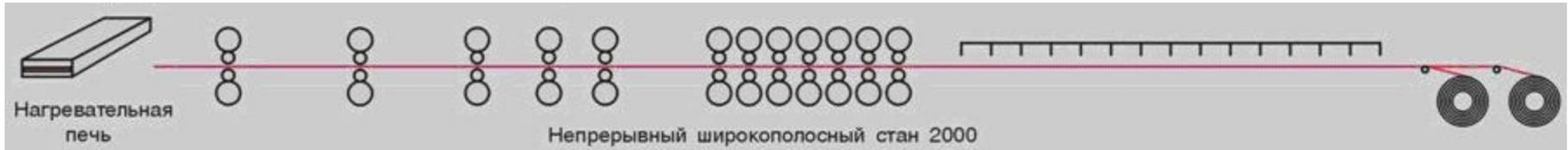
**Выплавка стали кислородно-конвертерным способом. После получения необходимого химического состава непрерывная разливка на криволинейной машине в слябы.**



**Химический состав ЭАС после выплавки, мас. %  
оптимальный (возможный)**

<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>Al</i>	<i>N</i>	<i>Cu</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Ti</i>
0.025...0.040 (0.020...0.055)	3.1...3.2 (2.9...3.4)	0.25...0.30 (0.10...0.40)	< 0.006 (<0.015)	< 0.01 (<0.02)	0.014...0.018 (0.010...0.022)	0.010...0.012 (0.007...0.015)	0.50...0.60 (0.40...0.60)	< 0.1 (<0.3)	< 0.1 (<0.3)	< 0.002 (<0.008)

**Нагрев непрерывно-литых слябов в методических печах до температур 1260..1280°C в течение 3.5...4 часов. Горячая прокатка слябов на непрерывном широкополосном стане в полосу толщиной ~ 2.5 мм. Толщина раската после черновой горячей прокатки 40...50 мм. Температура конца чистовой прокатки 920...960°C. Температура смотки полосы в рулон 540...580°C.**



# Схема производства ЭАС по нитридно-медной технологии

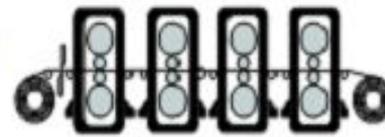
Склад горячекатаного проката. Рулоны: толщина 2,5 мм, ширина до 1100 мм, вес до 15 т.



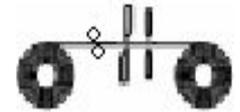
НТА: травление горячекатаного проката (очистка от загрязнений стали от окислов).



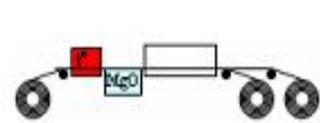
Стан 1300: первая холодная прокатка с 2,5 на 0,60, 0,65, 0,70, 0,75 мм.



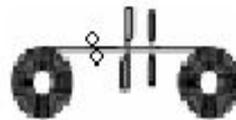
АПР-1 (2): подготовка рулонов – подрезка кромок, удаление дефектов.



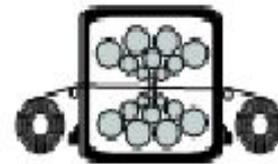
АОО: нанесение термостойкого покрытия на основе сульфата MgO.



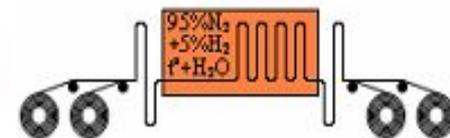
АПР-8: подготовка рулонов – удаление дефектов.



Стан 1200 1(2): вторая холодная прокатка (таким образом толщину – 0,23, 0,27, 0,30, 0,35, 0,50 мм)



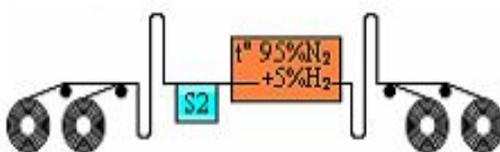
АРО (АОО-1А): рекристаллизация и обесуглероживание жидкой отливкой.



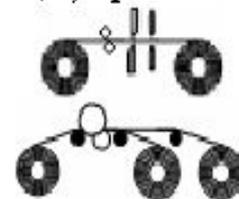
ВТО: высоко температурный отжиг в колпачковых печах.



АВО (АЗИП): нанесение электроизоляционного покрытия и выпрямляющий отжиг.



АПР УО: подготовка рулонов готовой ЭАС – подрезка кромок, удаление дефектов, аттестация, порезка на ленты.

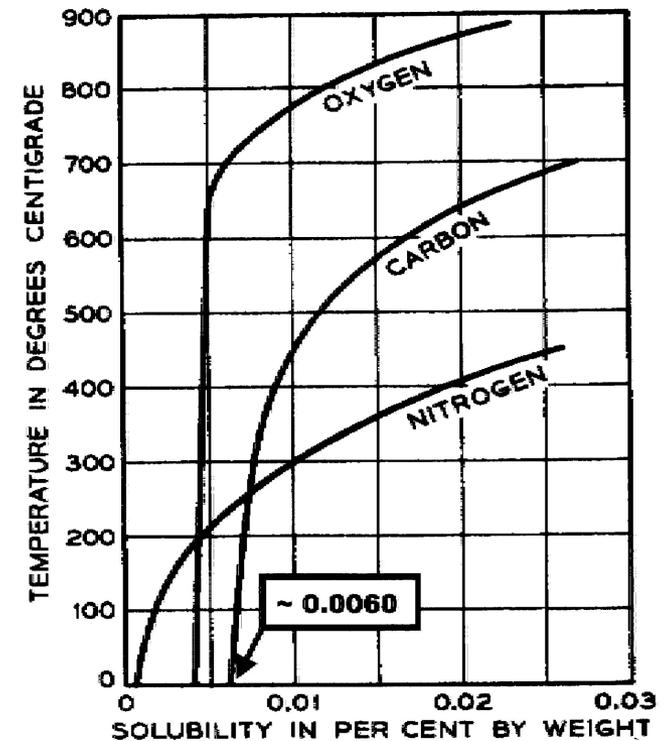
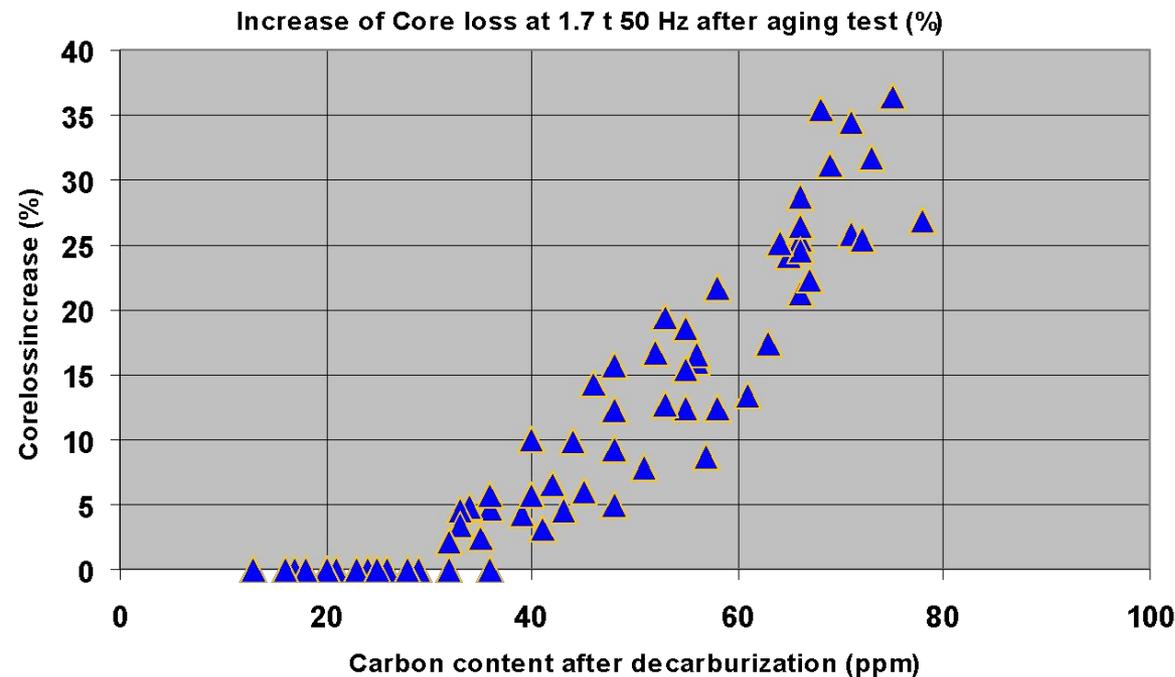


Упаковка и отгрузка рулонов ЭАС.



## Обезуглероживающий отжиг. Зона внутреннего окисления

- Удаление углерода из металла происходит в процессе обезуглероживающего отжига, являющегося одной из обязательных промежуточных операций в технологическом цикле производства любого варианта ЭАС, поскольку уже перед завершающим этапом обработки (высокотемпературный отжиг - ВТО) концентрация углерода в стали должна быть сведена к минимуму и составлять величину не более 0,003 мас. %.



## Обезуглероживающий отжиг. Зона внутреннего окисления

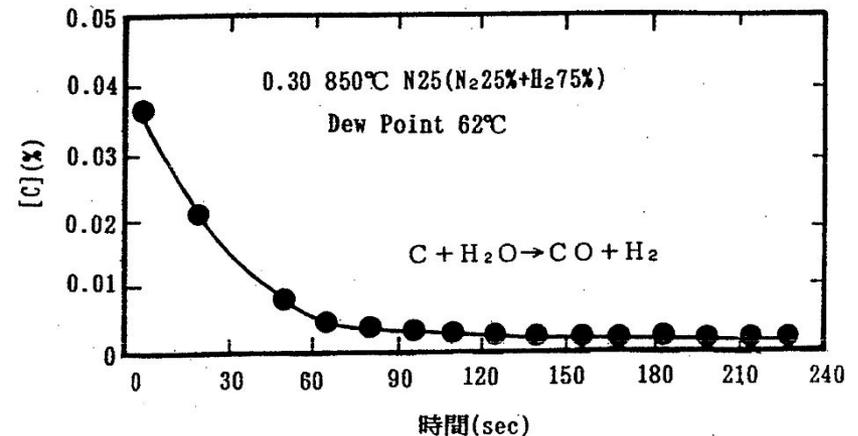
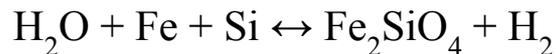
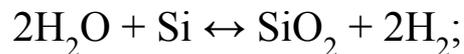
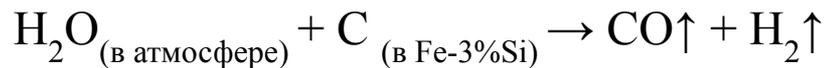
- Традиционно для сталей сульфидного и сульфо-нитридного вариантов, ОО осуществляют после прокатки полосы на конечную толщину (0,23...0,35 мм) в азото-водородной газовой смеси (обычно 75 %  $H_2$  + 25 %  $N_2$ ), увлажненной до состояния точки росы 69°C. Применяемые для обезуглероживающего отжига ЭАС нитридно-медного варианта газовые смеси отличаются пониженным содержанием водорода (5 %  $H_2$  + 95 %  $N_2$ ), и сравнительно низкой точкой росы ~ 20°C. ОО для этого варианта обработки осуществляют в промежуточной толщине (0,65...0,75 мм).
- Обезуглероживание проводят на непрерывных протяжных агрегатах вертикального или горизонтального типов (на «ВИЗе» соответственно АРО и АОО) в условиях прямого доступа увлажнённой азотоводородной газовой смеси к обеим поверхностям полосы, нагретой до температур ~ 790...860°C. Основными технологическими параметрами ОО являются: температура, время и окислительный потенциал  $PH_2O/PH_2$  печной атмосферы, определяемый соотношением в ней водяных паров и водорода. Температура и содержание  $H_2O$  и  $H_2$  в атмосфере печи контролируется штатными приборами печей, а время отжига определяется скоростью транспортировки полосы и длиной камер нагрева (КН) и выдержки (КВ).
- Основным процессом, реализующимся при ОО электротехнической стали, является удаление атомов углерода из металла в атмосферу, состоящее из нескольких стадий. В процессе ОО средняя концентрация углерода в стали снижается по закону, близкому к экспоненциальному, одновременно с этим в металле возрастает количество кислорода.

## Обезуглероживающий отжиг. Зона внутреннего окисления

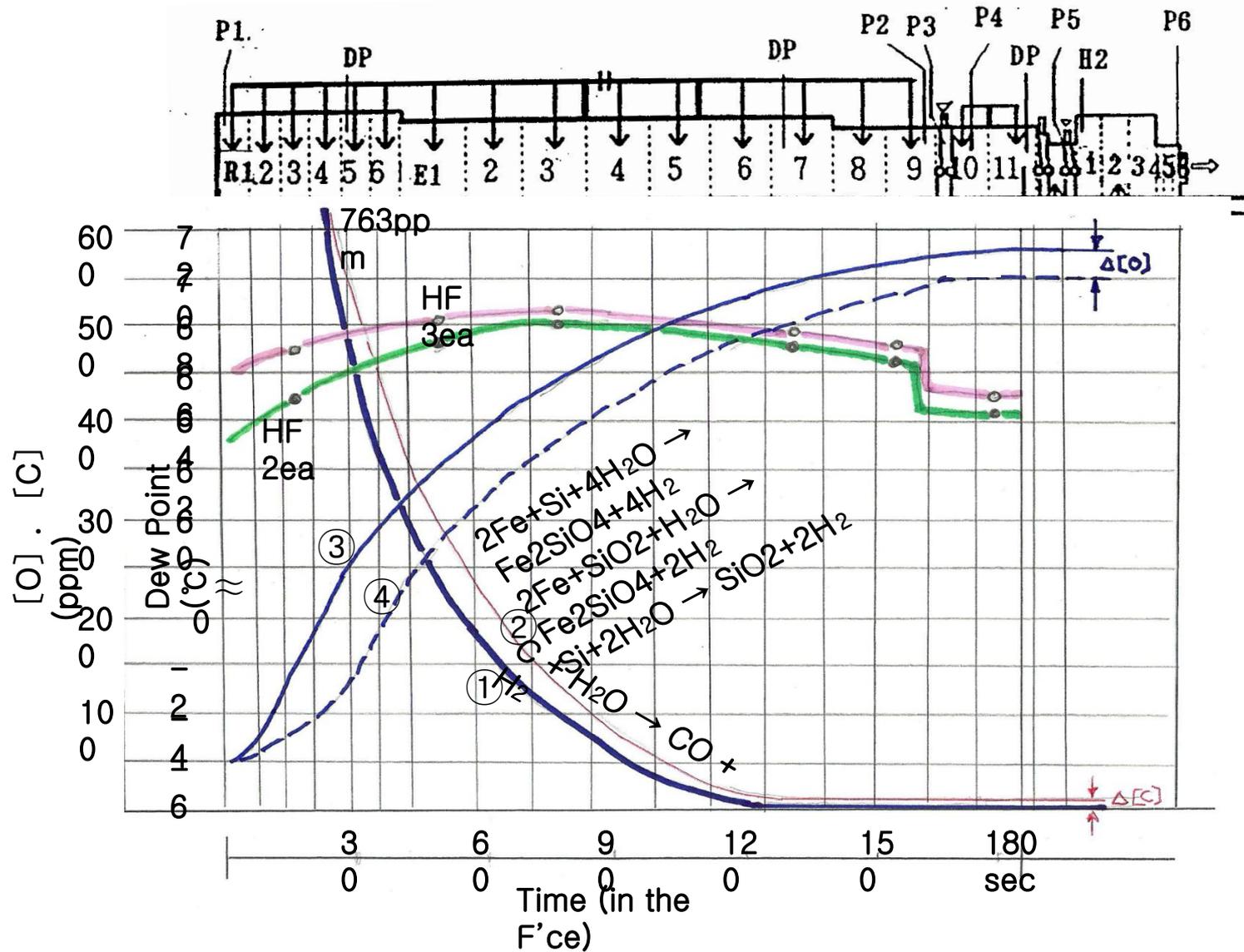
• Удаление углерода происходит из-за низкой его растворимости в кремнистом феррите. Процесс обезуглероживания заключается в диссоциации (растворении) углеродосодержащих фаз при высокой температуре, транспортировке (диффузии) углерода к поверхности полосы стали, переходе атомов из твердого раствора на поверхность и окисление углерода кислородом атмосферы отжига, с последующим уходом образующихся соединений в газовую фазу. Наиболее медленной стадией процесса обезуглероживания является диффузия (как протекающая в твердом теле).

$$\tau \approx 0.5h^2 / D_i$$

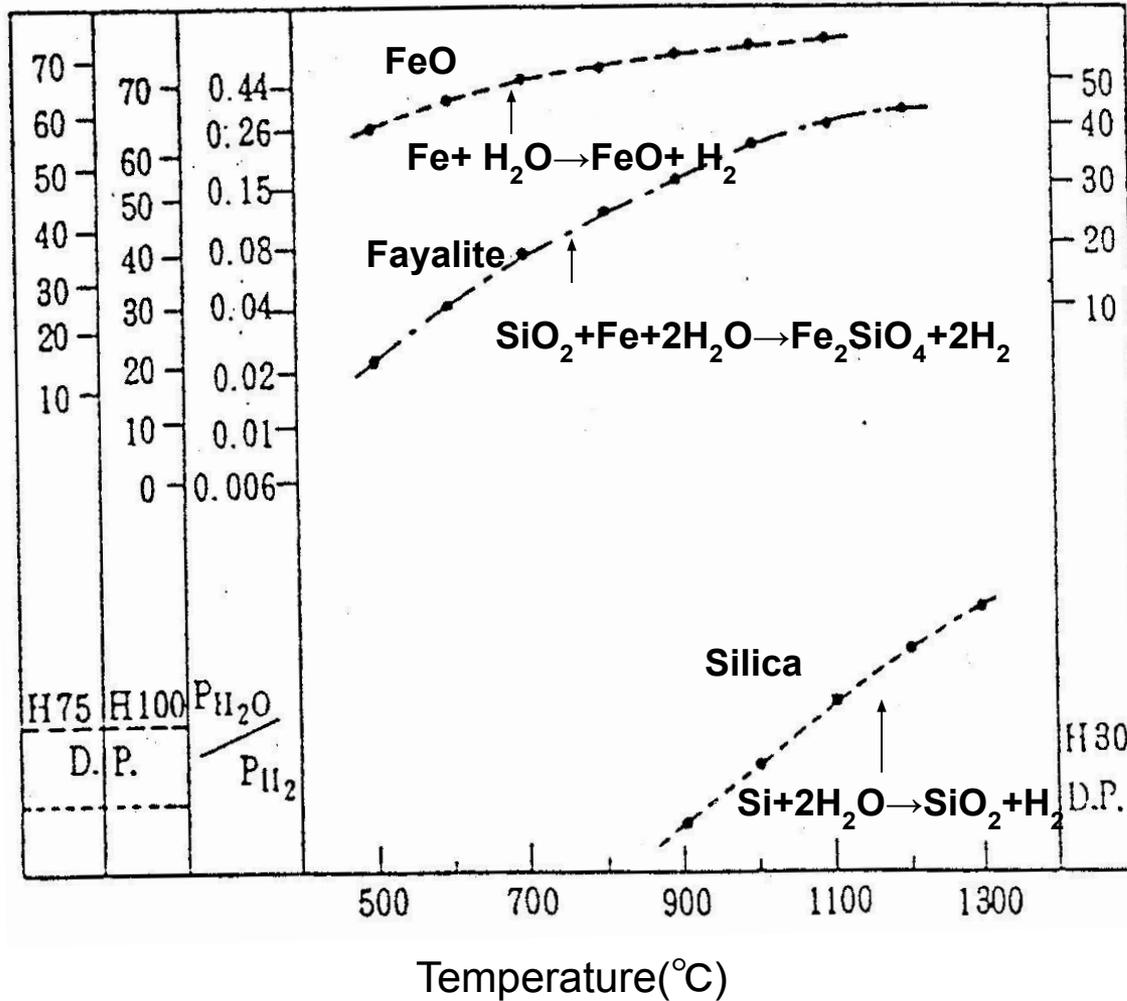
где  $h$  – толщина полосы, которая рассматривается как удвоенный эффективный диффузионный путь, проходимый атомами элемента за время  $\tau$



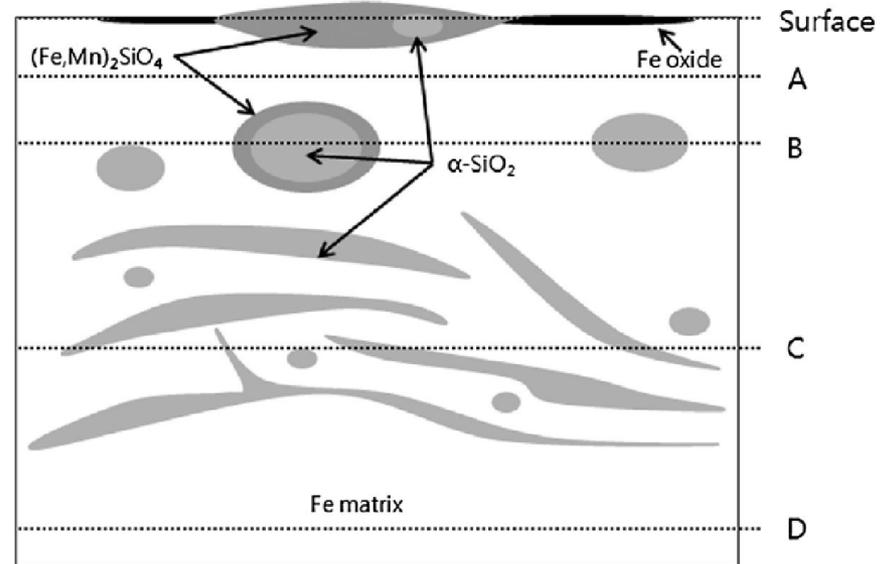
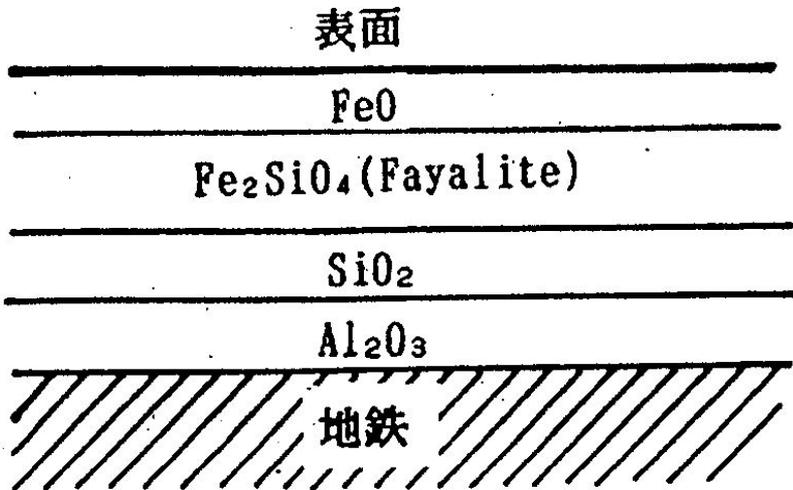
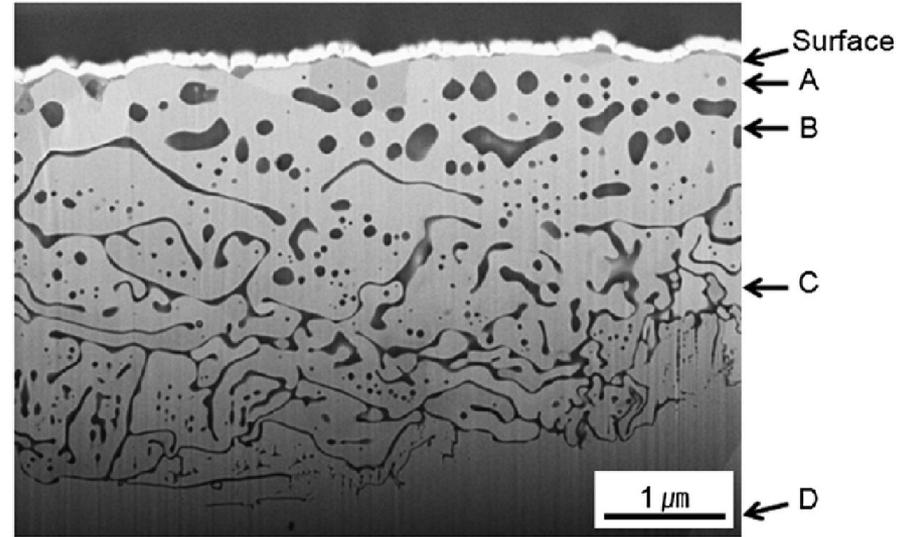
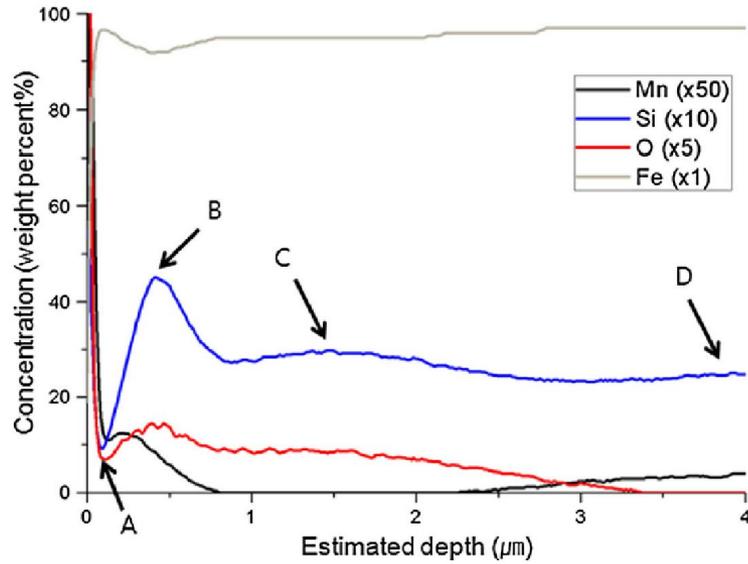
# Обезуглероживающий отжиг. Зона внутреннего окисления



### 5. Heat stability of Oxides by partial pressure of O<sub>2</sub> (H<sub>2</sub>O/H<sub>2</sub>)

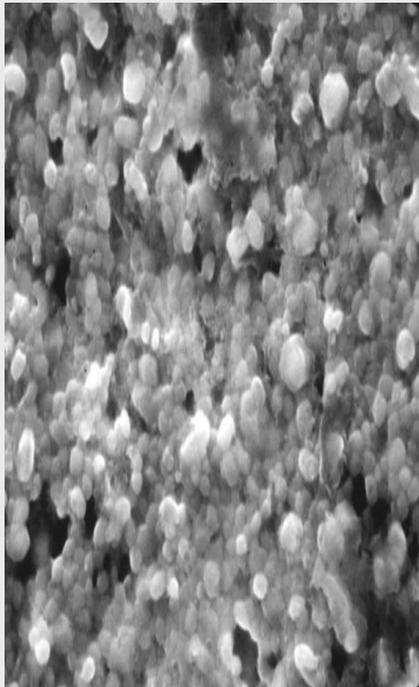


# Зона внутреннего окисления

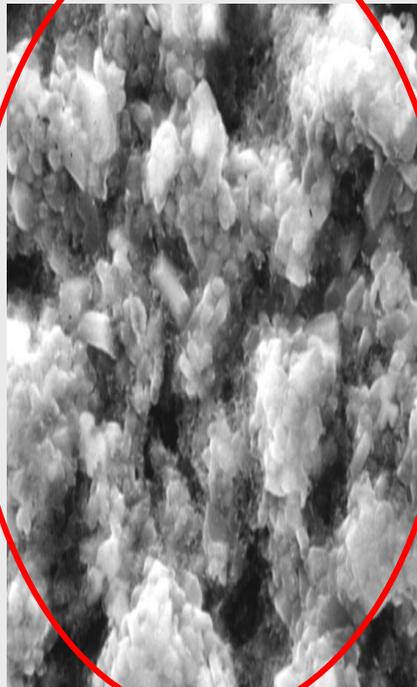


\* Microstructure of Base Coating

<Good>

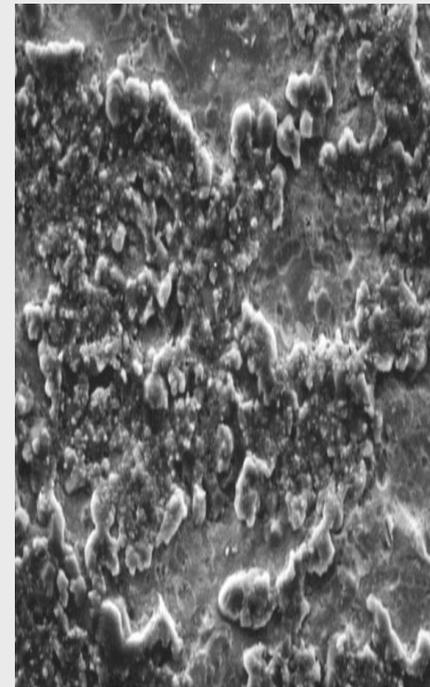


<too much>



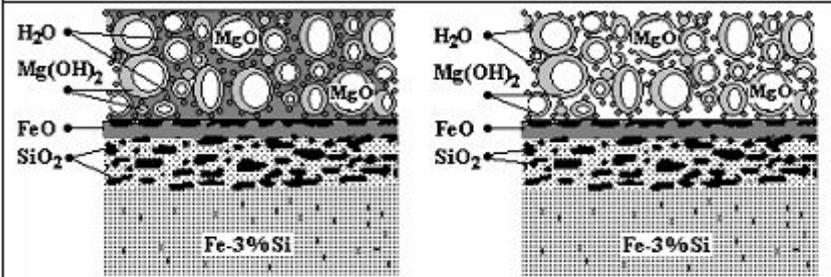
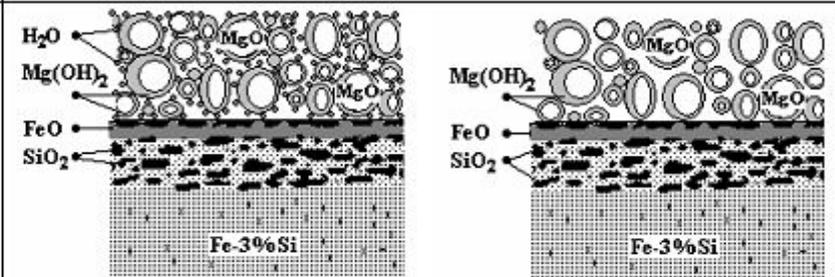
Oxidative defects  
(Fe-mound,  
Oxidized color change)

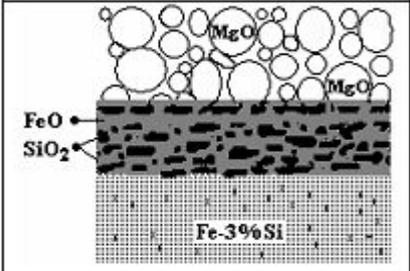
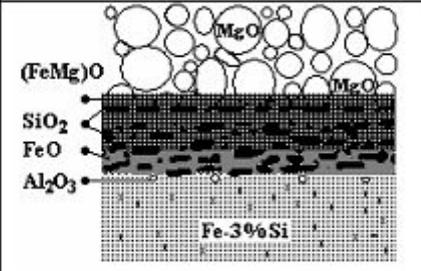
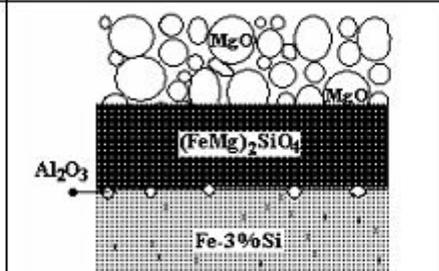
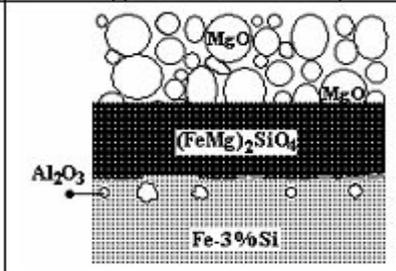
<lack>



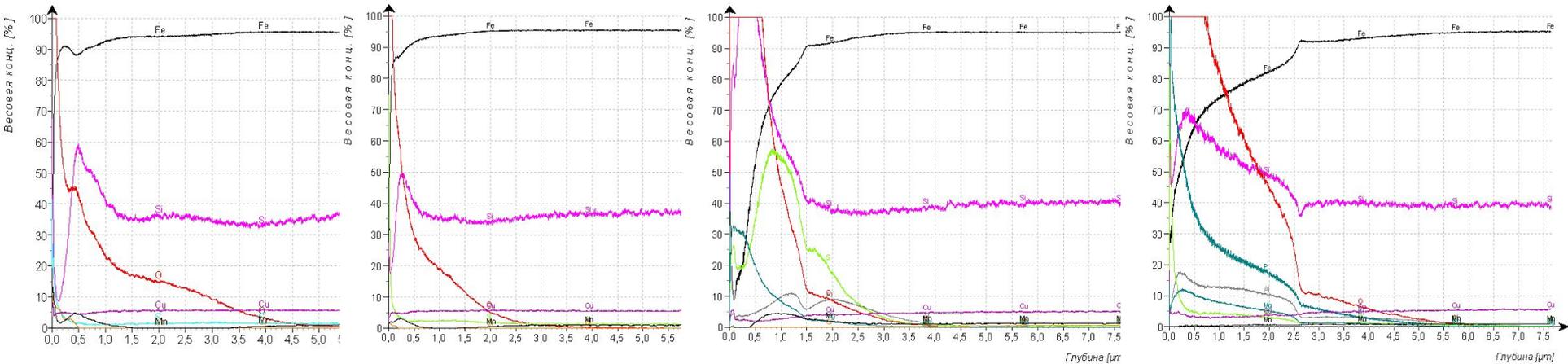
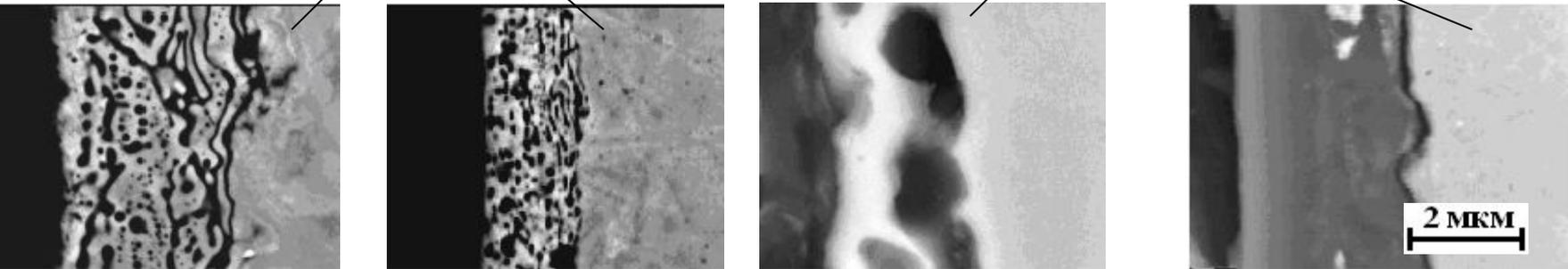
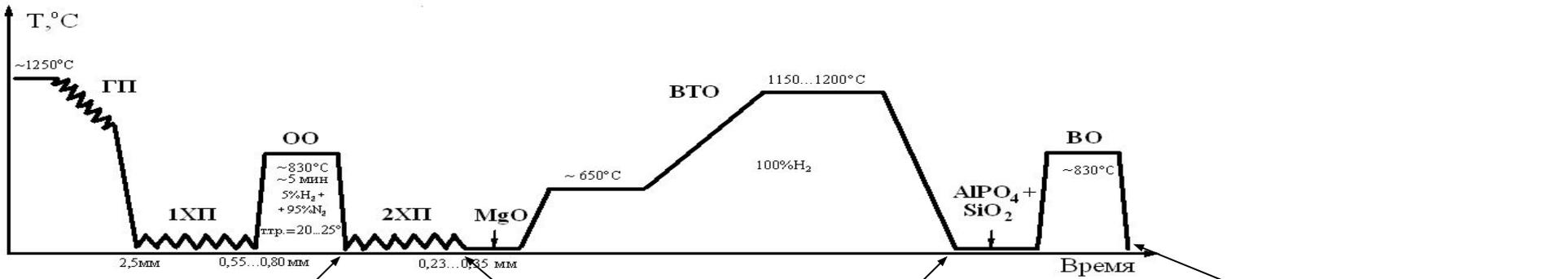
Structure exposure  
/ peel-off glass film

# Схема изменений химического состава и структуры поверхности ЭАС при нанесении термостойкого покрытия и последующем высокотемпературном отжиге

Нанесение и сушка термостойкого покрытия (суспензии MgO)	Высокотемпературный отжиг
Быстрый нагрев суспензии от 10 до $T > 100^{\circ}\text{C}$	$\sim 20 \dots 400^{\circ}\text{C}$
$\text{H}_2\text{O}_{(ж)} \rightarrow \text{H}_2\text{O}\uparrow$	$\text{Mg}(\text{OH})_2 + n\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgO} + n\text{H}_2\text{O}\uparrow$
	

Высокотемпературный отжиг			
$\sim 400 \dots 700^{\circ}\text{C}$	$\sim 700 \dots 900^{\circ}\text{C}$	$\sim 900 \dots 1150^{\circ}\text{C}$	$\sim 1150^{\circ}\text{C}$
$\text{Mg}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{MgO} + \text{H}_2\text{O}\uparrow$ $\text{H}_2\text{O} + \text{Fe} \rightarrow \text{FeO} + \text{H}_2\uparrow$	$\text{MgO} + \text{FeO} \rightarrow (\text{MgFe})\text{O} + \text{O}_{(г)}$	$2(\text{MgFe})\text{O} + \text{SiO}_2 \rightarrow (\text{FeMg})_2\text{SiO}_4$	$\text{MnS}_{(г)} \rightarrow \text{Mn}_{(г)} + \text{S}_{(г)}$ $\text{S}_{(г)} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{S}\uparrow$ $\text{AlN}_{(г)} \rightarrow \text{Al}_{(г)} + \text{N}_{(г)}$ $2\text{N}_{(г)} + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3\uparrow$
			

# Изменение структуры поверхностного слоя ЭАС на различных стадиях ее обработки



# Изменение структуры поверхностного слоя ЭАС на различных

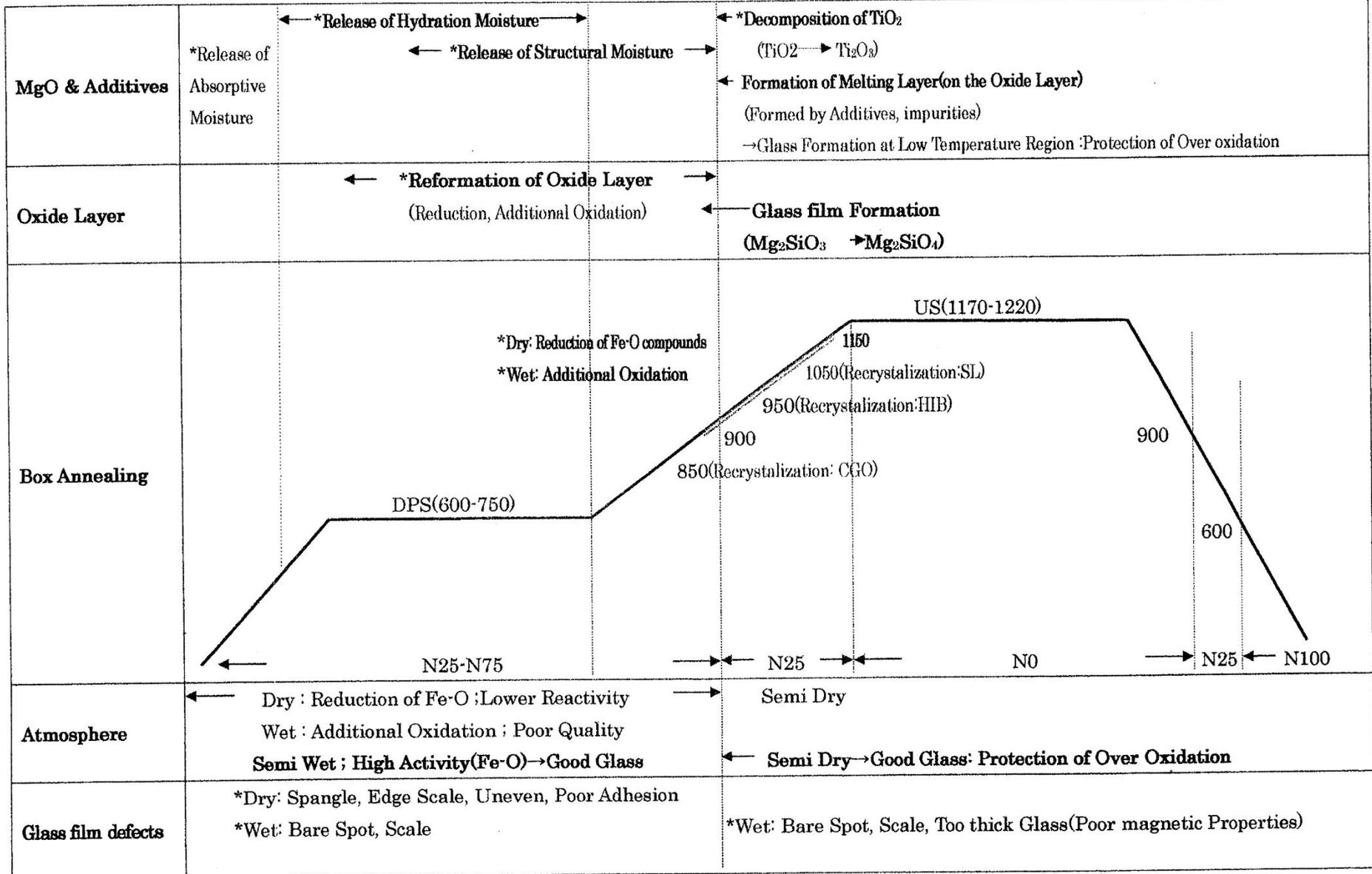


Fig.1 Conceptual Drawing of Process of Glass Film Formation

- Последней стадией формирования покрытия является нанесение на поверхность стали водного раствора смеси  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$  и  $\text{SiO}_2$  и взаимодействие образовавшейся соли с грунтовым слоем при температурах  $790 \dots 850^\circ\text{C}$  в течение короткого времени (нескольких десятков секунд). В процессе нанесения раствор  $\text{AlPO}_4$  пропитывает пористый грунтовый слой, после чего элементы соли внедряются и диффундируют в поверхность стали. Образуется беспористый конгломерат сложного химического состава.
- Влияние покрытий на магнитные свойства стали объясняется действием упругих напряжений, возникающих при формировании покрытий. Коэффициент термического расширения стали значительно выше, чем у покрытия. Поэтому при остывании покрытие препятствует уменьшению размеров стали и в поверхностном слое стали создаются растягивающие, а в покрытии сжимающие упругие напряжения.
- Нанесение электроизоляционного покрытия производится гуммированными роликами. Полоса с нанесенным раствором, поступает в печь агрегата выпрямляющего отжига, где в первых четырех зонах осуществляется сушка покрытия. Затем полоса попадает в зону выпрямляющего отжига, где вместе с формированием покрытия осуществляется отжиг металла с целью снятия ролонной кривизны. Скорость транспортировки полосы на АВО регламентируется в соответствии с типом покрытия и толщиной стали в пределах (28-60 м/мин).

- В условиях сложности технологических процессов, различного уровня состояния действующего оборудования и культуры производства на рулонах ЭАС возникают дефекты, которые негативно сказываются на эксплуатационных свойствах сердечников трансформаторов или даже делают сталь непригодной для использования.
- Дефекты возникают на всех переделах производства, однако большинство из них окончательно формируется в процессе высокотемпературного отжига ЭАС - либо в виде дефектов поверхности, либо в виде дефектов плоскостности. Дефекты становятся видимыми в процессе окончательной обработки ЭАС при проведении выпрямляющего отжига с нанесением электроизоляционного покрытия на АВО (АЭИП).

**Данный материал служит для:**

- облегчения распознавания дефектов ЭАС;
- однозначной и правильной идентификации дефектов ЭАС;
- правильного описания выраженности и расположения дефектов ЭАС по длине и ширине полос стали.

**Правильное выполнение описанных выше операций необходимо для:**

- 1) рациональной порезки рулонов на участке отделки с целью получения максимальных количества и качества готовой продукции;
- 2) отслеживания и устранения технологических проблем, возникающих на АВО и предшествующих ему переделах.

### Дефекты сплошности ЭАС.

Газовые пузыри (09), плены (09), вкатанная окалина и выкрошка (010), дыры, заломы (603), разрывы по границе зерен (522), рванины, царапины (14), заусенцы. Сварка при ВТО, связанная с дефектами сплошности (29)

# 009 – «Дыры (пленя до дыр)»

# 029 – «сварка по плене или по газовому пузырю»

009 Степень выраженности: тяжелая

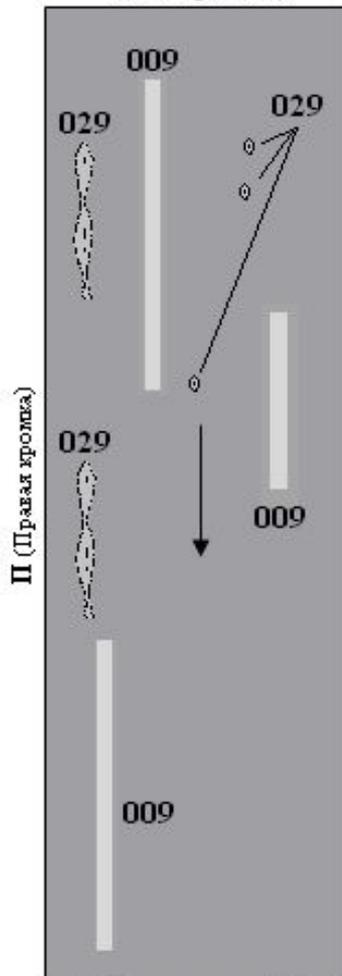


009 Степень выраженности: тяжелая



В любом месте по длине и ширине рулона

Конец рулона на АВО  
(внутренние витки на  
гнъзе при ВТО)

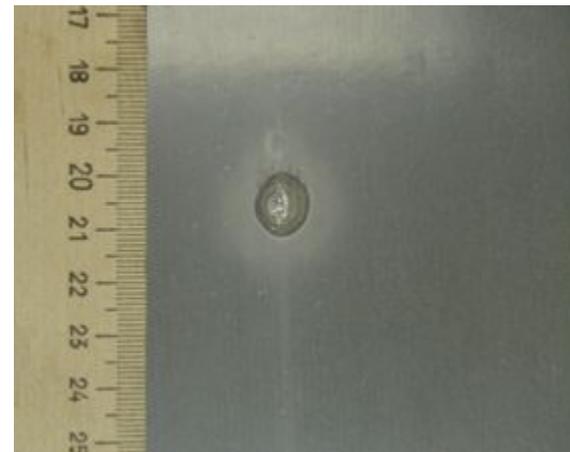


Начало рулона на АВО  
(внешние витки при ВТО)

029 Степень выраженности: тяжелая



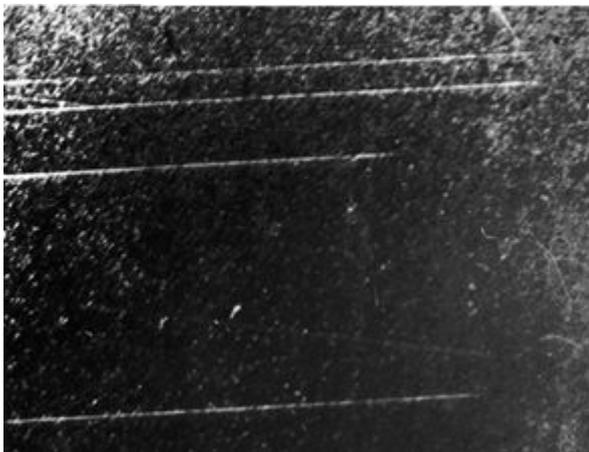
029 Степень выраженности: тяжелая



В любом месте по длине и ширине рулона

## 603 – «Заломы по кромке»

603 Степень выраженности: тяжелая



603 Степень выраженности: тяжелая

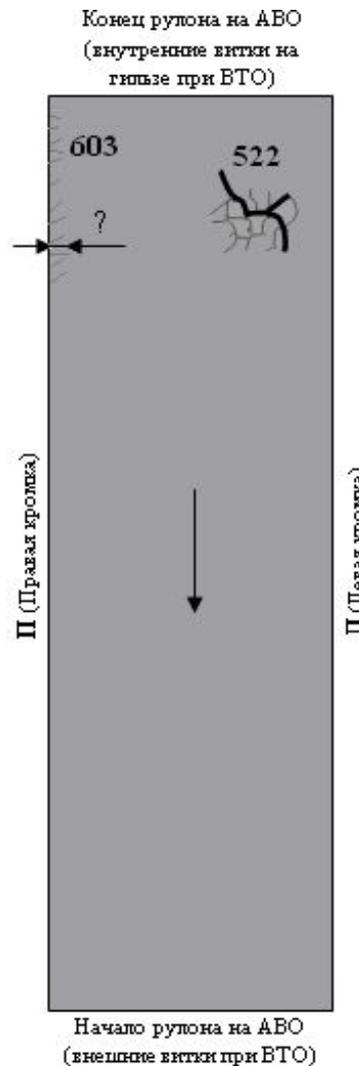


Изображения увеличены

Преимущественно по кромкам в  
конце рулона

## 522 – «Разрывы по границам зерен»

522 Степень выраженности: тяжелая



Внутренние витки рулона, на расстоянии 1/8-1/9 длины рулона (1-1,5 т), на некотором расстоянии от кромки полосы

**Причина образования:**

603 - повреждение натянутой кромки на обводных роликах до входа в печь;  
522 - термомеханические напряжения на витках внутренней части рулона из-за градиента температур при охлаждении рулонов в процессе ВТО

### Дефекты геометрии ЭАС.

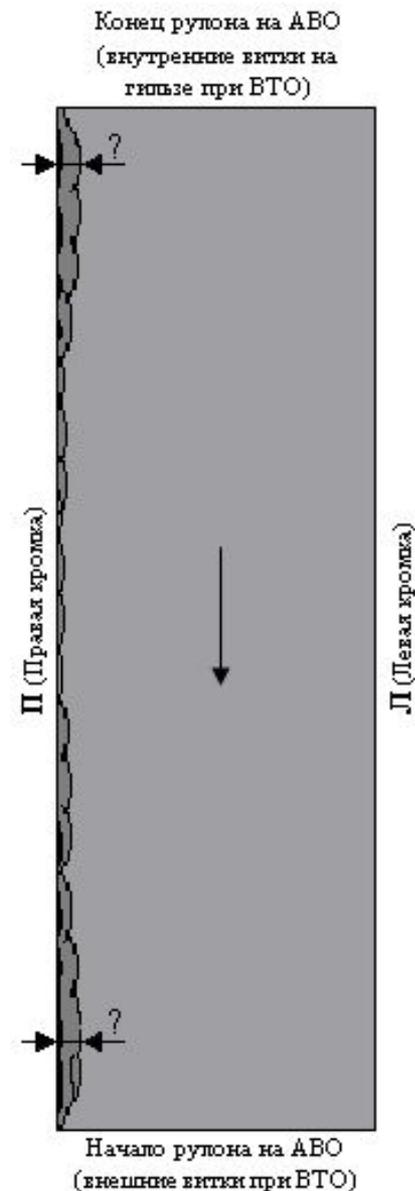
Неплоскостность (наддав ВТО (501), местный короб (202), продольный наддав (604), вытяжка (607), термический наддав (13), наддав по плоскости (531)), рулонная кривизна, разнотолщинность (32), серповидность.

## 501 – «Наддав ВТО»



**Причина образования:** деформация кромки полосы со стороны посада в результате -  
1) нарушения технологии установки рулонов на литье; 2) использования дефектного литья.

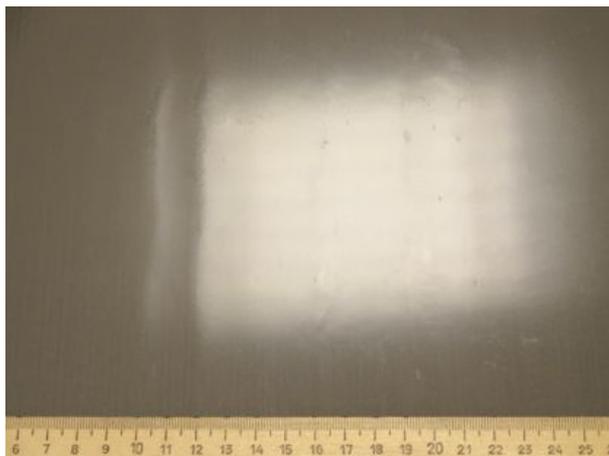
**Наиболее вероятное месторасположение:**  
кромка полосы со стороны посада



## 604 – «Продольный надав»

## 607 – «Вытяжка»

**604 Степень выраженности: тяжелая**

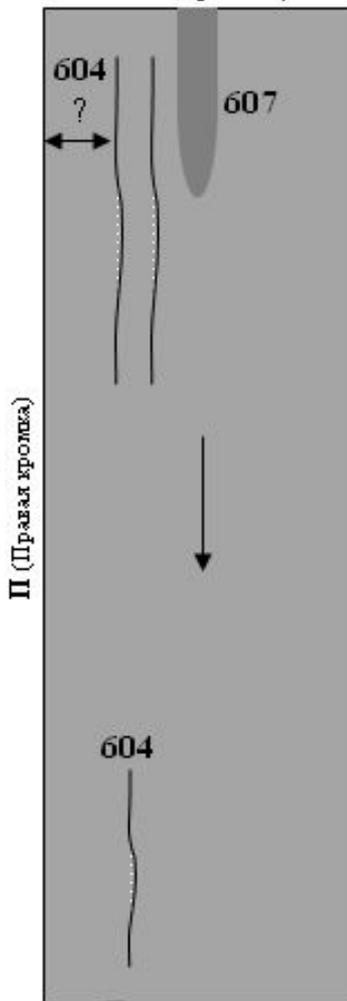


**604 Степень выраженности: тяжелая**



**по всей длине рулона на некотором расстоянии от кромки**

Конец рулона на АВО  
(внутренние витки на  
гильзе при ВТО)



Начало рулона на АВО  
(внешние витки при ВТО)

**607 Степень выраженности: тяжелая**



**607 Степень выраженности: тяжелая**



**внутренние витки рулона в средней части по ширине полосы**

## Дефекты поверхности и категоричность

Дефекты, связанные с прямым окислением поверхности

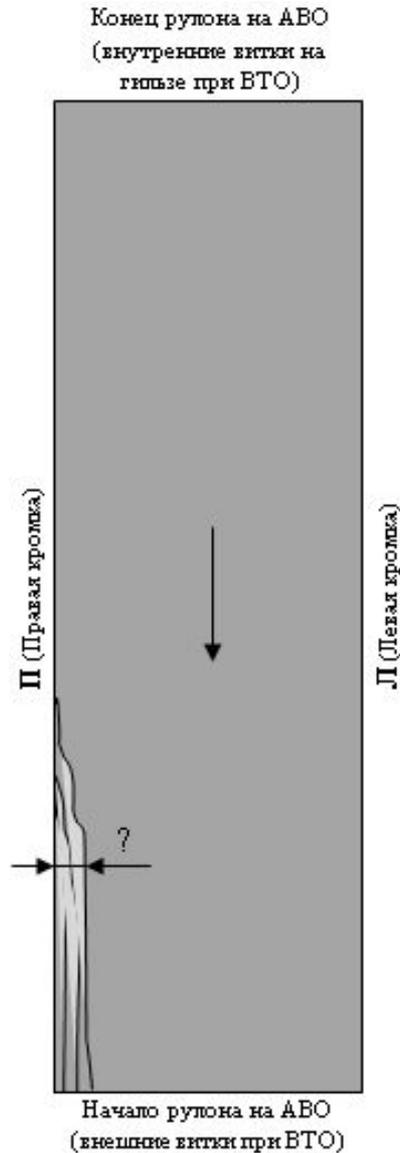
ЭАС: разводы (500), окисление (305, 405, 505), пятна без грунта (406, 506), MgO (508), крапчатость (437, 537), зерно (442).

# 500 – «Развод»

500 Степень выраженности: легкая



500 Степень выраженности: средняя



**Причина образования:**  
окисление в начале подъема температуры при ВТО разогретой кромки полосы (преимущественно верхней) атмосферой с повышенным содержанием влаги (в том числе за счет повышенных ППП термостойкого покрытия - MgO).

**Место расположения:** кромка внешних витков рулона, наиболее выражен на стороне противоположной посадку на ВТО.

# 305 – «Окисление по плоскости», 405, 505 – «Распаковочное окисление»

305 Степень выраженности: средняя

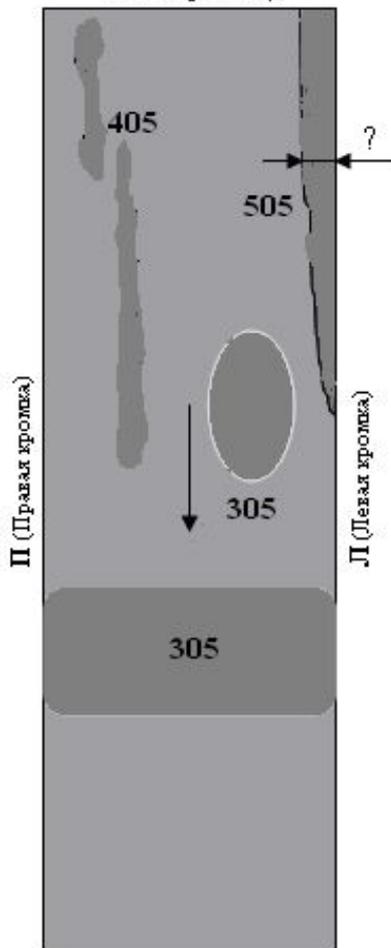


305 Степень выраженности: тяжелая



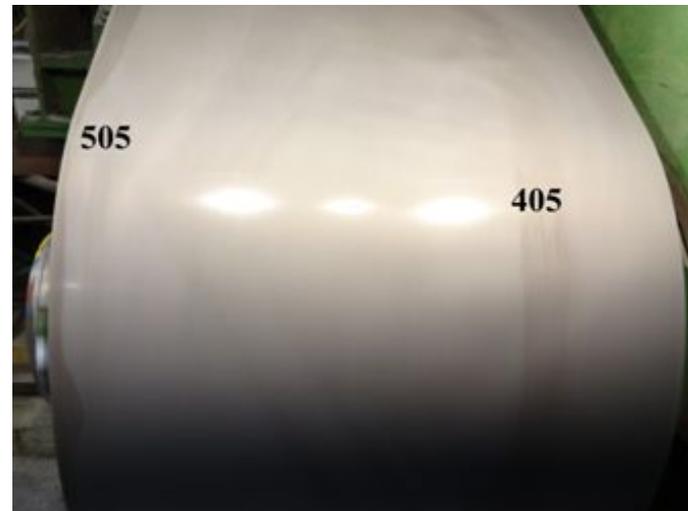
305 – в любом месте полосы, пятнами или по всей ширине

Конец рулона на АВО  
(внутренние витки на  
гильзе при ВТО)



Начало рулона на АВО  
(внешние витки при ВТО)

Степень выраженности: легкая



Степень выраженности: средняя



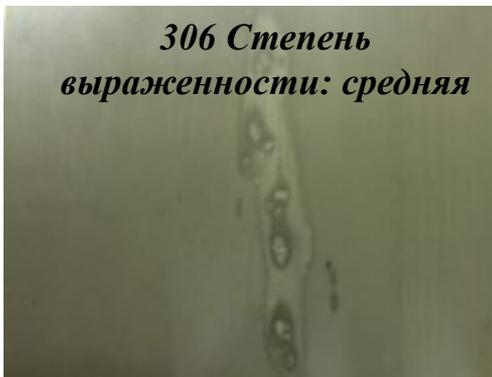
405 – на расстоянии от кромки, 505 – кромка внутренних витков рулонов

# 306, 406, 506 – «Пятна без грунта»

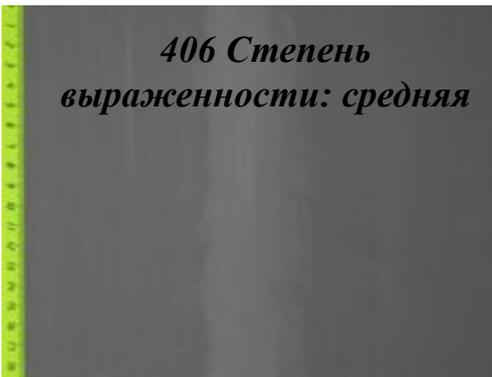
**306 Степень  
выраженности: легкая**



**306 Степень  
выраженности: средняя**



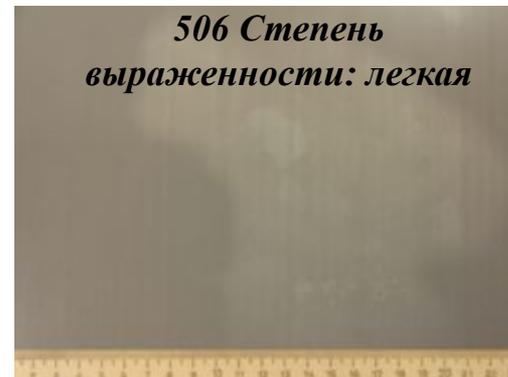
**406 Степень  
выраженности: средняя**



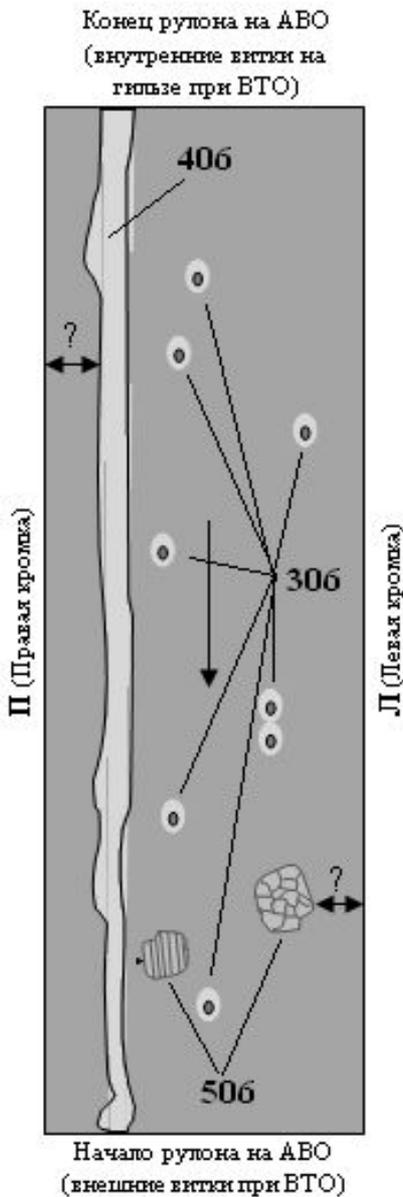
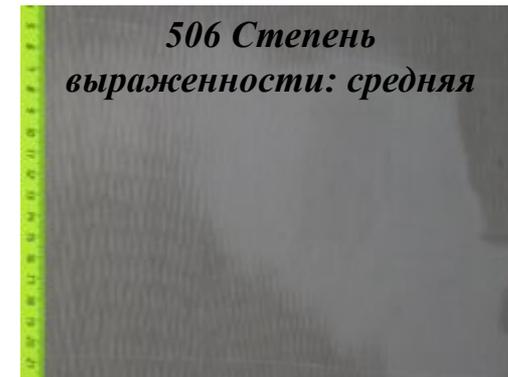
**406 Степень  
выраженности: тяжелая**



**506 Степень  
выраженности: легкая**



**506 Степень  
выраженности: средняя**

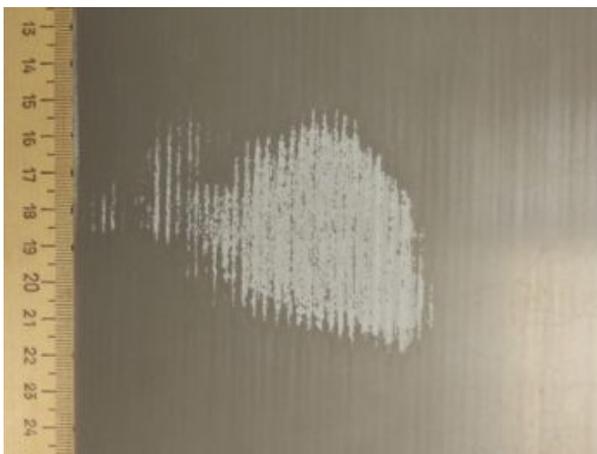


## 508 – «Не смытый MgO»

508 Степень выраженности: легкая



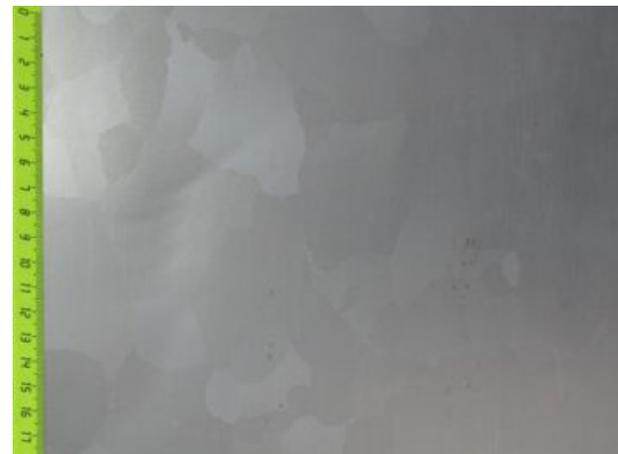
508 Степень выраженности: средняя



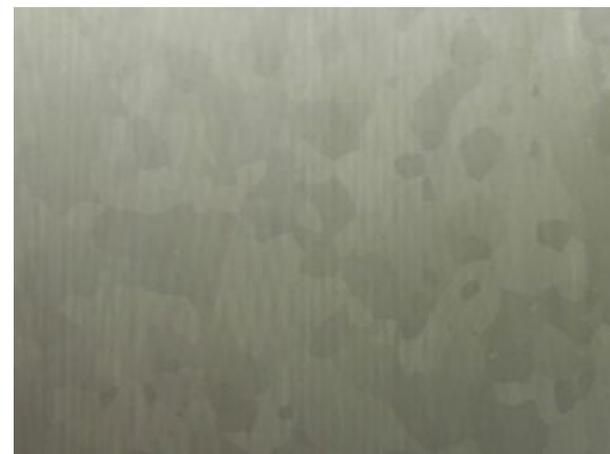
на наружных витках рулона в средней части по ширине полосы

## 542 – «Зерно»

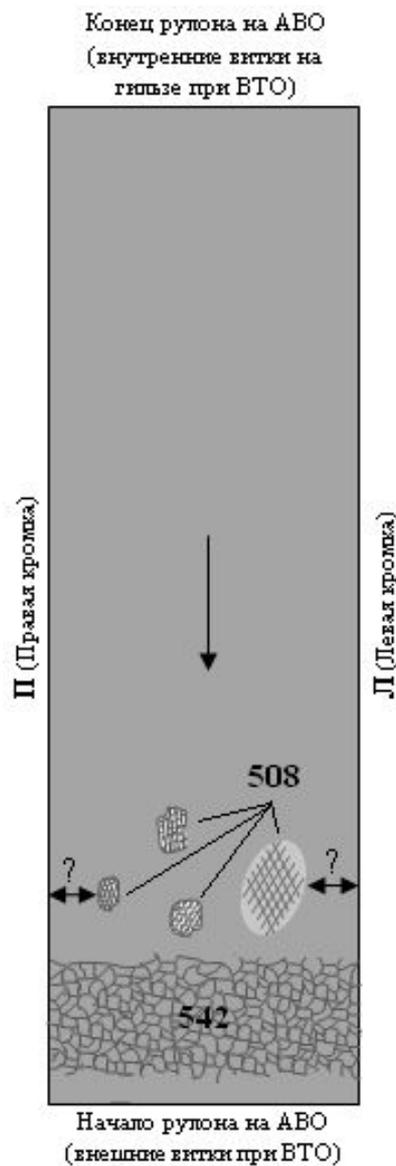
542 Степень выраженности: легкая



542 Степень выраженности: средняя

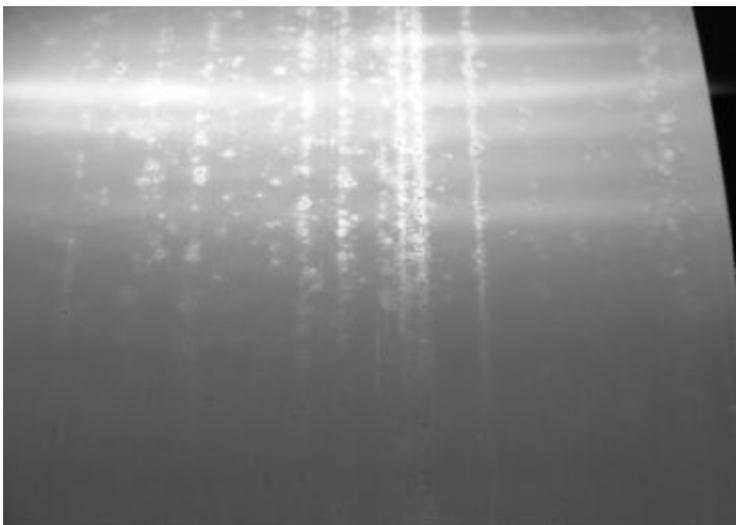


по всей ширине полосы на внешних витках



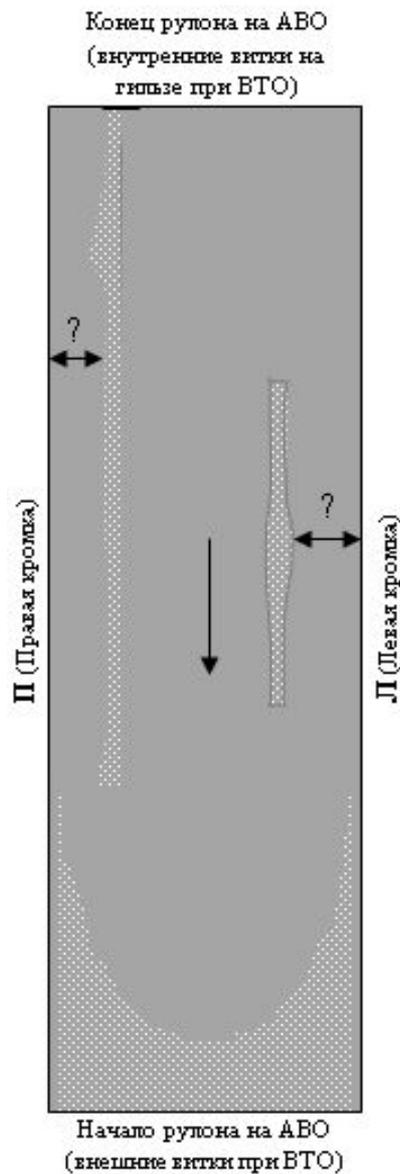
# 437 – «Крапчатость»

*437 Степень выраженности: средняя*

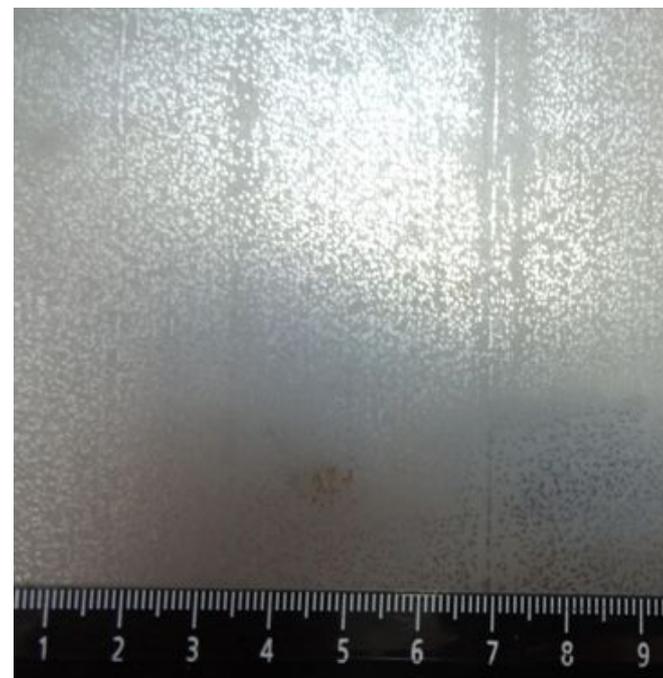


по всей длине полосы на любом расстоянии от кромки

**Причина образования:** нарушение грунтообразования при нагреве металла в процессе ВТО в местах неполного удаления с полосы перед обезуглероживающим отжигом полуорганических загрязнений.



*537 Степень выраженности: средняя*



на внешних витках рулона по всей поверхности полосы

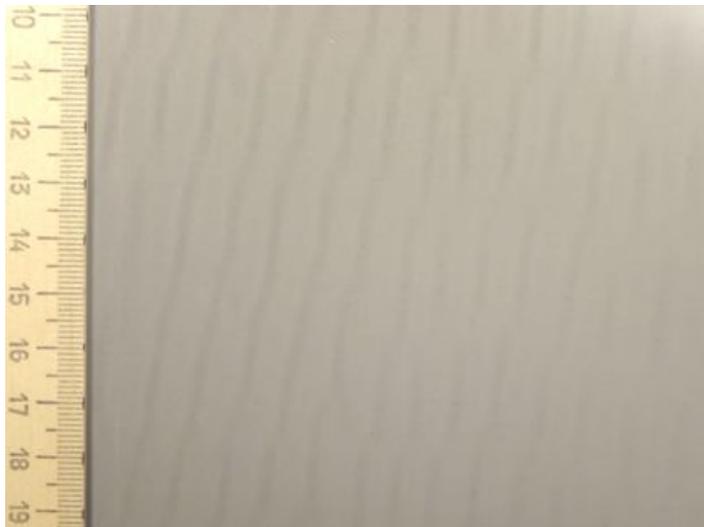
**Причина образования:** нарушение грунтообразования при нагреве в процессе ВТО в следствие интенсивного удаления влаги из-за резкого падения давления в атмосфере.

## Дефекты поверхности и категоричность

Дефекты приготовления и нанесения суспензии термостойкого покрытия: полосчатость (425), рябизна (423), точки MgO (411), шероховатое покрытие (417), продольная шероховатость (421), темные точки (441), сдиры покрытия (426), сварка (429).

## 423 – «Рябизна»

*423 Степень выраженности: легкая*



*423 Степень выраженности: средняя*



## 425 – «Полосчатость»

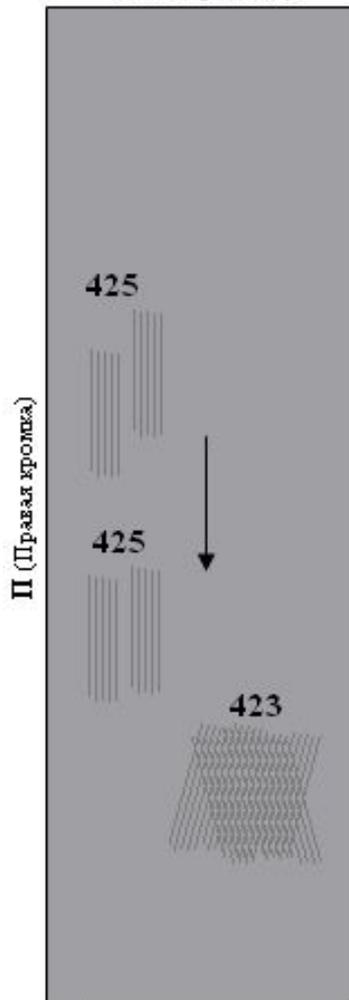
*425 Степень выраженности: легкая*



*425 Степень выраженности: средняя*



Конец рулона на АВО  
(внутренние вилки на  
гипсе при ВТО)



Начало рулона на АВО  
(внешние вилки при ВТО)

**в любом месте по всей длине и ширине полосы**

# 411 – «Точки MgO»

411 Степень выраженности: легкая

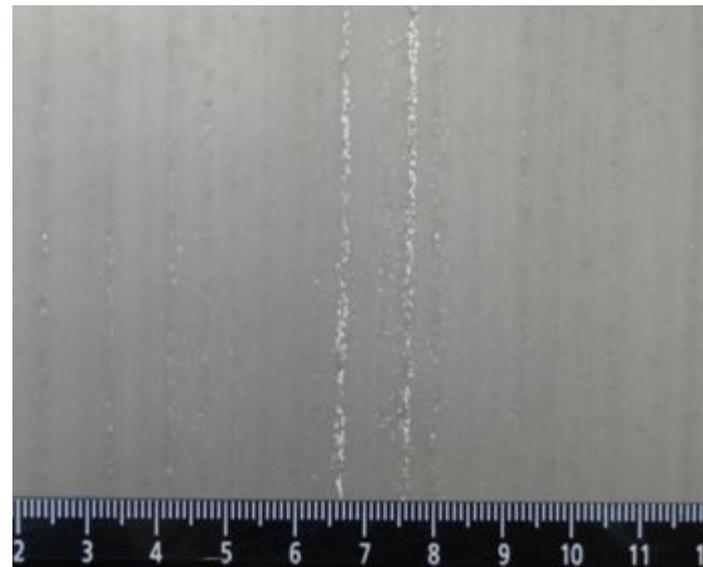


411 Степень выраженности: средняя

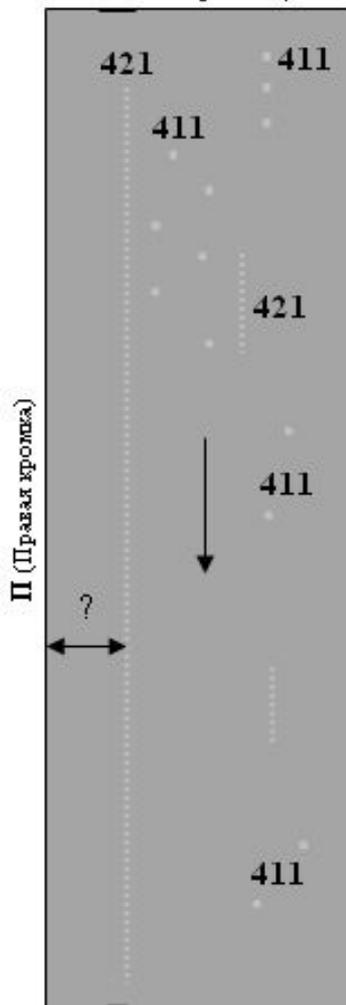


# 421 – «Продольная шероховатость»

421 Степень выраженности: средняя



Конец рулона на АВО  
(внутренние витки на  
гипзе при ВТО)



Начало рулона на АВО  
(внешние витки при ВТО)

**Причина образования 411 и 421:** избыток крупных частиц оксида магния в суспензии термостойкого покрытия

**по всей длине и ширине полосы, преимущественно строчками**

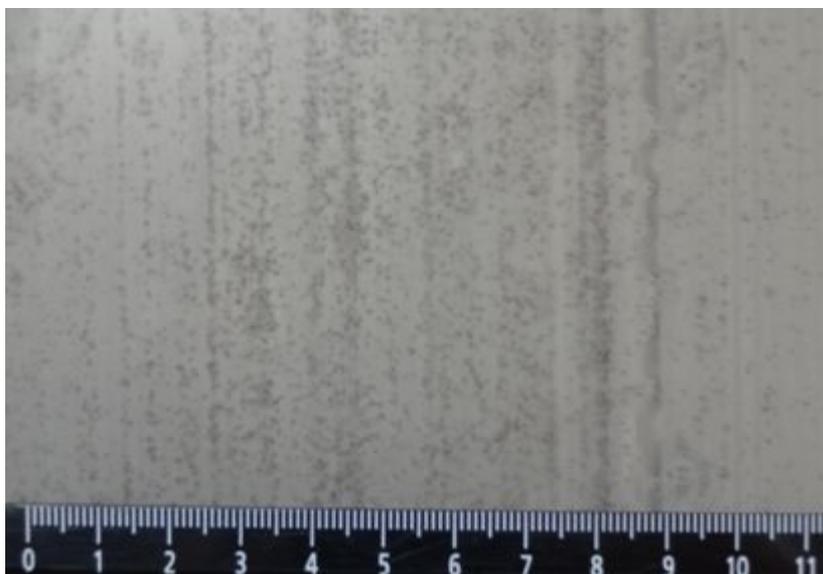
**по всей длине и ширине полосы, хаотично**

# 441 – «Темные точки на грунте»

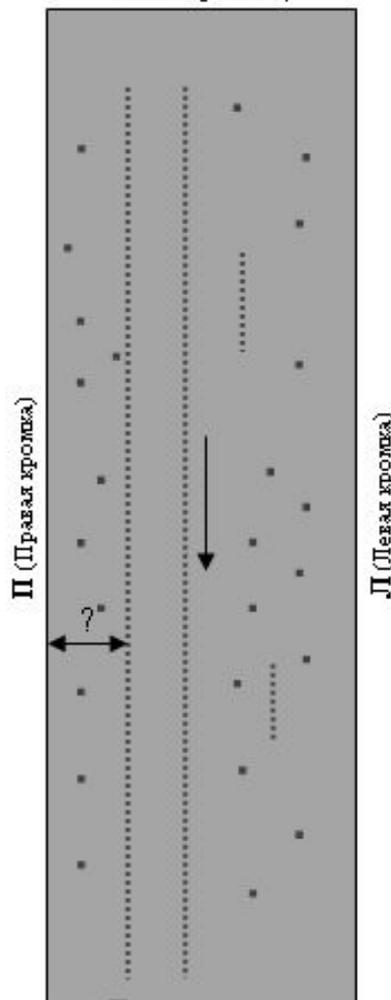
*441 Степень выраженности: легкая*



*441 Степень выраженности: средняя*



Конец рулона на АВО  
(внутренние витки на  
гильзе при ВТО)



Начало рулона на АВО  
(внешние витки при ВТО)

**Наиболее вероятное месторасположение:** по всей длине и ширине полосы, строчками или хаотично

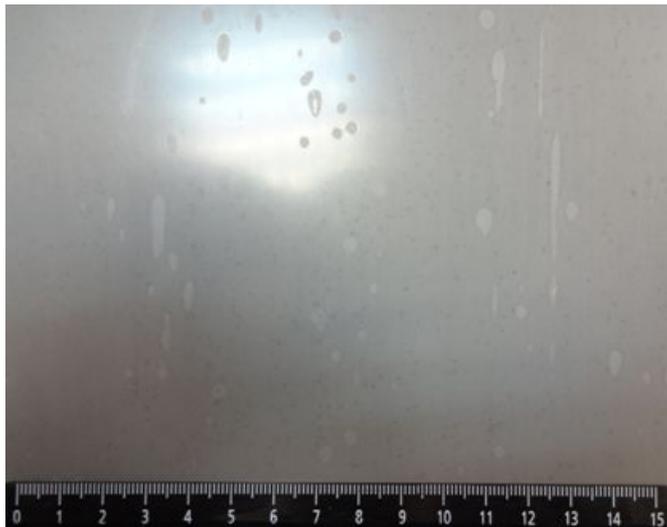
**Причина образования:** избыток крупных частиц оксида магния в суспензии термостойкого покрытия

## Дефекты поверхности и категоричность

Дефекты, связанные с приготовлением и нанесением электроизоляционного покрытия: «S-2» (633), пятна без ЭИП (606), следы, капли раствора (627, 628). Низкое КЭСИ – «R» (618). Мажущий налет (635), плохая адгезия (035). Определение категоричности ЭАС в зависимости от степени выраженности дефектов.

# 606 – «Пятна без электроизоляционного покрытия»

606 Степень выраженности: средняя



606 Степень выраженности: средняя



# 627 – «Следы раствора»

627 Степень выраженности: средняя

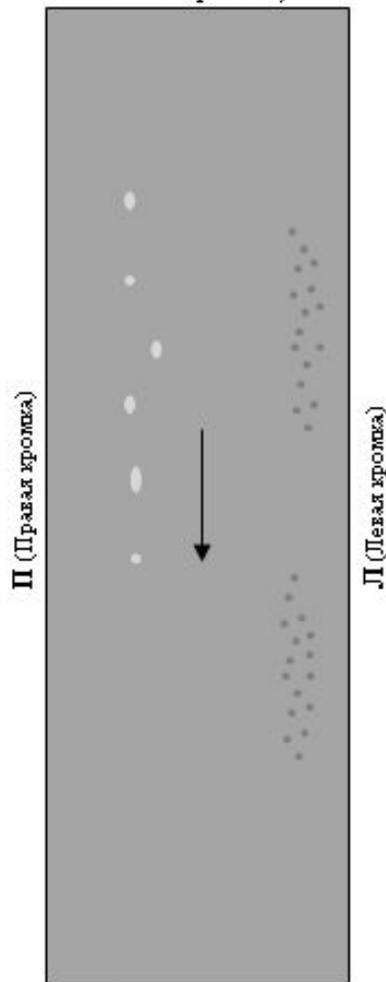


**Наиболее вероятное  
месторасположение:**

606 - в любом месте по ширине  
и длине полосы;

627 - в любом месте полосы  
ближе к кромкам

Конец рулона на АВО  
(внутренние витки на  
гильзе при ВТО)



Начало рулона на АВО  
(внешние витки при ВТО)

Благодарю за внимание!