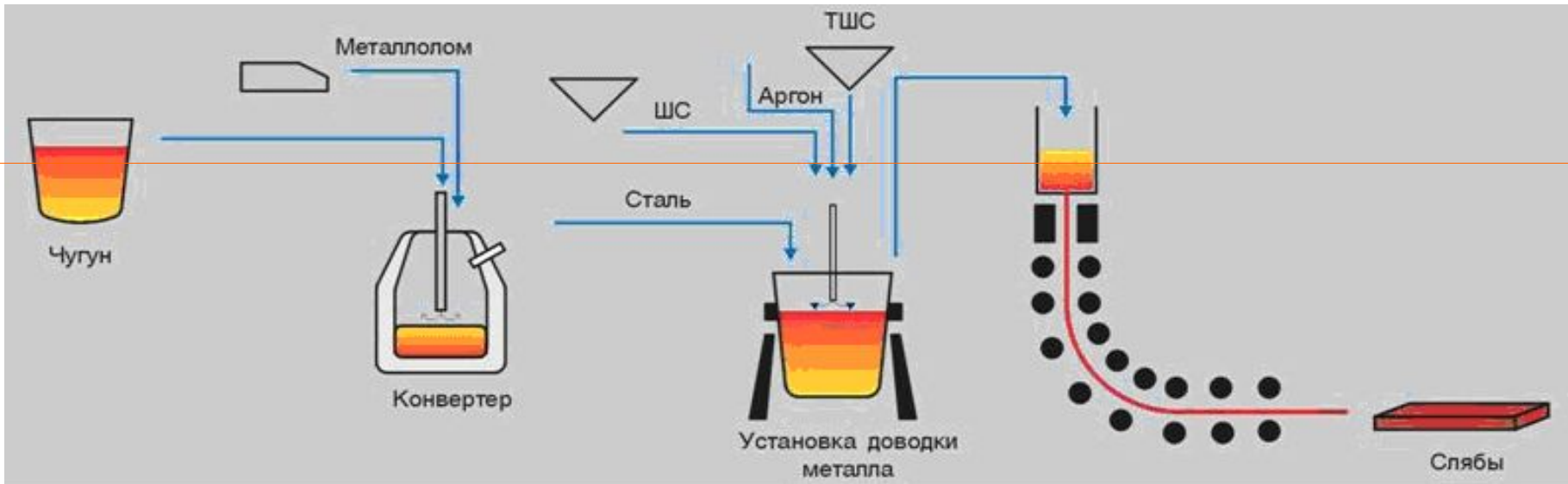




Поверхность электротехнической анизотропной стали

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.

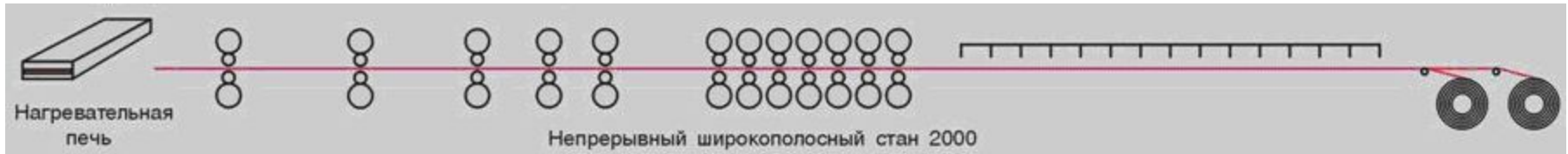


Схема производства ЭАС по нитридно-медной технологии

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



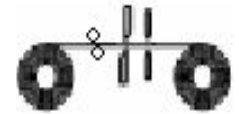
НТА: травление горячекатаного проката (очистка от загрязнений стали от окислов).



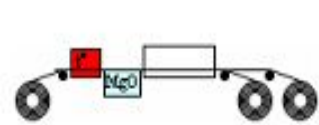
Стан 1300: первая холодная прокатка с 2,5 на 0,60, 0,65, 0,70, 0,75 мм.



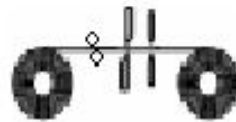
АПР-1 (2): подготовка рулонов – подрезка кромок, удаление дефектов.



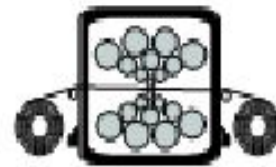
АОО: нанесение термостойкого покрытия на основе сульфата MgO.



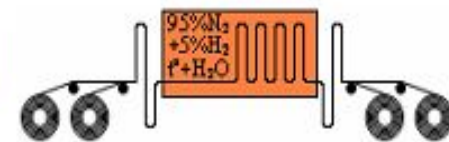
АПР-8: подготовка рулонов – удаление дефектов.



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



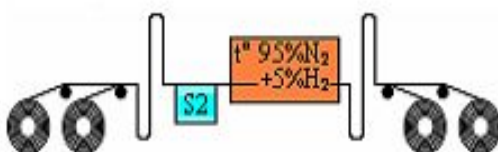
АРО (АОО-1А): рекристаллизация и обезуглероживание жидкой отливкой.



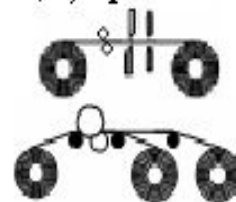
ВТО: высоко температурный отжиг в колпачковых печах.



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



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

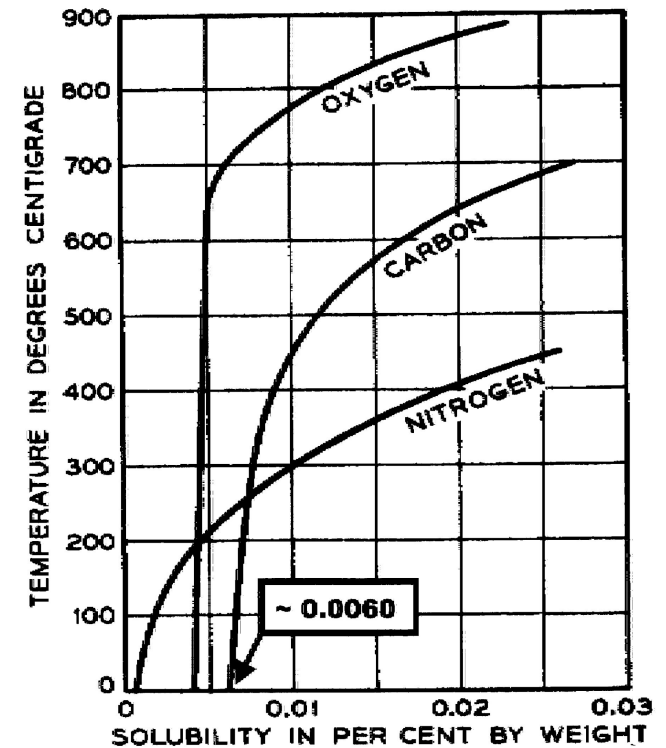
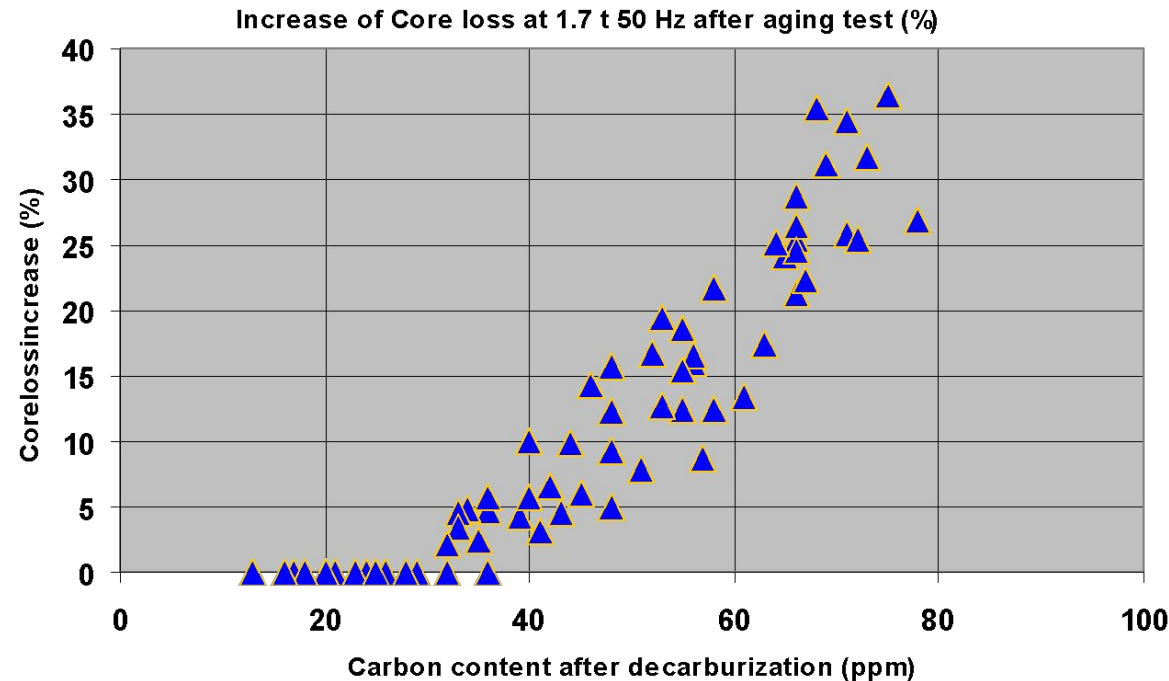


Упаковка и отгрузка рулонов ЭАС.



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

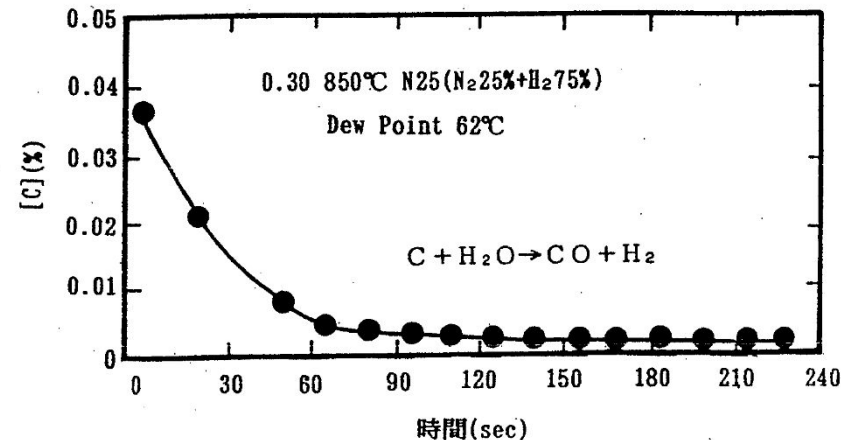
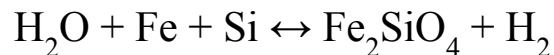
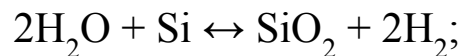
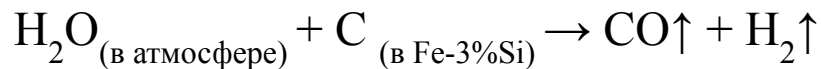
- Традиционно для сталей сульфидного и сульфо-нитридного вариантов, ОО осуществляют после прокатки полосы на конечную толщину (0,23...0,35 мм) в азото-водородной газовой смеси (обычно 75 % H_2 + 25 % N_2), увлажненной до состояния точки росы 69°C. Применяемые для обезуглероживающего отжига ЭАС нитридно-медного 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

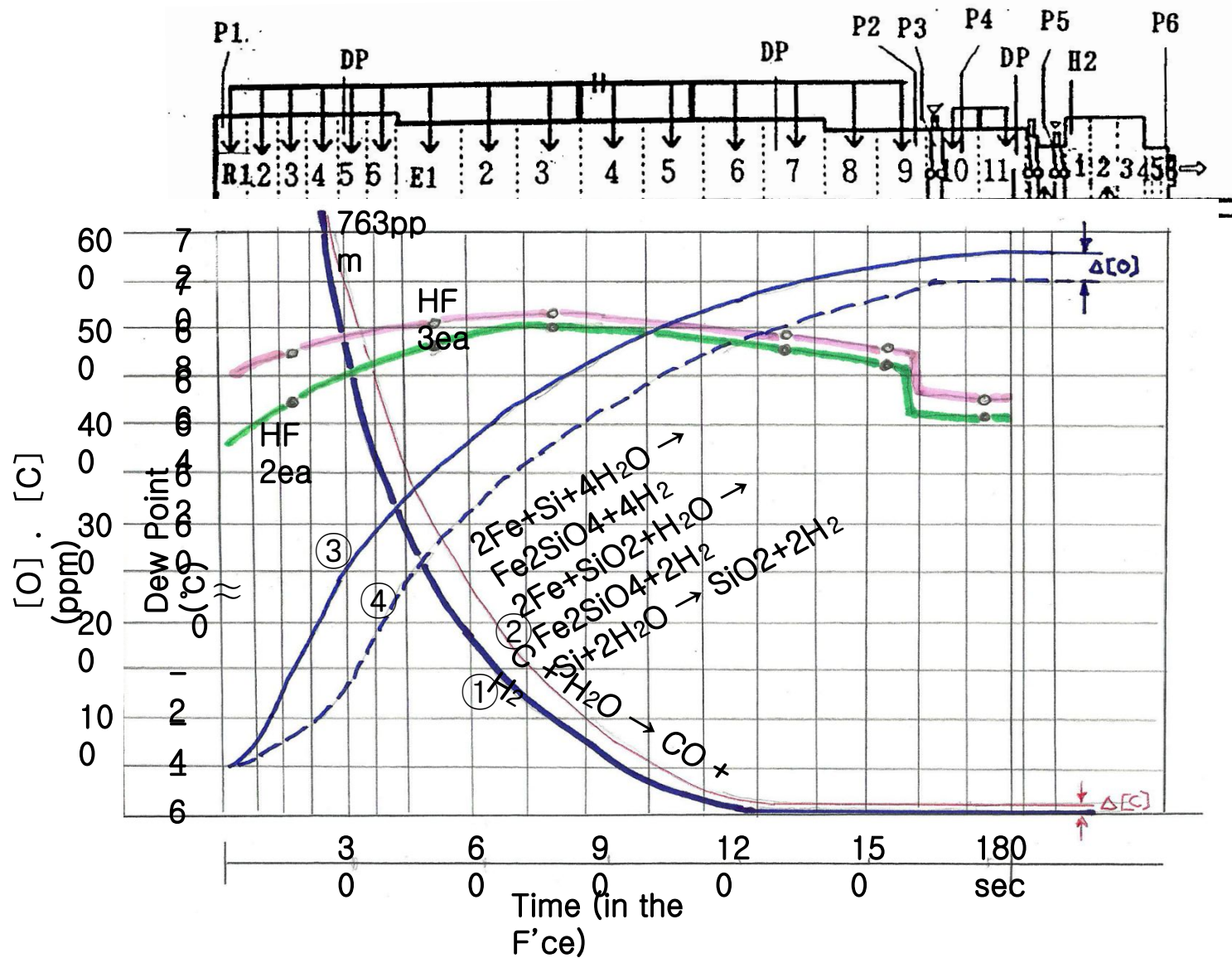
• Удаление углерода происходит из-за низкой его растворимости в кремнистом феррите. Процесс обезуглероживания заключается в диссоциации (растворении) углеродосодержащих фаз при высокой температуре, транспортировке (диффузии) углерода к поверхности полосы стали, переходе атомов из твердого раствора на 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).

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

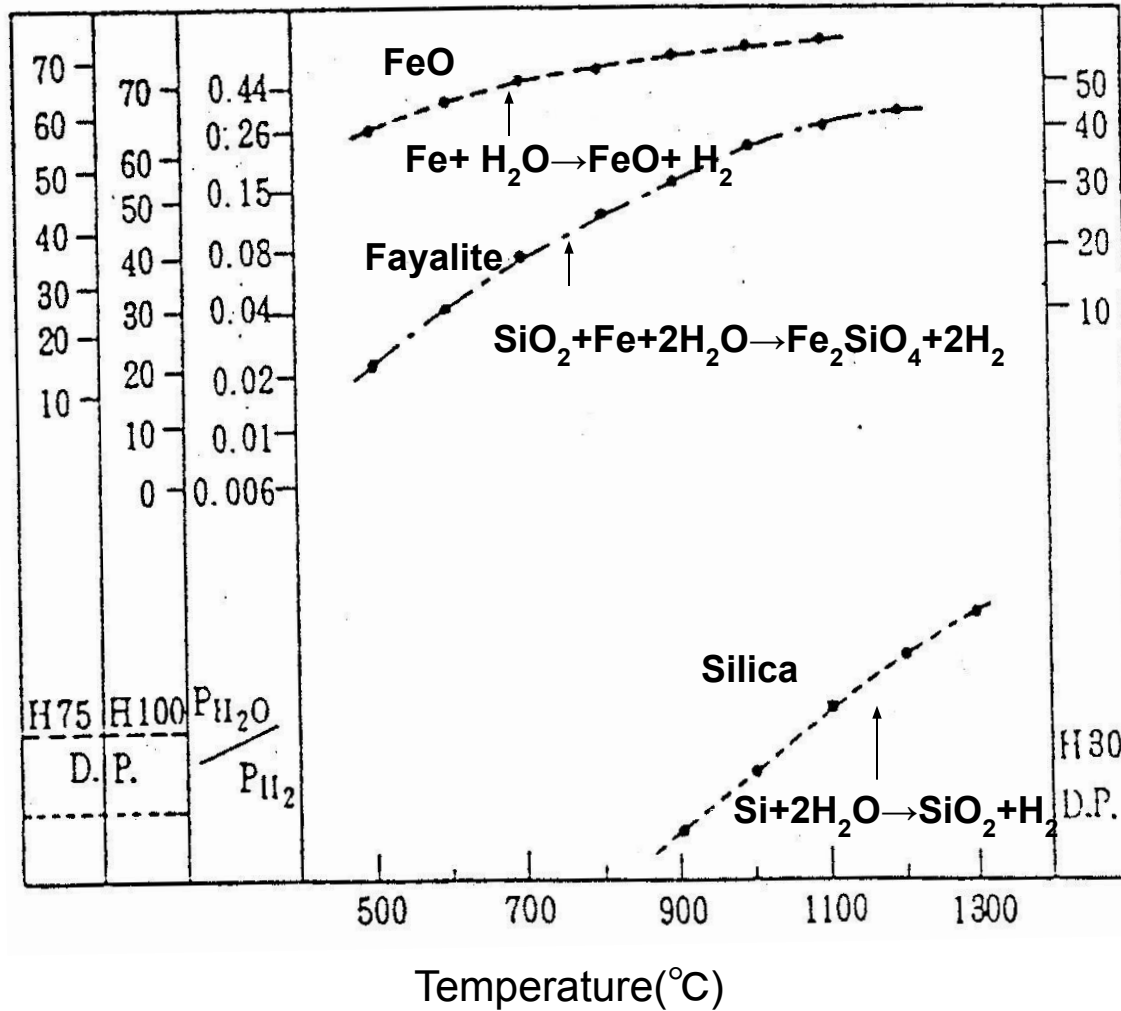
где h – толщина полосы, которая рассматривается как удвоенный эффективный диффузионный путь, проходимый атомами элемента за время τ



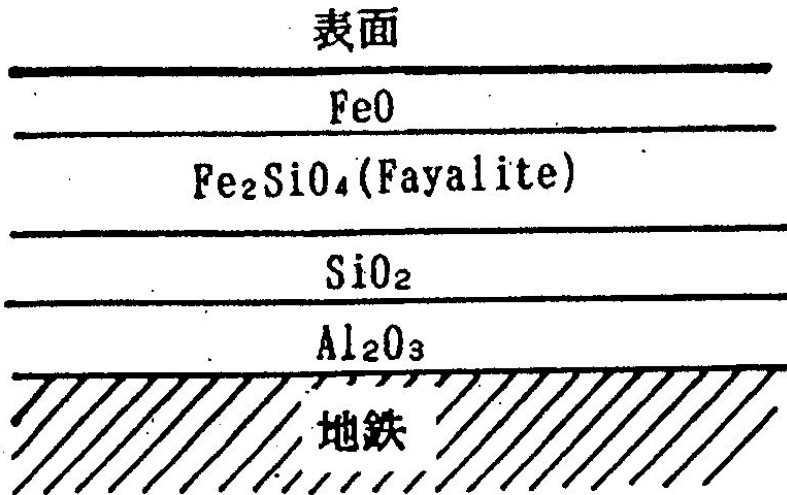
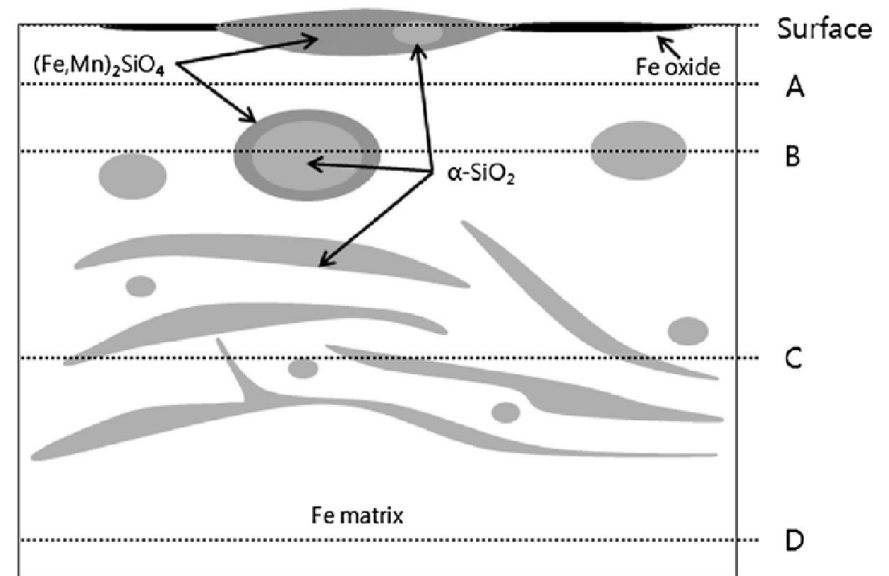
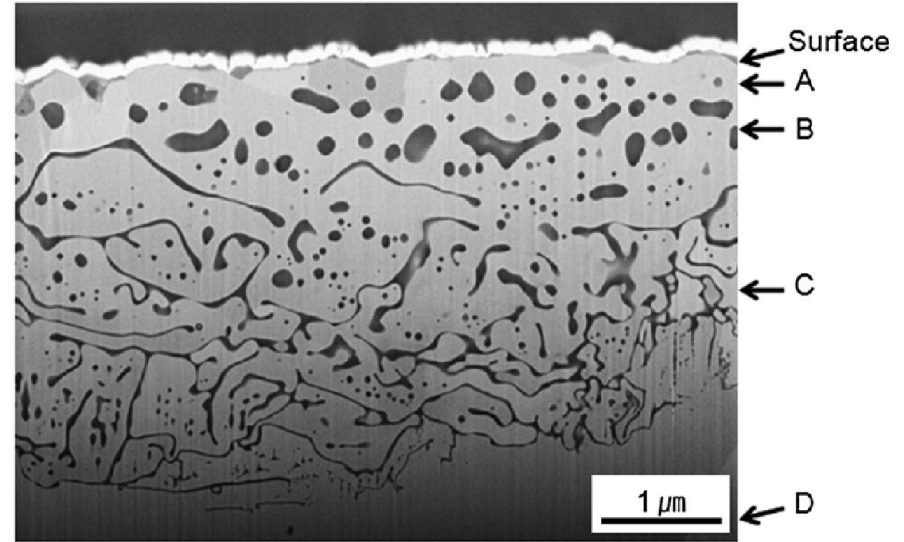
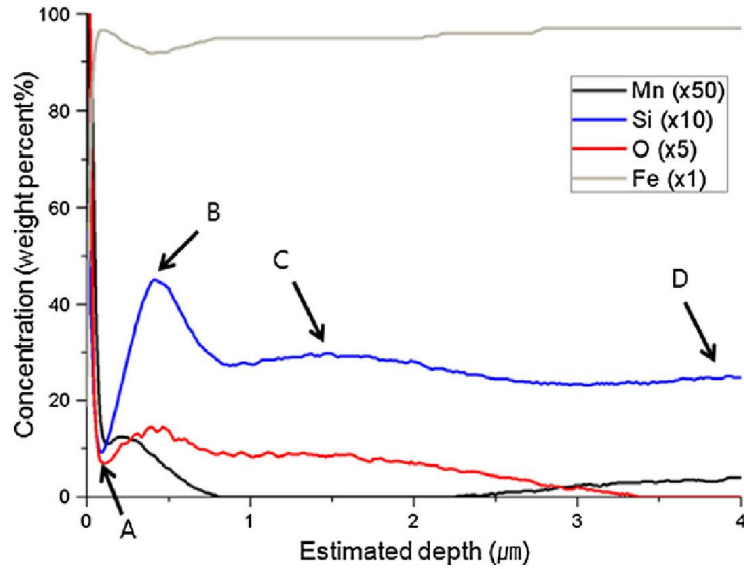
Обезуглероживающий отжиг. Зона внутреннего окисления



5. Heat stability of Oxides by partial pressure of O₂ (H₂O/H₂)

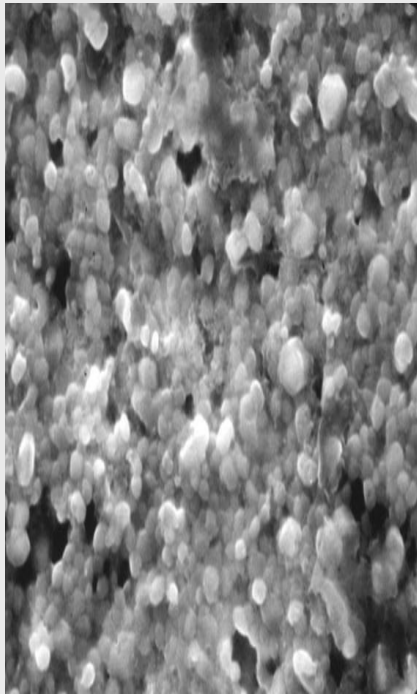


Зона внутреннего окисления

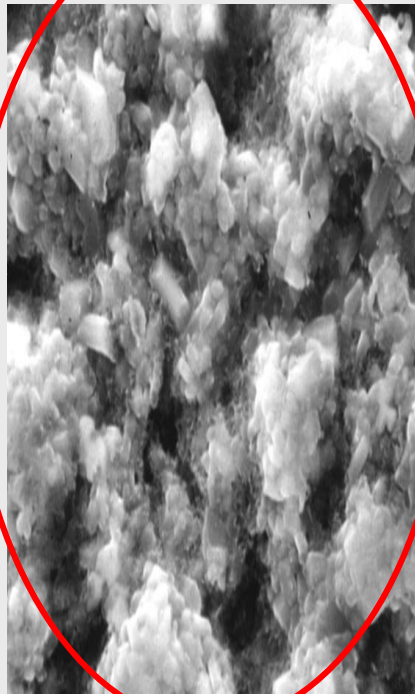


* Microstructure of Base Coating

<Good>

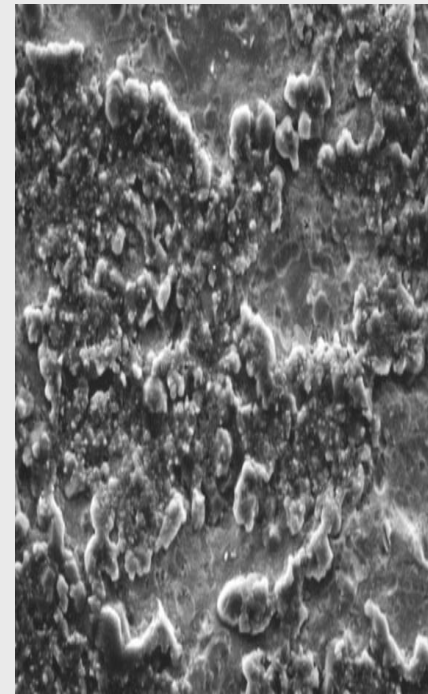


<too much>



Oxidative defects
(Fe-mound,
Oxidized color change)

<lack>



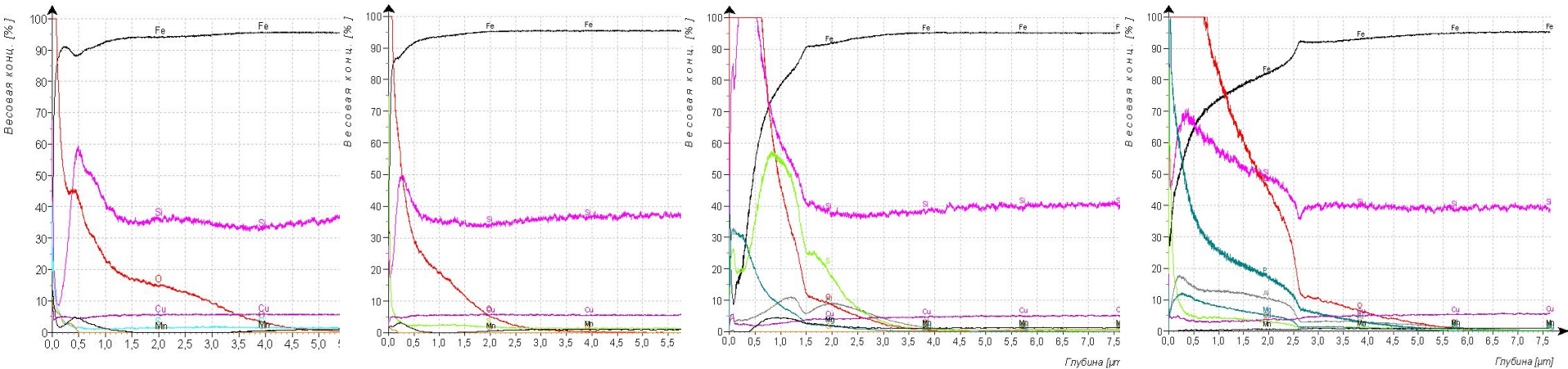
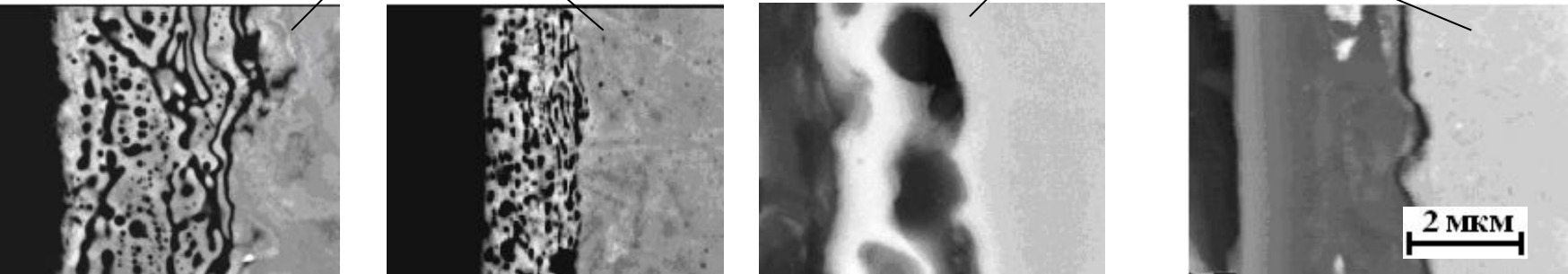
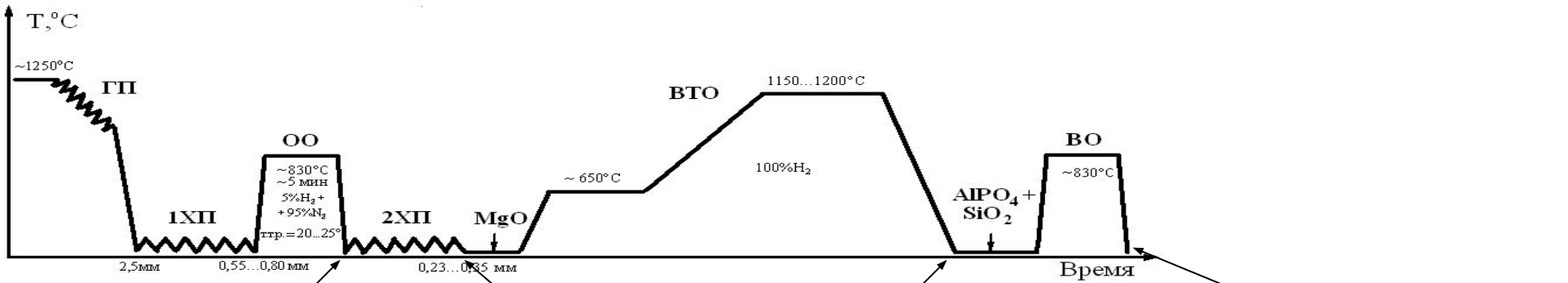
Structure exposure
/ peel-off glass film

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°C		~ 20...400°C	
$H_2O_{(ж)} \rightarrow H_2O \uparrow$		$Mg(OH)_2 + nH_2O \rightarrow Mg(OH)_2 + nH_2O \uparrow$	

Высокотемпературный отжиг			
~ 400... 700°C	~ 700... 900°C	~ 900... 1150°C	~ 1150°C
$Mg(OH)_2 \rightarrow MgO + H_2O \uparrow$ $H_2O + Fe \rightarrow FeO + H_2 \uparrow$	$MgO + FeO \rightarrow (MgFe)O + O_{(r)}$	$2(MgFe)O + SiO_2 \rightarrow (FeMg)_2SiO_4$	$MnS_{(r)} \rightarrow Mn_{(r)} + S_{(r)}$ $S_{(r)} + H_2 \rightarrow H_2S \uparrow$ $AlN_{(r)} \rightarrow Al_{(r)} + N_{(r)}$ $2N_{(r)} + 3H_2 \rightarrow 2NH_3 \uparrow$

Изменение структуры поверхностного слоя ЭАС на различных стадиях ее обработки



Изменение структуры поверхностного слоя ЭАС на различных

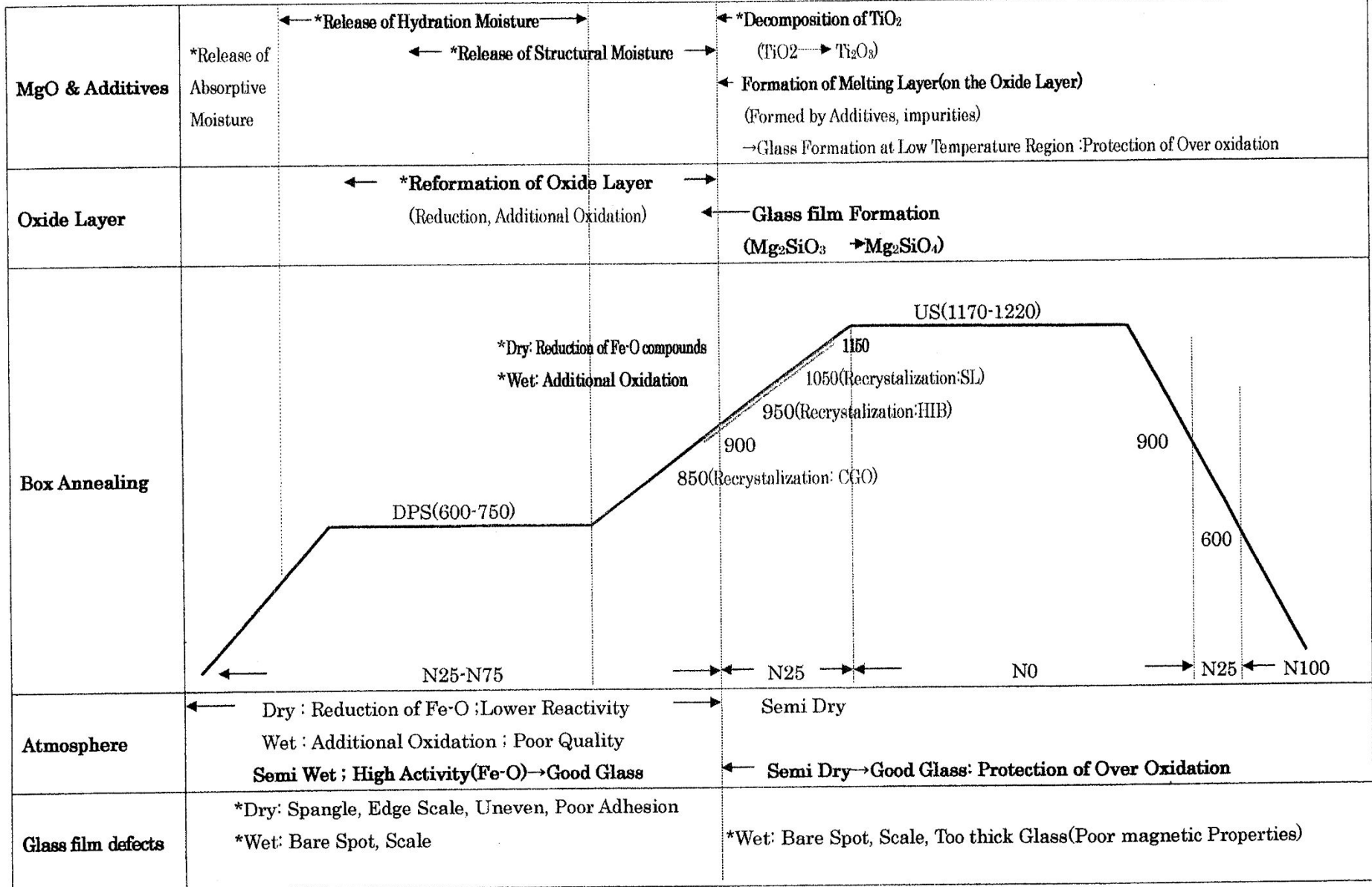


Fig.1 Conceptual Drawing of Process of Glass Film Formation

- Последней стадией формирования покрытия является нанесение на поверхность стали водного раствора смеси $\text{Al}(\text{OH})_3$, H_3PO_4 и 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 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)

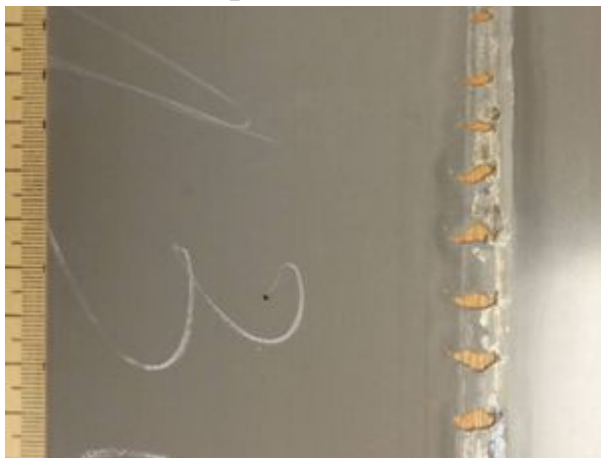
009 – «Дыры (пленя до дыр)»

029 – «сварка по плене или по газовому пузырю»

009 Степень выраженности: тяжелая

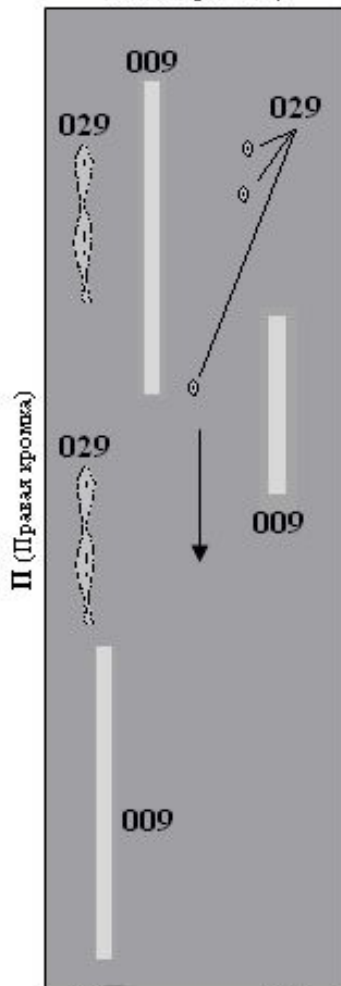


009 Степень выраженности: тяжелая



В любом месте по длине и ширине
рулона

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

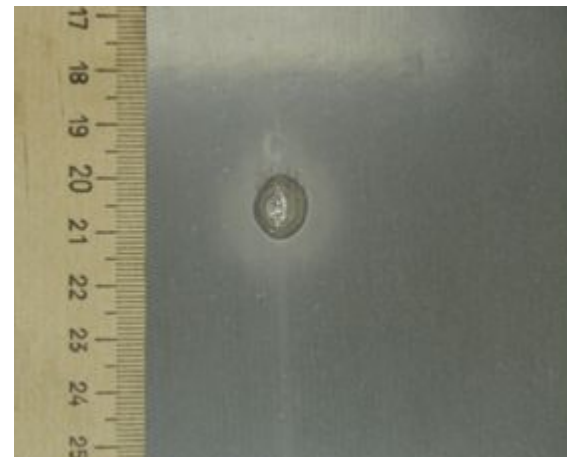


Начало рулона на АВО
(внешние витки при ВТО)

029 Степень выраженности: тяжелая



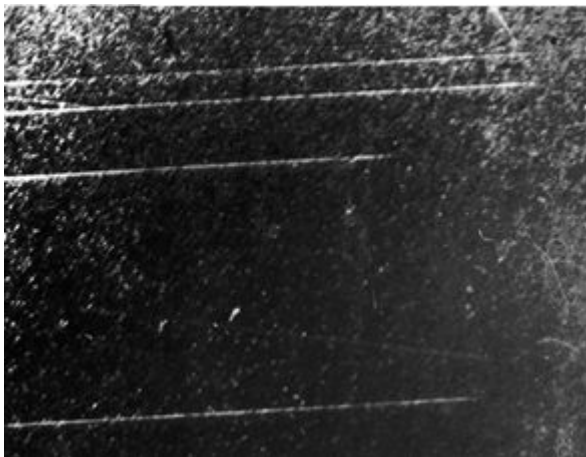
029 Степень выраженности: тяжелая



В любом месте по длине и ширине
рулона

603 – «Заломы по кромке»

603 Степень выраженности: тяжелая



603 Степень выраженности: тяжелая

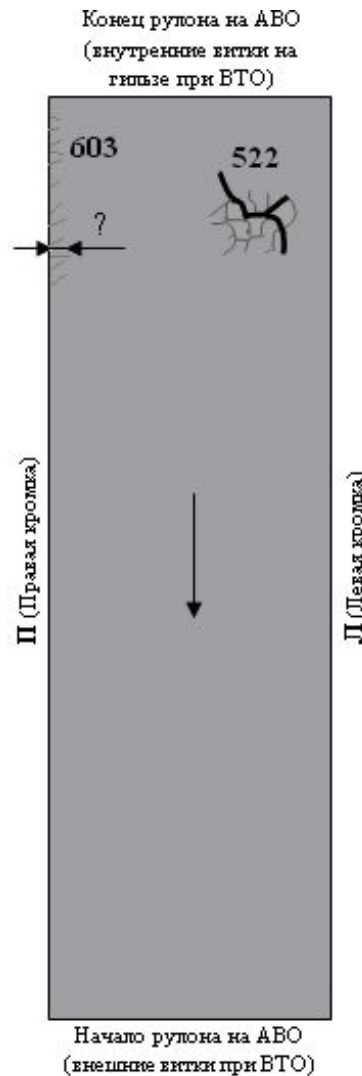


Изображения увеличены

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.

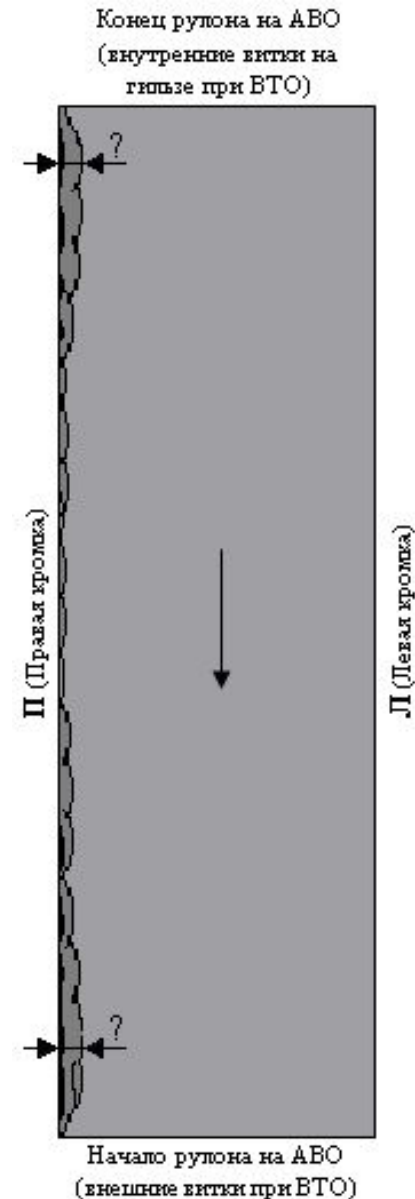
Неплоскостность (наддав ВТО (501), местный короб (202), продольный наддав (604), вытяжка (607), термический наддав (13), наддав по плоскости (531)), рулонная кривизна, разнотолщинность (32), серповидность.

501 – «Наддав ВТО»



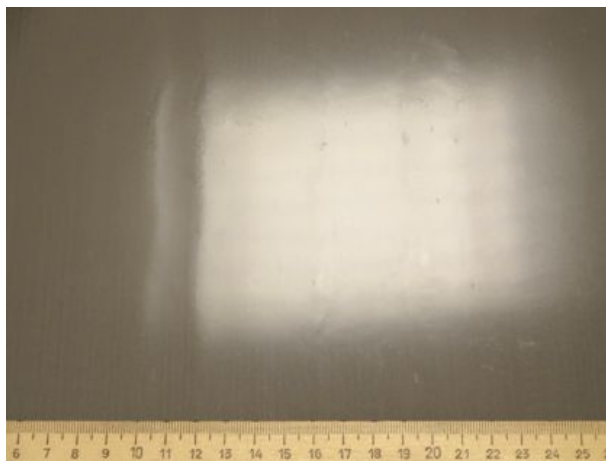
Причина образования: деформация кромки полосы со стороны посада в результате -
1) нарушения технологии установки рулонов на литье; 2) использования дефектного литья.

Наиболее вероятное месторасположение:
кромка полосы со стороны посада



604 – «Продольный надав»

604 Степень выраженности: тяжелая



604 Степень выраженности: тяжелая



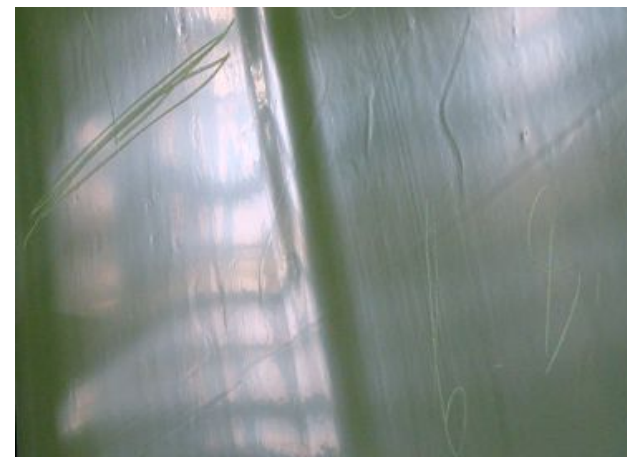
по всей длине рулона на некотором расстоянии от кромки

607 – «Вытяжка»

607 Степень выраженности: тяжелая

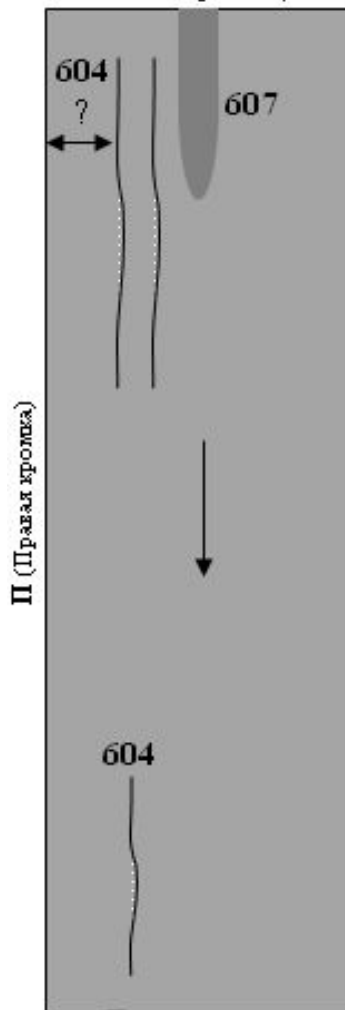


607 Степень выраженности: тяжелая



внутренние витки рулона в средней части по ширине полосы

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



Начало рулона на АВО
(внешние витки при ВТО)

Дефекты поверхности и категоричность

Дефекты, связанные с прямым окислением поверхности

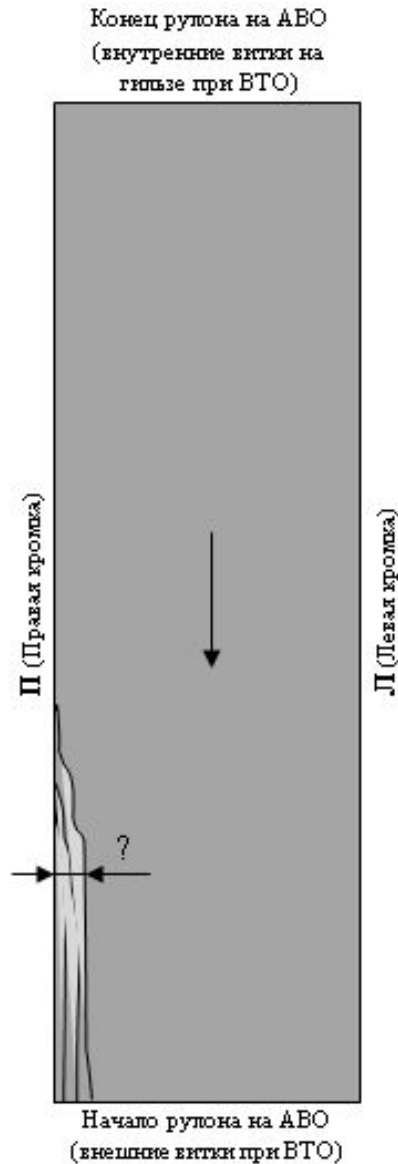
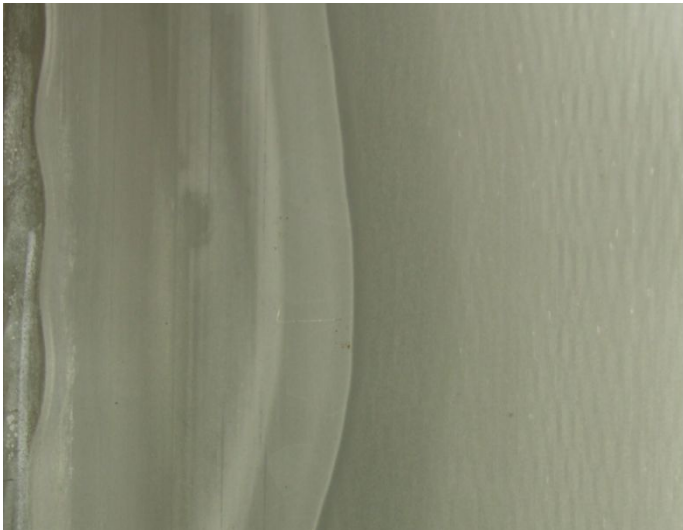
ЭАС: разводы (500), окисление (305, 405, 505), пятна без грунта (406, 506), MgO (508), крапчатость (437, 537), зерно (442).

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

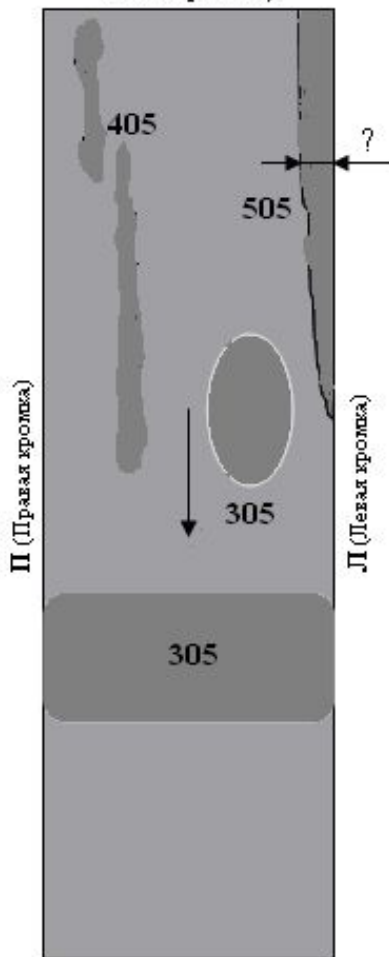


305 Степень выраженности: тяжелая



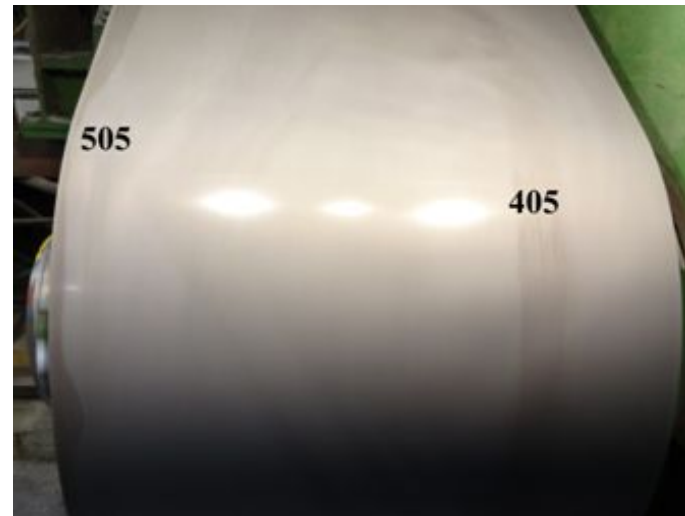
305 – в любом месте полосы, пятнами или по всей ширине

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

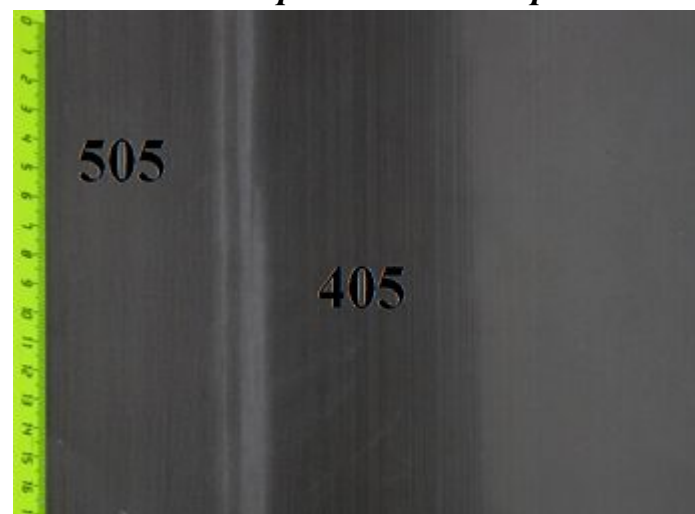


Начало рулона на АВО
(внешние витки при ВТО)

Степень выраженности: легкая



Степень выраженности: средняя



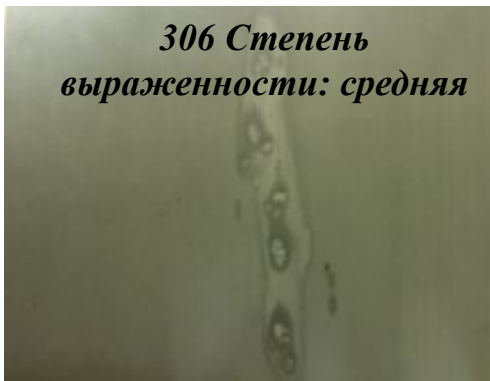
405 – на расстоянии от кромки, 505 – кромка внутренних витков рулонов

306, 406, 506 – «Пятна без грунта»

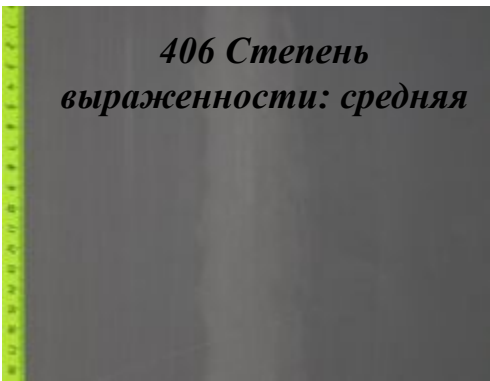
**306 Степень
выраженности: легкая**



**306 Степень
выраженности: средняя**



**406 Степень
выраженности: средняя**



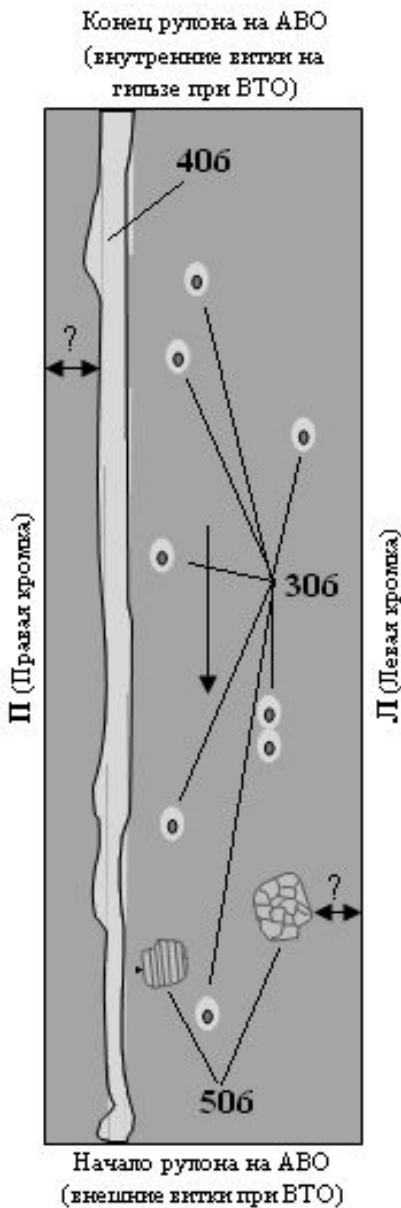
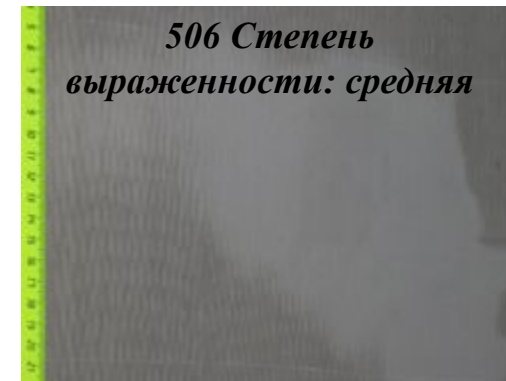
**406 Степень
выраженности: тяжелая**



**506 Степень
выраженности: легкая**



**506 Степень
выраженности: средняя**

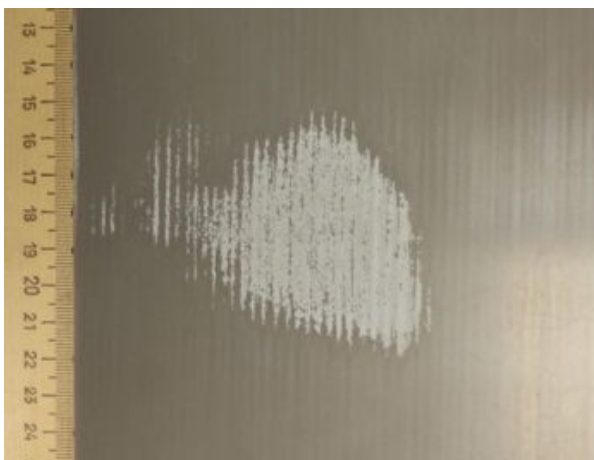


508 – «Не смытый MgO»

508 Степень выраженности: легкая



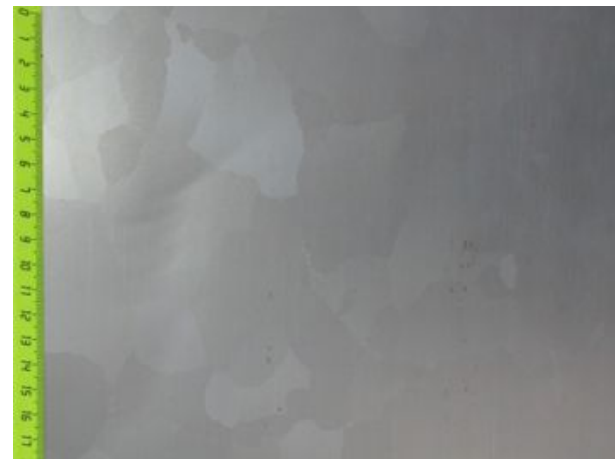
508 Степень выраженности: средняя



на наружных витках рулона в
средней части по ширине полосы

542 – «Зерно»

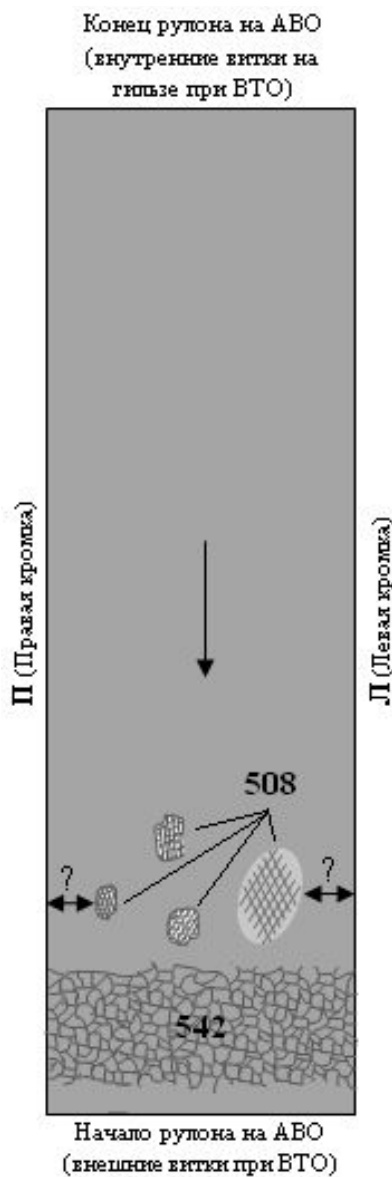
542 Степень выраженности: легкая



542 Степень выраженности: средняя

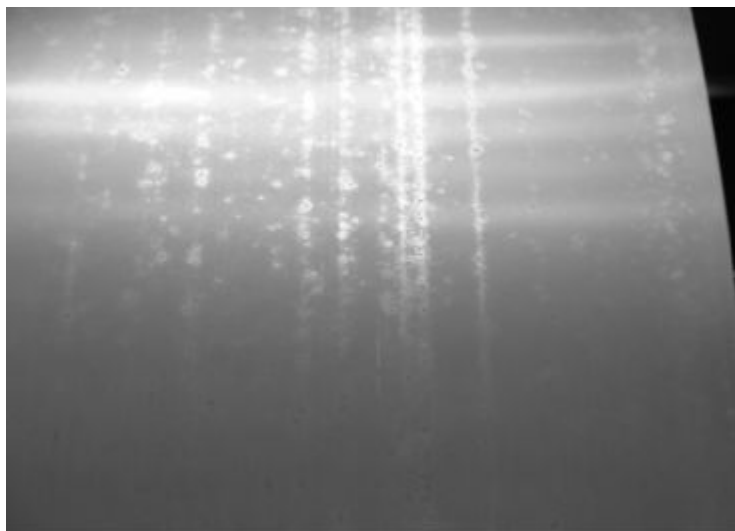


по всей ширине полосы на внешних
витках



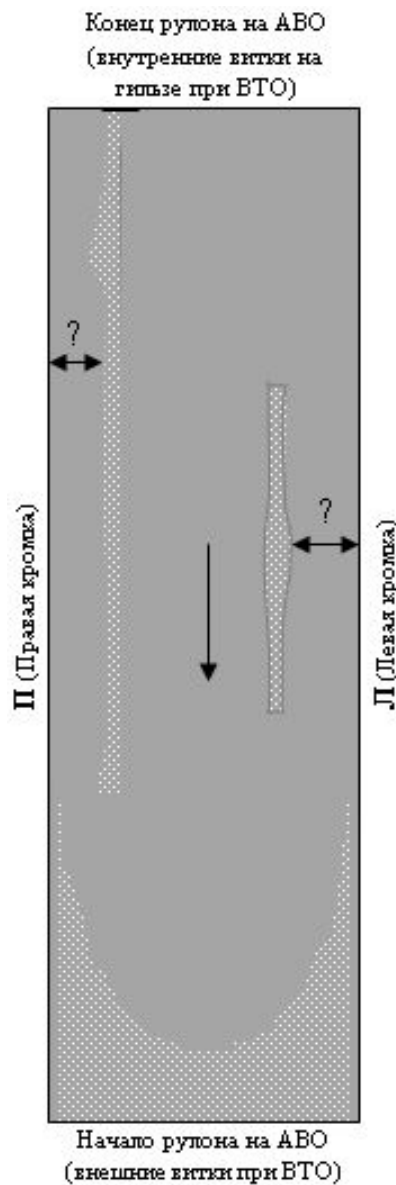
437 – «Крапчатость»

437 Степень выраженности: средняя

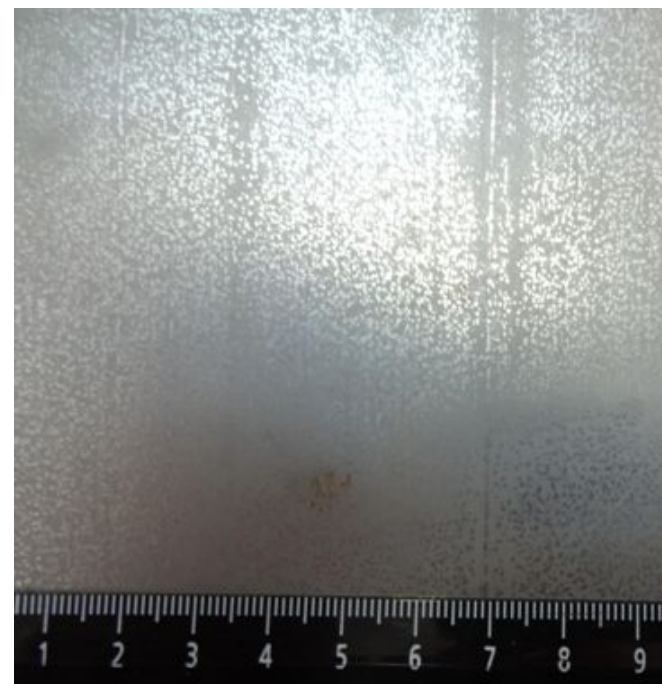


по всей длине полосы на любом расстоянии от кромки

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»

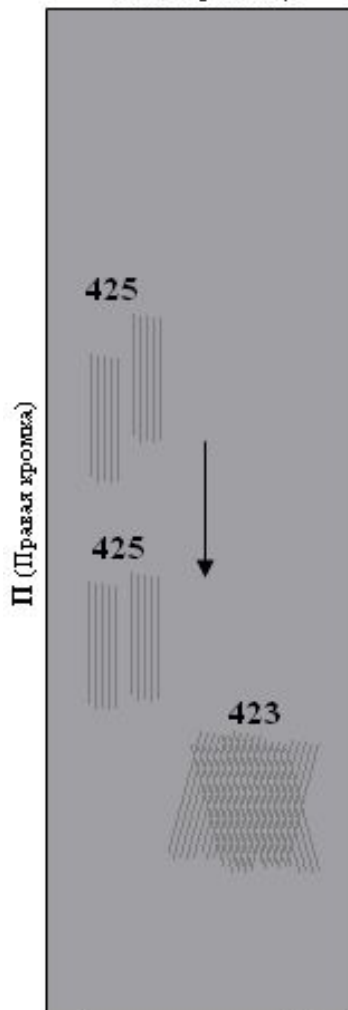
425 Степень выраженности: легкая



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



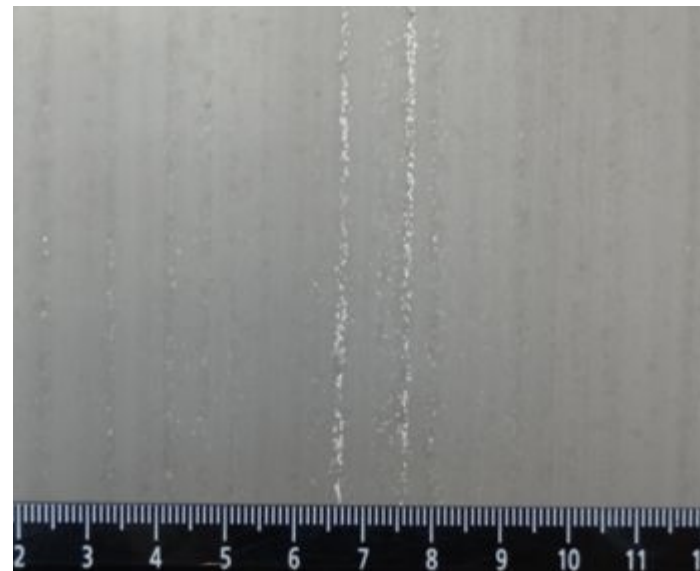
411 Степень выраженности: средняя



по всей длине и ширине полосы, хаотично

421 – «Продольная шероховатость»

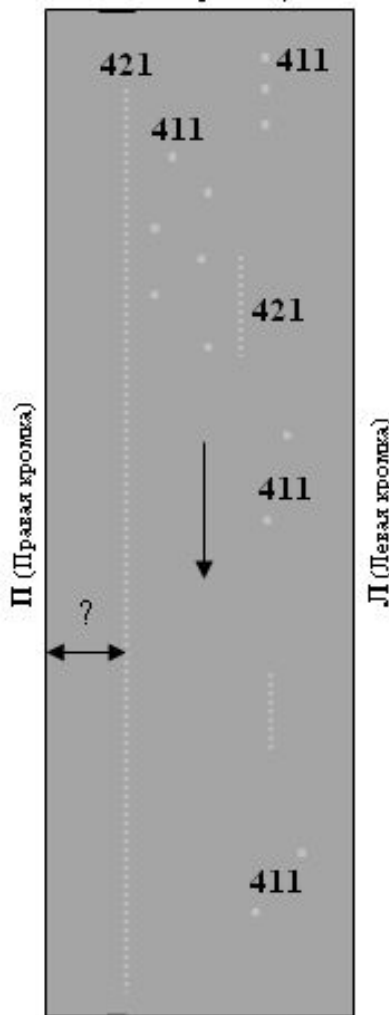
421 Степень выраженности: средняя



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

по всей длине и ширине полосы, преимущественно строчками

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



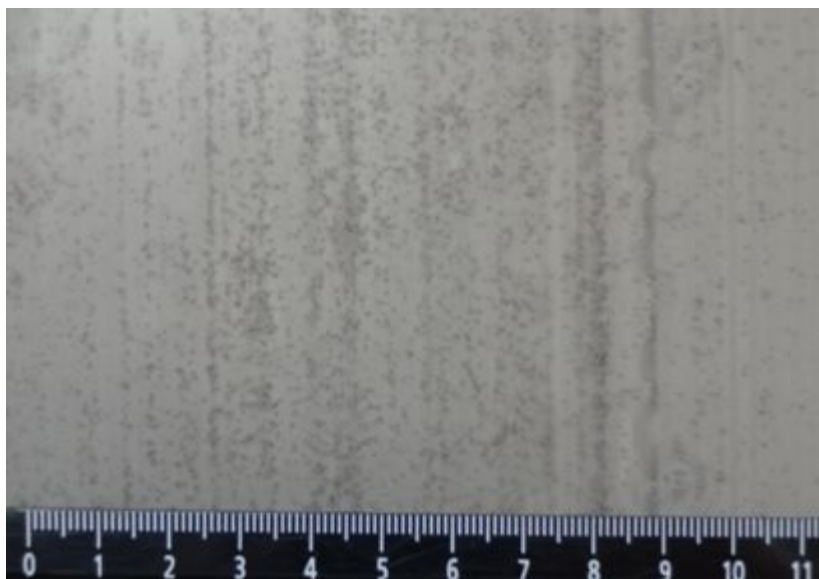
Начало рулона на АВО
(внешние витки при ВТО)

441 – «Темные точки на грунте»

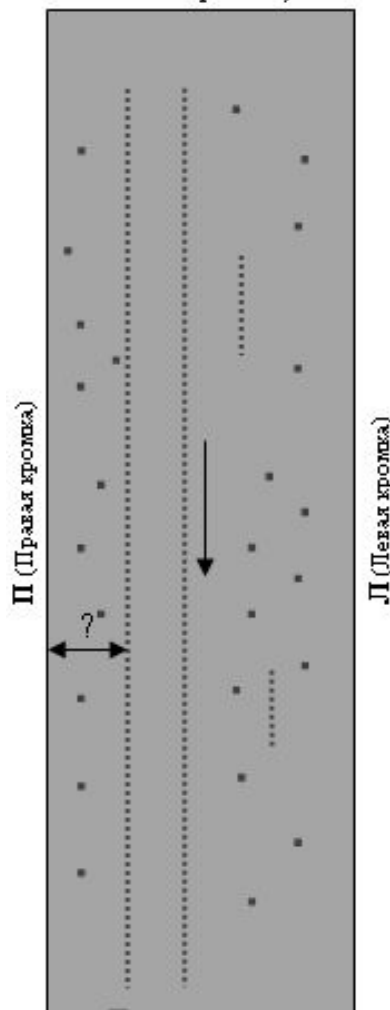
441 Степень выраженности: легкая



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

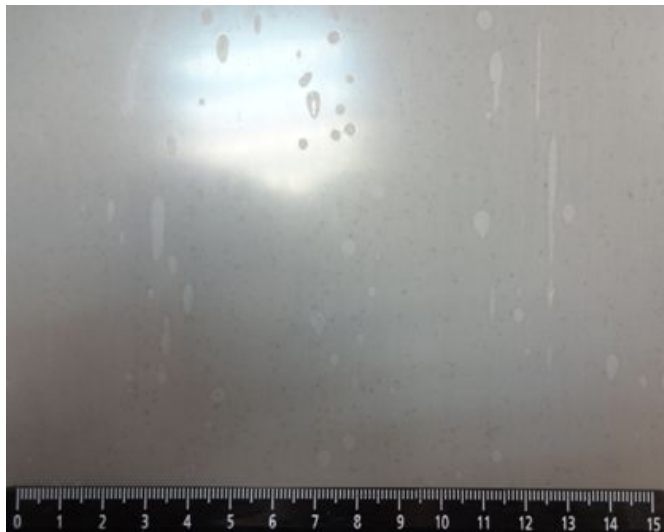
Причина образования: избыток крупных частиц оксида магния в суспензии термостойкого покрытия

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

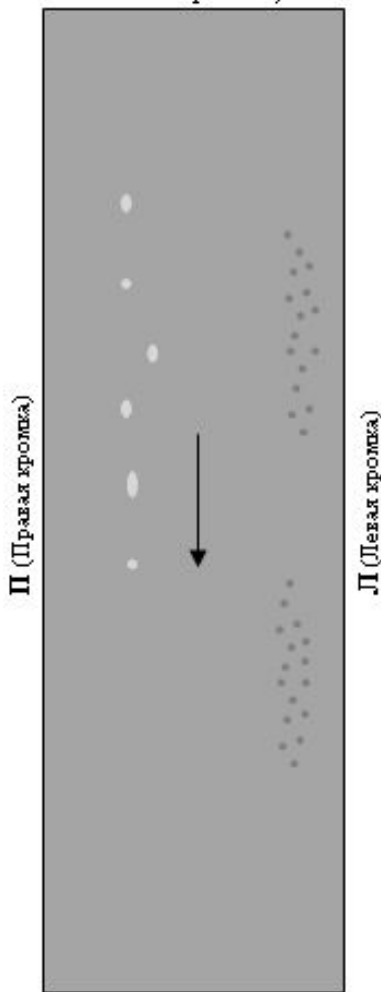


**Наиболее вероятное
месторасположение:**

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!