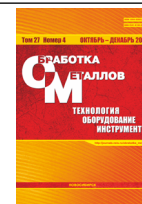




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Разработка методики оценки склонности к образованию наростов на печных роликах

Кирилл Берсенева^{1,а,*}, Михаил Пузанов^{2,б}, Алексей Чернов^{1,с}, Юрий Коробов^{1,д},
 Лариса Каренина^{2,е}, Юлия Худорожкова^{3,ф}, Алексей Макаров^{1,г},
 Денис Давыдов^{1,и}, Галия Кинжебаева^{1,и}

¹ Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620108, Россия

² Группа НЛМК, ВИЗ-Сталь, ул. Кирова, 28, г. Екатеринбург 620108, Россия

³ Институт машиноведения им. Э. С. Горкунова УрО РАН, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия

^а  <https://orcid.org/0009-0004-5505-3000>,  bersenev@imp.uran.ru; ^б  <https://orcid.org/0009-0009-9457-4008>,  puzanov_mp@nlmk.com;
^с  <https://orcid.org/0009-0006-3478-6277>,  chernov_aa@imp.uran.ru; ^д  <https://orcid.org/0000-0003-0553-918X>,  yukorobov@imp.uran.ru;
^е  <https://orcid.org/0009-0001-5439-2711>,  karenina_ls@nlmk.com; ^ф  <https://orcid.org/0000-0003-3832-1419>,  khjv@mail.ru;
^г  <https://orcid.org/0000-0002-2228-0643>,  avm@imp.uran.ru; ^и  <https://orcid.org/0000-0003-1381-0929>,  davidov@imp.uran.ru;
^и  <https://orcid.org/0009-0004-1243-6765>,  galikinz@outlook.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793

История статьи:

Поступила: 16 июля 2025

Рецензирование: 02 сентября 2025

Принята к печати: 15 ноября 2025

Доступно онлайн: 15 декабря 2025

Ключевые слова:

Испытание на образование наростов
 Ролик печной
 Морфология
 Химический и фазовый составы
 Покрытие

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН. Исследование выполнено с использованием оборудования ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

Благодарности

Авторы признательны Кочугову С.П., ООО «НПП «ТСП», за подготовку образцов.

АННОТАЦИЯ

Введение. В процессе рекристаллизационного отжига при производстве холоднокатаной электротехнической и автомобильной стали на поверхности печных роликов образуются наросты. Они являются причиной повреждений поверхностного слоя обрабатываемой стальной ленты в виде вмятин. **Предметом исследований** была оценка этого дефекта. **Методы.** Разработана лабораторная методика оценки склонности к образованию наростов на печных роликах. Она имитирует контактное взаимодействие между печным роликом и прокатываемой лентой в реальных условиях рекристаллизационного отжига, включая приложенное давление в зоне контакта, температуру в диапазоне 700...900 °С, состав атмосферы в печи (H₂-N₂) и уровень влажности, возникающей вследствие наличия кислорода, адсорбированного на стальной ленте. Для оценки достоверности методики было проведено сравнение наростов с поверхности ролика после эксплуатации и наростов, образовавшихся в лабораторных условиях в зоне контакта стальных образцов из материалов ролика и ленты. Для анализа были использованы результаты, полученные с применением оптической микроскопии, рентгеноструктурного анализа и сканирующей электронной микроскопии. **Результаты и обсуждение.** Исследование показало, что разработанный метод приводит к образованию на поверхности пластин наростов, имеющих морфологию, химический и фазовый составы, аналогичные наблюдаемым на печных роликах. Сравнительная оценка склонности к образованию наростов на типовом материале печного ролика, стали ЭИ 283, и на покрытии NiCrAlY, полученном плазменным напылением, показала, что в первом случае темп образования наростов выше на порядок. Подтвержденная достоверность лабораторной методики позволяет использовать ее в оценке эффективности мер против образования наростов на печных роликах в условиях длительного высокотемпературного контакта.

Для цитирования: Разработка методики оценки склонности к образованию наростов на печных роликах / К.А. Берсенева, М.П. Пузанов, А.А. Чернов, Ю.С. Коробов, Л.С. Каренина, Ю.В. Худорожкова, А.В. Макаров, Д.И. Давыдов, Г.М. Кинжебаева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 4. – С. 309–324. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-309-324.

Введение

Для получения нужных эксплуатационных свойств стальной ленты в производстве электротехнической (трансформаторной) [1, 2] и автомобильной стали [3, 4] толщиной 0,3...1,0 мм после холодной прокатки производят рекри-

*Адрес для переписки

Берсенева Кирилл Александрович, аспирант, м.н.с.
 Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН,
 ул. С. Ковалевской, 18,
 620108, г. Екатеринбург, Россия
 Тел.: +7 982 326-70-30, e-mail: bersenev@imp.uran.ru

сталлизационный отжиг в печи при температуре 700...900 °С в восстановительных средах. При этом на поверхности печных роликов, по которым транспортируется лента, происходит образование наростов, а при последующем контакте стальной ленты с печным роликом эти наросты вызывают повреждения ее поверхностного слоя – образуются вмятины или частицы наростов переносятся на поверхность ленты в виде надавов. На ленте электротехнической стали также снижаются магнитные свойства листа из-за нарушения текстуры деформации (Госса) [1].

Вид дефектов в виде наростов на печных роликах и надавов на обрабатываемой ленте

показан на рис. 1. Наросты на печных роликах при транспортировке автомобильного листа (рис. 1, а [5]) и электротехнической стали (рис. 1, б, данные авторов) немного различаются по виду вследствие различий в химическом составе металла и условиях нагружения. Указанные наросты при контакте ролика с лентой вызывают образование на поверхности последней вмятин и надавов (рис. 1 [1]) из-за переноса частиц наростов. Результаты микрорентгеноспектрального анализа надавов на стальной ленте свидетельствуют о том, что их химический состав идентичен составу наростов на печных роликах [1].

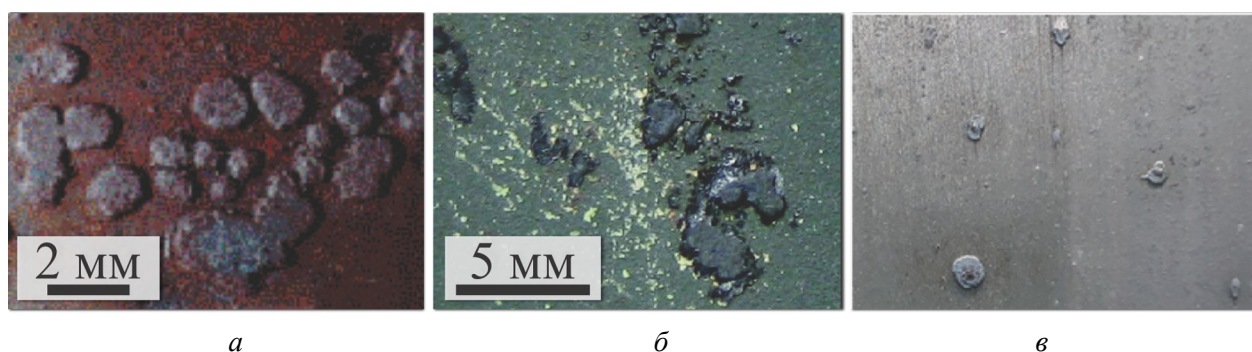


Рис. 1. Дефекты при рекристаллизационном отжиге, пояснения в тексте

Fig. 1. Defects resulting from recrystallization annealing (see explanations in the text)

Образование наростов на бочке печного ролика, контактирующей с полосой, происходит следующим образом. При нагреве до 500 °С в азотноводородных средах полосы из кремнистых сталей ее поверхность окисляется вследствие более высоких значений сродства к кислороду у кремния, железа и других легирующих элементов в сравнении с водородом. При окислении на поверхности полосы образуются оксиды железа, кремния и алюминия, которые формируют тонкую пленку на металле. Различное сродство к кислороду способствует различию в составе оксидной пленки по высоте. В начальном ее слое присутствуют преимущественно оксиды на основе кремния и марганца, а в верхних слоях увеличивается количество оксидов железа [6].

С ростом температуры сродство к кислороду у водорода и углерода растет, и после 650 °С отмечается процесс одновременного восстановления оксидов железа непосредственно из оксидной пленки (водородом) и под ней (диффундирующим углеродом на границе раздела

«металл – оксиды»). При этом ослабляется связь оксидной пленки с поверхностью отжигаемой полосы.

Доминирующую роль в отслоении оксидной пленки с поверхности стали играет кремний, поскольку образующийся фаялит (Fe_2SiO_4) образует эвтектику с вюститом (Fe_{1-x}O), плавящуюся при температуре всего 1177 °С. Оксиды Mn образуют твердые растворы смешения с основными компонентами окалина (вюстит, фаялит). Al вызывает образование тройной эвтектики FeAl_2O_4 - Fe_2SiO_4 - Fe_{1-x}O , у которой температура плавления еще ниже (1148 °С). В отслоившейся окалине могут присутствовать оксиды хрома, при этом кремний и хром не образуют смешанных оксидов, а располагаются рядом друг с другом [2].

После отслоения отдельные микрочастицы восстановленного железа вдавливаются в поверхность ролика. Процесс идет с нарастанием, и на бочке ролика из этих микрочастиц образуются наросты, высота которых достигает

2...3 мм. Типичный химический состав наростов (масс. %): 94,8–95,3 % Fe; 2,0–3,2 % Si; 0,3–0,4 % Mn; 0–0,3 % Al; структура не имеет признаков зеренного строения и близка к восстановленному железу с остатками закиси железа [1].

Линия непрерывного отжига работает при повышенных температурах, однако на поверхности стальных полос присутствует влага. Ее источниками могут быть загрязнения и вода, сконденсированная на металле до входа в печь отжига. Они образуют оксидные пленки на поверхностях. Источником влаги также могут быть газы, формирующие атмосферу печи (H_2 , N_2), при снижении их температуры ниже точки росы, когда влага из атмосферы конденсируется и образует капли или оксидные пленки на поверхностях. При заданном содержании водорода парциальное давление в атмосфере паров воды в соответствии со следующим уравнением [7]:

$$\lg P_{H_2O} = 9,8T_{DP} / (273,8 + T_{DP}) - 2,22,$$

где P_{H_2O} – парциальное давление водяных паров; T_{DP} – температура точки росы.

В свою очередь, термодинамическая стабильность оксидов, образующих наросты, является функцией парциального давления кислорода в атмосфере печи. Окислительный потенциал (P_{H_2O}/P_{H_2}) атмосферы печи представляет собой один из основных технологических параметров рекристаллизационного отжига.

Типичная температура точки росы составляет -30°C (380 ppm H_2O , или $P_{O_2} = 3,16 \cdot 10^{-22}$ атм) для промышленно используемой атмосферы отжига. Снижение точки росы до -58°C (14 ppm H_2O , или $P_{O_2} = 7,6 \cdot 10^{-25}$ атм) понижает движущую силу окисления в соответствии с диаграммой Ричардсона – Эллингема – Джефффаза [8]. Хотя условия отжига являются восстановительными для железа, но в зависимости от окислительного потенциала атмосферы может происходить селективное окисление легирующих элементов с высоким сродством к кислороду (Si, Mn и др.). Исследования различных классов сталей показало, что рост влажности поступающего газа, т. е. рост окислительного потенциала атмосферы печи отжига, ведет к увеличению величины оксидной пленки на поверхности

металла и к изменению ее структуры [3, 9, 10–12]. Таким образом, изменение влажности меняет темп увеличения размера наростов вследствие изменения окислительного потенциала в рабочей среде. В атмосфере печи содержание H_2O и H_2 контролируют стандартными печными устройствами, например термогигрометром, который определяет температуру и точку росы [13].

Помимо химических процессов на образование наростов на печном валке и вмятин на стальной полосе влияют также механические напряжения. Давление полосы на валок невелико и определяется массой полосы между двумя валками, расположенными последовательно в вертикальной плоскости агрегата вертикального отжига. Оценка показывает, что в случае полосы толщиной 0,7 мм и шириной 1000 мм при вертикальном расстоянии между осями последовательных роликов, равном 8000 мм, ее масса между роликами составит около 40 кг. При этих параметрах максимальное давление в зоне контакта между гладкой поверхностью валка и полосой при диаметре валка 600 мм составит 0,5 МПа, но на участках точечных контактов по наростам давление увеличивается на порядок и более. Кроме того, несоответствие линейных скоростей полосы и точек на поверхности роликов ускоряет рост наростов [14]. Однако в процессе производства несоответствие скоростей можно контролировать и поддерживать на уровне 0,3 %, при этом наросты на ролике образуются после нескольких месяцев непрерывной работы. Это дало основание заключить, что роль реакций между элементами значительно выше в сравнении с несоответствием линейных скоростей ролика и ленты [10].

Для снижения склонности к образованию наростов применяются различные методы: изменение химического состава стальной полосы и печного ролика [15], нанесение защитных покрытий [5, 14, 16], установка промежуточных углеродных втулок [13, 17]. Определение эффективности методов требует разработки способа оценки стойкости против образования наростов на поверхности металлических материалов.

Наиболее достоверная оценка, по результатам натурных испытаний роликов, отличается крайне высокими длительностью и затратами на проведение эксперимента, поскольку межремонтный цикл работы печи отжига составляет 4–9 месяцев [1].

Для снижения длительности испытаний был предложен способ оценки стойкости против образования наростов, в котором сэндвич-блок, скрепленный из двух металлических пластин и размещенной между ними стальной полосы, размещается в лабораторной печи при 800...950 °С с азотно-водородной атмосферой, в частности, состава (97 % N_2 + 3 % H_2). После этого воздействия на поверхности стальной полосы образуются наросты по описанному выше механизму. Материал металлической пластины выполняет роль ролика в печи отжига, а стальная полоса является аналогом прокатываемой ленты. После выдержки блока в лабораторной печи продолжительностью до 200 часов оценивают стойкость пластин против образования наростов по их количеству на единицу площади [6]. Хотя данный способ позволяет формировать наросты, но в нем не учитывается влажность атмосферы печи, а также нет возможности оценить такое изменение, что снижает достоверность результатов.

Целью исследования была разработка методики оценки склонности металлических поверхностей к образованию наростов при контакте в условиях повышенных температур в атмосфере H_2 - N_2 и влажности.

Методика исследований

Описание методики оценки формирования наростов

Для оценки стойкости печных роликов к типичным эксплуатационным дефектам, вызванным образованием наростов, использована разработанная методика, которая заключается в нагреве принудительно сжатого сэндвич-блока «пластина 1 – полоса 2 – пластина 1» (рис. 2). Блок подвергается одновременному воздействию дав-

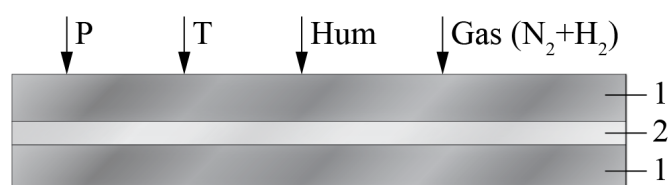


Рис. 2. Схема методики оценки стойкости печных роликов против образования наростов, пояснения в тексте

Fig. 2. Scheme of the method for assessing the resistance of furnace rolls to pickup formation (see explanations in the text)

ления (P), температуры (T), влажности окружающей среды (Hum) и газовой среды (H_2 - N_2). Материал пластин 1 – сталь ЭИ283, ГОСТ 5632–2014, применяемая для печного ролика; полоса 2 изготовлена из электротехнической стали Fe-3%Si, ГОСТ 21427.1–83, аналогичной прокатываемой ленте. Химический состав сталей представлен в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Стандартный химический состав сталей ЭИ283 и Fe-3%Si, масс. %
Standard chemical composition of steels EI283 and Fe-3 Si, wt. %

Элемент / Element	Сталь ЭИ283 / Steel EI283	Сталь Fe-3%Si / Steel Fe-3%Si
C	0,003...0,04	0,003...0,04
P	< 0,03	< 0,03
S	< 0,03	≤ 0,03
Si	2,9...3,5	2,9...3,5
Cr	22...25	≤ 0,3
Ni	17...20	≤ 0,3
Mn	< 2	–
Al	–	0,004...0,03
Cu	–	0,01...0,6
N	–	0,001...0,013
Ti	–	≤ 0,006
Fe	Осн.	Осн.

На рис. 3, а представлена схема лабораторной установки для формирования наростов. Сэндвич-блок состоит из двух металлических пластин 50×20×4 мм (1) и стальной полосы 50×20×0,7 мм (2), размещенной между ними. Блок установлен в кварцевой трубке (3), рабочей частью вставленной в муфельную печь (4) СУОЛ-0.4.4/12-M2-У4.2 (AB Umega, Литва), где поддерживается температура на уровне температуры отжига 850 ± 1 °С. При этом возможно достигать температуры до 1250 ± 1 °С. Кварцевая трубка герметично соединена с вакуумным насосом (5) для предварительной откачки воздуха из трубки и смесителем (6) для подачи из баллонов газовой смеси состава (95...97 N_2 +

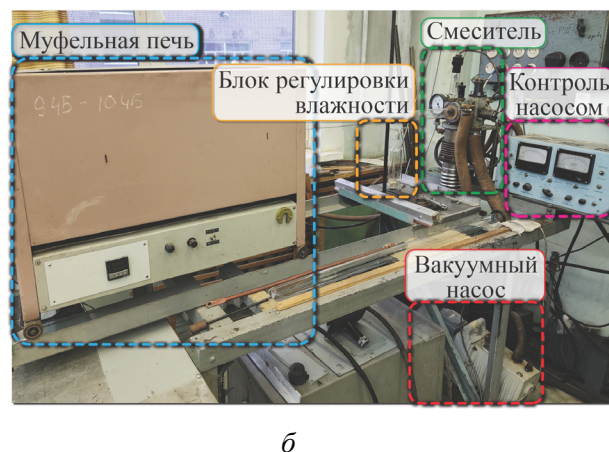
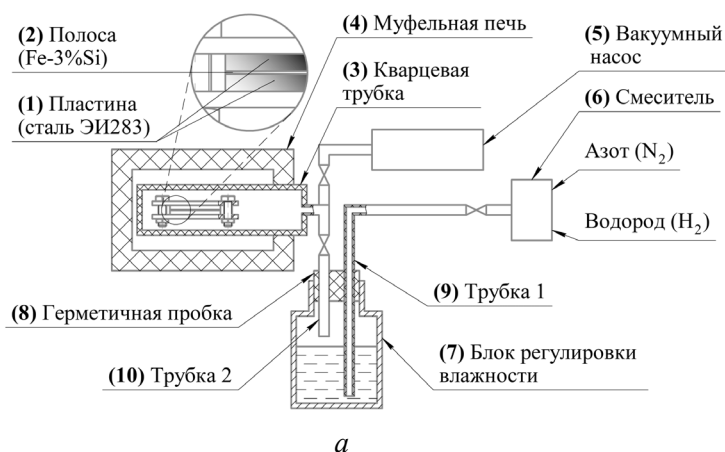


Рис. 3. Установка для оценки образования наростов:

a – схема; *б* – вид; пояснения в тексте

Fig. 3. Installation for assessing the pickup formation:

a – diagram; *б* – view (see explanations in the text)

+ 3...5 H₂), масс. %. Блок (7) отвечает за регулирование влажности поступающего газа. Это достигается путем пропускания газовой смеси через трубки (9) и (10), интегрированные в линию подачи газовой смеси. Трубки соединены с колбой с дистиллированной водой, которая герметично закрыта пробкой (8). Газовая смесь поступает в воду через трубку (9) и выходит через трубку (10) перед тем, как попасть в газовую линию, ведущую к кварцевой трубке (3). Поток газа в системе регулируется клапанами. Влажность паров газовой смеси измеряется на входе в трубку (10) с помощью гигрометра и коррелирует с точкой росы окружающей атмосферы. Эта корреляция позволяет сопоставить содержание водяного пара в объеме кварцевой трубки (3) с влажностью окружающей атмосферы. Управление температурой окружающей среды позволяет регулировать уровень влажности внутри кварцевой трубки. Такая регулировка условий испытаний дает возможность оценить влияние влажности на скорость окисления поверхности полосы. Поверхность полосы служит аналогом ленты в диапазоне фактической влажности в высокотемпературной зоне выдержки печи отжига.

Реализованная установка для оценки образования наростов (рис. 3, б) включает в себя следующие части: нагревательную (муфельную) печь, в которую вставлена кварцевая трубка с образцами; смеситель для подачи газовой смеси из баллонов; вакуумный насос для откачки воздуха из рабочей зоны (в кварцевой трубке) перед по-

дачей газовой смеси; блок управления вакуумным насосом с манометром; блок регулировки влажности входящего газа. Продолжительность непрерывных испытаний составила 96 часов, что примерно в 40 раз меньше, чем в натурных условиях.

Методика исследования наростов

В ходе лабораторного эксперимента была получена серия наростов, которые затем сравнивали с наростами, образовавшимися на печном ролике в ходе натурных испытаний. Микроструктуру и распределение химических элементов на исследуемых поверхностях анализировали методом растровой электронной микроскопии на сканирующем электронном микроскопе EVO 40 (Carl Zeiss, Германия) с ускоряющим напряжением 20 кВ на V-образном вольфрамовом катоде и на микроскопе TESCAN VEGA II XMU (Tescan, Brno-Kohoutovice, Чешская Республика) с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450 (Oxford Instruments, Великобритания). Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре Shimadzu XRD 7000 Maxima (Shimadzu Corporation, Япония) в сочетании с графитовым монохроматором в излучении CuK α . Спектр дифракции регистрировался в угловом диапазоне $2\theta = 10...80^\circ$ с шагом сканирования $\Delta\theta = 0,02^\circ$ и накоплением импульсов в течение 2 секунд. Для полнопрофильного анализа использовали базу данных PDF-4.

Результаты и их обсуждение

Наросты на печном ролике

На рис. 4, а изображена поверхность печного ролика с образовавшимися наростами после шести месяцев непрерывной работы. На рис. 5 и в табл. 2 представлена микроструктура поверх-

ности отдельного нароста и химический состав в виде спектров из исследованных областей А и Б, показанных на рис. 4, б–г. Размеры наростов, показанных на рис. 4, б, в среднем составляют 11×4 мм.

В химическом составе поверхности нароста (табл. 2) присутствуют металлы Cr, Al, Fe, Mn,

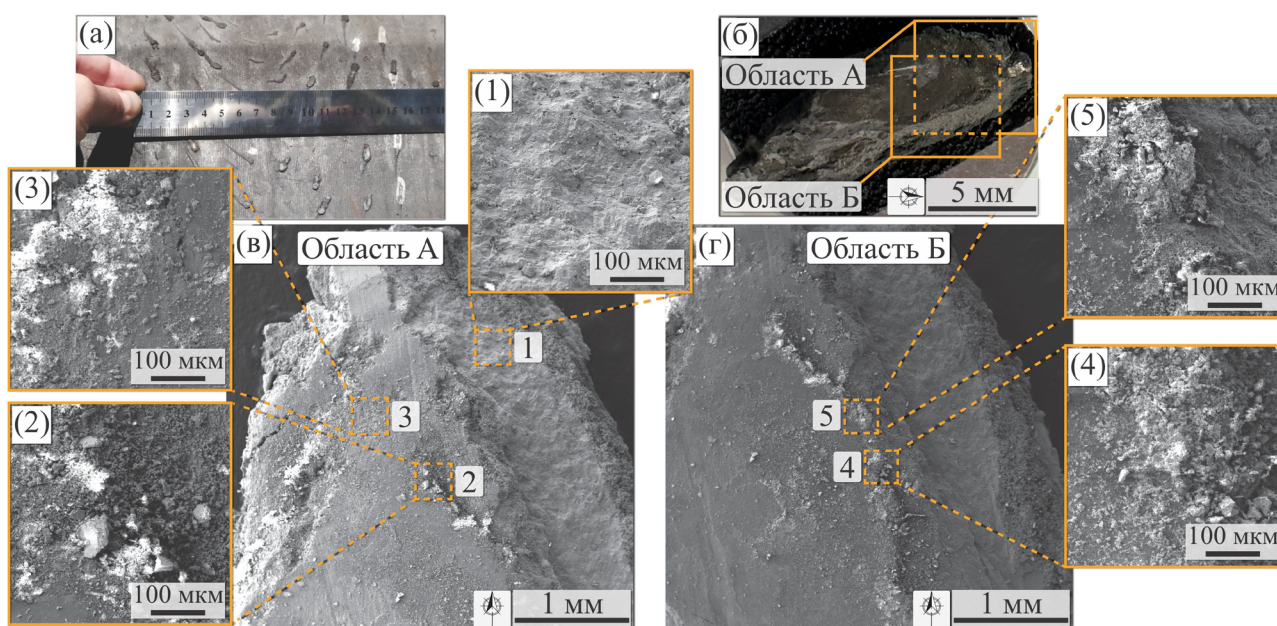


Рис. 4. Фотографии наростов на поверхности печного ролика (а) и одиночного нароста (б) с детализацией его участков (в, г); СЭМ-изображения зон А (1–3) и Б (4, 5)

Fig. 4. Photographs of pickups on the surface of the furnace roll (a) and a single pickup (б) with details of its sections (в, г); SEM images of zones “A” (1–3) and “B” (4, 5)

Таблица 2

Table 2

Химический состав поверхности наростов, участки 1–5 на рис. 4, в, г, масс. %

Chemical composition of the pickup surface, sections 1–5 in Fig. 4, в, г, wt. %

Спектр / Spectrum	O ($\delta < 1,24$ %)	Al	Cr	Ni	Fe	Mn	Si
1	22,66	0,27	–	–	74,61	2,23	0,24
2	20,62	1,46	1,4	–	71,84	1,79	2,89
3	24,73	1,8	2,44	0,17	64,47	2,54	3,84
4	21,07	1,68	1,46	0,17	70,5	2,42	2,71
5	22,36	1,44	1,03	0,14	70,19	2,01	2,82

Примечание. Точность микроспектрального анализа на данном приборе составляет ± 5 % от значения величины. Для соответствия суммарного содержания элементов 100 процентам приведены значения с большей точностью, что обусловлено алгоритмами, заложенными в программном обеспечении прибора.

Note. The accuracy of micro-elemental analysis with this instrument is $\pm 5\%$ of the measured value. To ensure the total elemental content sums to 100%, values are presented with higher precision, which is due to the algorithms embedded in the instrument's software.

Ni и Si, диффундирующие как из ленты, так и из ролика. Большое количество кислорода (20–25 масс. %) свидетельствует о наличии оксидов.

Рентгенофазовый анализ был проведен на образце, изображенном на рис. 4, б. Погрешность определения составляет 2 %, что объясняется погрешностью измерения интенсивности наложенных дифракционных линий. Данные представлены на рис. 5 и в табл. 3.

Большее количество Fe и меньшее количество других элементов, которые были выявлены с помощью рентгеноструктурного анализа в сравнении с химическим анализом, может быть связано с частичным растворением этих элементов в железе, в то время как положение пиков железа на дифрактограмме остается неизменным.

Лабораторно сформированные наросты

Анализ поверхности нароста

Визуальный осмотр образцов (рис. 6, а, б) показал, что наросты на пластине и надавы на полосе имели форму, сопоставимую с обра-

зованиями на реальном печном ролике и ленте трансформаторной стали, показанными на рис. 1. По краям пластины, где была приложена наименьшая сила прессования, наблюдаются темные области, соответствующие цвету металла, а вокруг наростов и надавов наблюдаются более светлые области.

Микроструктура поверхности образовавшихся наростов в зонах А и Б представлена на рис. 6, в, г. Соответствующий химический состав областей, согласно СЭМ-анализу, приведен в табл. 4. Эти области были детализированы на рисунке как «зона А» (участки 1, 2 на рис. 6, в) и «зона Б» (участки 3–10 на рис. 6, д), а также участок 11 на границе «нарост – зона без наростов» и участок 12, в котором наростов визуально не отмечено, рис. 6, г.

Содержание кислорода и металлов в поверхностном слое нароста на пластине (табл. 4) аналогично значениям, полученным для поверхности наростов на ролике по данным авторов (табл. 2). Наблюдаемое изменение количественного содер-

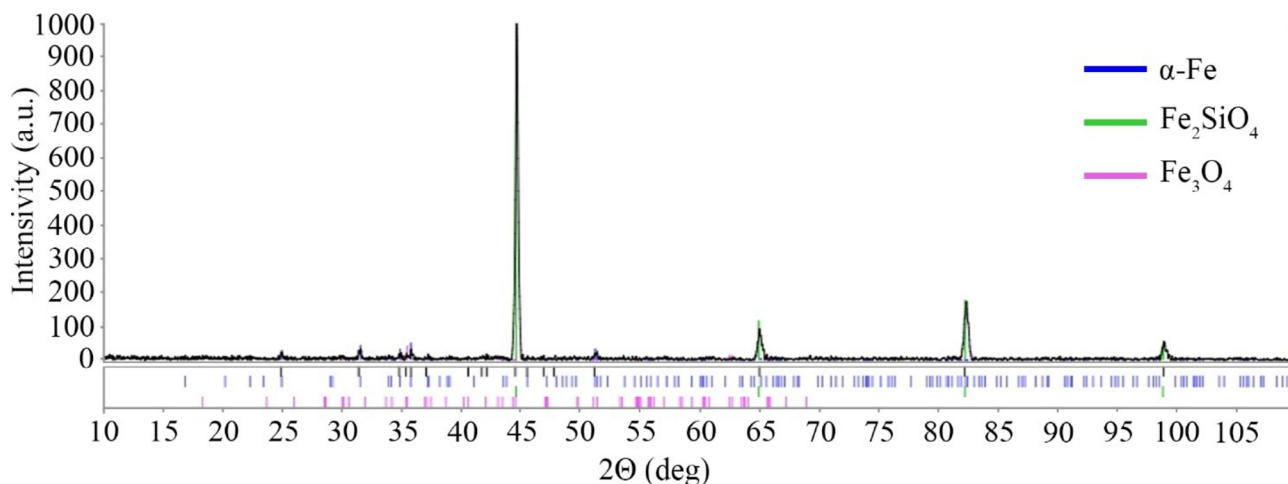


Рис. 5. Рентгеновские дифрактограммы нароста, снятого с ролика

Fig. 5. X-ray diffraction patterns of the pickup removed from the roll

Таблица 3

Table 3

Фазовый состав нароста, снятого с ролика, ат. %

Phase composition of the pickup removed from the roll, at. %

Фаза / Phase	PDF-4	ат. % / at. %
α -Fe (железо) / α -Fe (iron)	01-080-3816	89
Fe_2SiO_4 (фаялит) / Fe_2SiO_4 (fayalite)	01-079-1208	5
Fe_3O_4 (магнетит) / Fe_3O_4 (magnetite)	01-084-9337	4

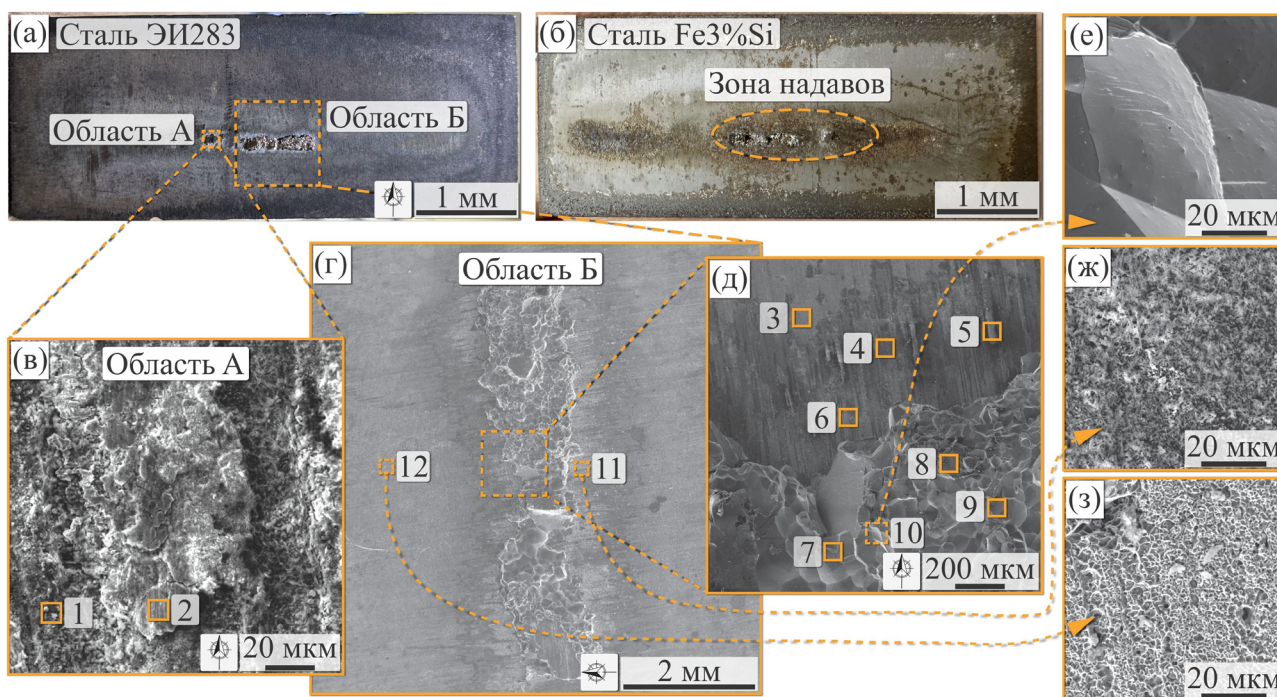


Рис. 6. Вид пластин с наростами (а) и полосы из трансформаторной стали (б) после испытаний по разработанной методике, 96 часов; изображения поверхности наростов зон А (в) и Б (г–з)

Fig. 6. View of plates with pickups (a) and strips of transformer steel (б) after testing according to the developed method, 96 hours; images of the surface of the pickups in zones “A” (в) and “Б” (г–з)

Таблица 4
Table 4

Химический состав участков поверхности пластины согласно рис. 6, а, масс. %
Chemical composition of the plate surface areas according to Fig. 6, a, wt. %

Спектр / Spectrum	O	Al	Cr	Ni	Fe	Mn	Si
1	3,25	–	4,26	–	87,78	0,96	3,76
2	24,74	0,24	31,3	1,39	25,01	10,72	6,61
3	25,99	0,12	47,69	0,89	6,73	18,27	0,31
4	19,23	0,48	27,95	3,44	30,26	16,22	2,43
5	30,32	0,46	21,89	–	2,47	35,3	9,55
6	5,52	1,51	2,85	1,44	82,66	0,47	5,55
7	7,83	–	–	–	89,2	0,55	2,43
8	2,01	–	–	–	94,22	0,4	3,38
9	1,01	–	–	–	97,46	0,44	1,1
10	0,74	0,08	0,06	0,05	95,37	0,43	3,26
11	23,38	–	43,49	0,69	6,29	25,32	0,83
12	2,67	1,69	3,45	1,5	86,36	1,2	3,14

жания железа (в диапазоне 2,47–97,46 %) может быть связано с вырывом внутреннего объема материала из полосы из-за сильного диффузионного схватывания. Высокое содержание кислорода

(до 30,32 масс. %) в химическом составе нароста (табл. 4) свидетельствует о наличии на его поверхности оксидов металлов, в основном Fe (82–98 масс. % в спектрах 1, 6–10, 12). Наличие

Al (до 1,69 масс. %), Ni (до 3,44 масс. %), Mn (до 35,3 масс. %) и Si (0,31–9,55 масс. %) свидетельствует о присутствии оксидов соответствующих элементов. Повышенную концентрацию Mn можно объяснить его высоким сродством к кислороду и переносом соответствующих атомов из материала печного валка на его поверхность в зоне контакта с трансформаторной сталью. При отжиге высокопрочных марганцовистых сталей присутствие оксидов Mn в наростах выражено сильнее в сравнении с электротехнической сталью, представленной в настоящем исследовании [6, 13]. В остальном данные сторонних исследователей по химическому составу наростов на роликах при отжиге аналогичны.

Анализ поперечного сечения нароста

Для нароста в зоне Б (рис. 6, а), был выполнен анализ поперечного сечения, общий вид которого представлен на рис. 7, а. СЭМ и элементное картирование были проведены для характер-

ных участков границы раздела «нарост – металл пластины»: в середине нароста (рис. 7, б, в) и на его крае (рис. 7, г–е). Химический состав поперечного сечения нароста на пластине, представленный после обработки спектров, приведен в табл. 5 для участков, расположенных в наросте (1), на границе раздела (2, 3) и в приповерхностном слое пластины (4).

Как видно из табл. 5, содержание кислорода на несколько порядков выше его предела растворимости в железе [18], поэтому он представлен в виде оксидов. При этом в сечении его меньше в 20–100 раз, чем на поверхности (табл. 4), что качественно подтверждается картированием характерных участков нароста (рис. 7).

Полученные данные аналогичны результатам химического анализа (табл. 2) и рентгенофазового анализа (рис. 5) поверхности нароста, снятого с ролика, а также данным сторонних исследований по содержанию элементов в объеме нароста при рекристаллизационном отжиге стали [1–3,

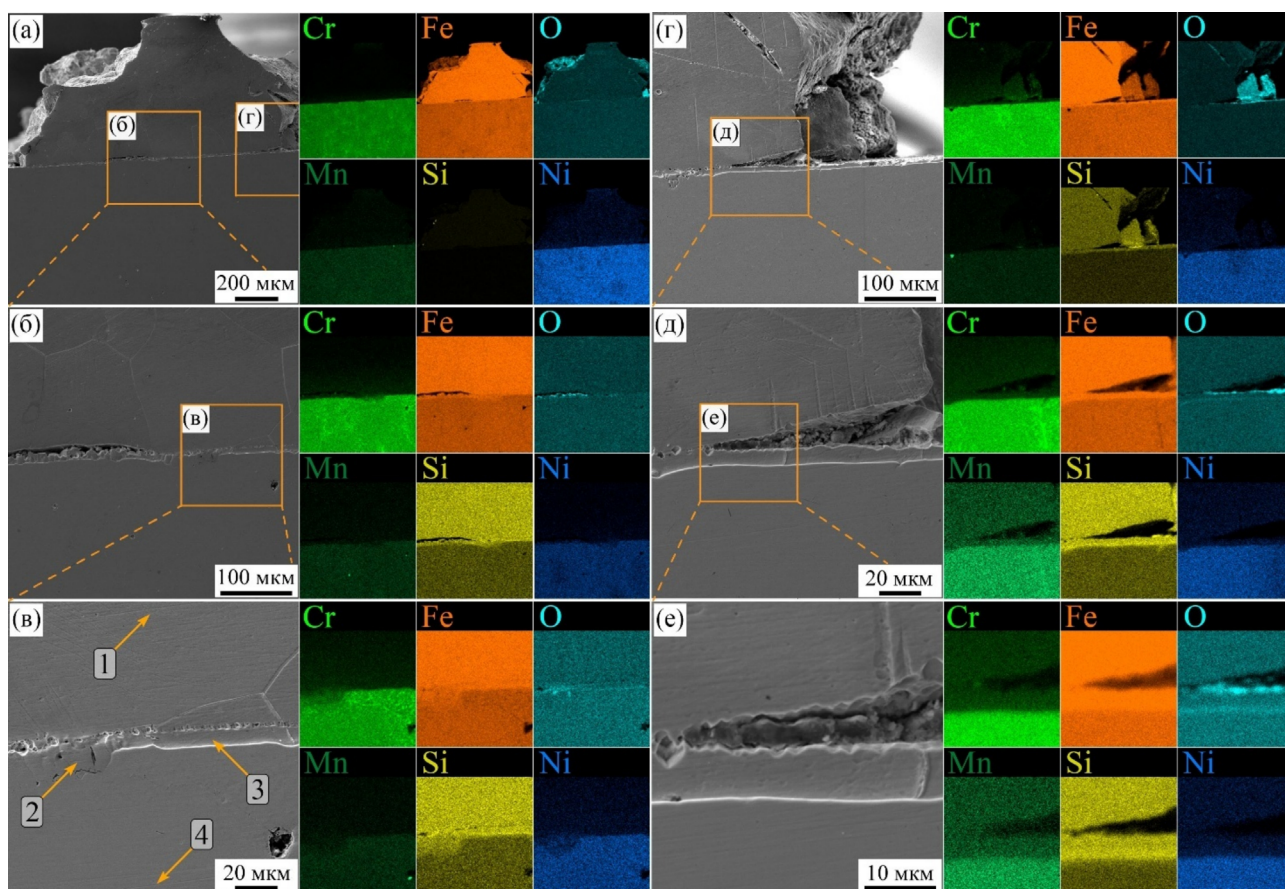


Рис. 7. СЭМ-изображения и элементное картирование (ЭДС) поперечного сечения пластины из стали ЭИ283 с наростом

Fig. 7. SEM images and elemental mapping (EDM) of the cross-section of the EI283 steel plate with the pickup

Таблица 5

Table 5

Химический состав участков поперечного сечения нароста на пластине, представленных на рис. 7, в, масс. %

Chemical composition of the cross-sectional areas of the pickups on the plate, shown in Fig. 7, в, wt. %

Спектр / Spectrum	O	Cr	Ni	Fe	Mn	Si
1	0,22	1,75	0,98	94,06	–	3,2
2	–	9,26	5,57	81,92	1,01	2,23
3	0,04	3,72	1,53	90,98	0,64	3,13
4	0,21	16,77	9,53	71,49	1,51	0,7

9, 13]. Это демонстрирует достоверность лабораторного метода, разработанного для оценки наростов на поверхности печных роликов.

Испытания пластин с покрытием на основе NiCrAlY

Одним из направлений снижения склонности к образованию наростов является нанесение газотермических покрытий на поверхность печных роликов. В частности, перспективно нанесение покрытий типа MCrAlY (M-Co, Ni), в которых при высоких температурах нагрева будет происходить образование защитных пленок на основе Al_2O_3 и Cr_2O_3 (механизм их образования рассмотрен в монографиях [19, 20]). Такие покрытия показали высокую стойкость в газовых средах Ar-20 % O_2 и Ar-4% H_2 -2% H_2O . Их применяют для повышения ресурса лопаток газовых турбин [21], технологических роликов в металлургии [5, 22], деталей трибосопряжений, эксплуатирующихся в условиях граничной смазки или сухого трения, при повышенных нагрузках и колебаниях температур (моторостроение, металлургическое оборудование, авиационная и космическая техника) [23].

В соответствии с методикой, изложенной выше, была проведена оценка склонности к образованию наростов на пластинах из стали AISI 310S (зарубежный аналог ЭИ283), на которые методом плазменного напыления наносили покрытия из порошков (NiCrAlY (70-20-9-0,38) + $n \cdot Y_2O_3$), где $n = 0, 5$ и 10 масс. % [24].

При визуальном осмотре после испытаний отмечена разница в состоянии поверхности пластин (рис. 8). На поверхности пластин с покрытиями следы схватывания с материалом ленты

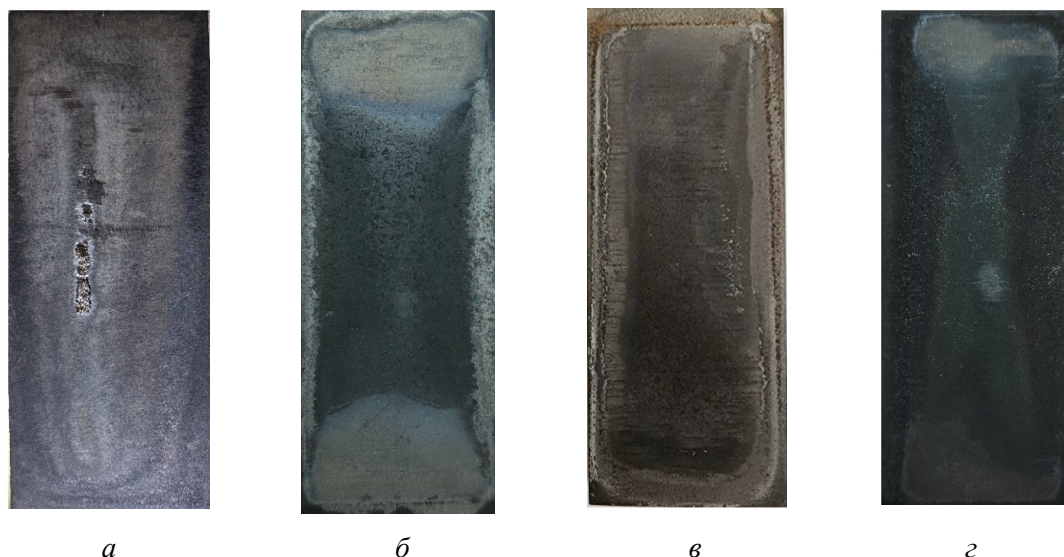
отсутствуют, в отличие от пластины из стали AISI 310S.

Дальнейшее исследование зон контакта включало в себя определение микротвердости, параметров шероховатости и топографии, а также микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) по поверхности и по характерным сечениям до и после испытаний.

Показано, в частности, что в сечениях покрытий NiCrAlY + (5...10 % Y_2O_3) после напыления сформировались шпинели (Al, Cr, Y)Ox с ростом доли Y примерно от 18 до 45 масс. % при увеличении содержания Y_2O_3 в исходном порошке (рис. 9). Исследование после испытаний показало недостаточное количество Fe и Si в зоне контакта для схватывания ленты из электротехнической стали с покрытием. Кроме того, установлено разнонаправленное влияние Y_2O_3 . С одной стороны, увеличение его содержания ведет к росту твердости, что благоприятно для повышения износостойкости покрытия. При износе оксиды внутри слоя также будут препятствовать налипанию. С другой стороны, добавление Y_2O_3 облегчает диффузию Si как со стороны ленты, так и со стороны основы, что повышает склонность к образованию наростов. Чтобы оценить, какой из этих процессов окажет преобладающее влияние на работоспособность покрытия, необходимо проведение натурных испытаний.

Заключение

Эксперимент показал, что разработанная методика, заключающаяся в принудительном создании давления на поверхности контакта стальных



а

б

в

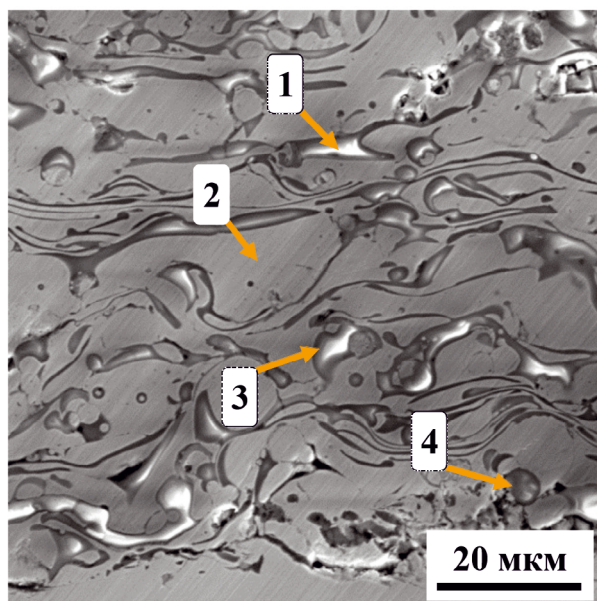
г

Рис. 8. Вид пластин с покрытием после испытаний:

а – без покрытия, б–г – с покрытием ($\text{NiCrAlY} + n \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$), $n = 0, 5, 10$ масс. %
для б, в, г соответственно

Fig. 8. A view of plates with NiCrAlY coating after testing:

а – without coating, б–г – with coating ($\text{NiCrAlY} + n \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$), $n = 0, 5, 10$ wt. % for б, в, г, respectively



Микрохимический анализ участков сечения покрытия

Элемент	1	2	3	4
O	33,84	–	15,13	27,08
Al	35,45	9,90	9,45	27,55
Cr	3,43	18,72	1963	13,38
Ni	3,71	71,38	55,79	18,93
Y	23,56	–	–	13,07

Рис. 9. Микроструктура поперечного шлифа напыленного покрытия ($\text{NiCrAlY} + 5 \% \text{Y}_2\text{O}_3$) с участками микроанализа

Fig. 9. Microstructure of a cross-section of a sprayed coating ($\text{NiCrAlY} + 5 \% \text{Y}_2\text{O}_3$) with microanalysis regions

образцов при длительном нагреве (850°C , 96 часов, в атмосфере ($95\ldots 97 \text{ N}_2 + 3\ldots 5 \text{ H}_2$) масс. % с контролируемой влажностью), приводит к образованию на поверхности пластин наростов, имеющих морфологию (форму и химический состав), аналогичную наблюдаемым при работе на печных роликах линий непрерывного от-

жига. Изучение микроструктуры, сканирующая электронная микроскопия и рентгеновская дифракция показали, что химический и фазовый составы наростов в лабораторных и натурных условиях были сопоставимы. Результаты исследования свидетельствуют о достоверности оценки образования наростов на поверхности

печных роликов по разработанному лабораторному методу.

Показано применение разработанной методики на примере оценки сравнительной склонности к образованию наростов на стали AISI 310S и на плазменных покрытиях на основе NiCrAlY с добавлением до 10 масс. % Y_2O_3 . Результаты свидетельствуют, что в лабораторных испытаниях возможно провести выбор материала покрытия, необходимого для повышения стойкости против образования наростов на металлической поверхности.

Список литературы

1. Миндлин Б.И., Настич В.П., Чеглов А.Э. Изотропная электротехническая сталь – М.: Интермет Инжиниринг, 2006. – 240 с. – ISBN 5-89594-130-3.
2. Scaling behaviour of Si-alloyed steel slabs under reheating conditions / G. Mikl, T. Höfler, C. Gierl-Mayer, H. Danning, B. Linder, G. Angeli // *Journal of Casting & Materials Engineering*. – 2021. – Vol. 5 (4). – P. 71–74. – DOI: 10.7494/jcme.2021.5.4.71.
3. Grabke H.J., Leroy V., Viehhaus H. Segregation on the surface of steels in heat treatment and oxidation // *ISIJ International*. – 1995. – Vol. 35 (2). – P. 95–113. – DOI: 10.2355/isijinternational.35.95.
4. Kuklik V., Kudlaček J. Hot-dip galvanizing of steel structures. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016. – 234 p. – ISBN 978-0-08-100753-2. – DOI: 10.1016/C2014-0-03512-5.
5. Fukubayashi H.H., Brennan M.S. Present furnace and pot roll coatings and future development // ITSC 2004 – Conference Proceedings, Osaka, Japan, May 2004. – ASM, 2004. – P. 125–131. – DOI: 10.31399/asm.cp.itsc2004p0125.
6. Huang T.S. Effect of Mn on the formation of oxide buildups upon HVOF-sprayed MCrAlY-ceramic-type cermet coatings // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2011. – Vol. 20 (3). – P. 447–455. – DOI: 10.1007/s11666-010-9531-y.
7. Effect of dew point on the formation of surface oxides of twinning-induced plasticity steel / Y. Kim, J. Lee, K.-S. Shin, S.-H. Jeon, K.-G. Chin // *Materials Characterization*. – 2014. – Vol. 89. – P. 138–145. – DOI: 10.1016/j.matchar.2014.01.012.
8. Деверо О.Ф. Проблемы металлургической термодинамики: пер. с англ. – М.: Металлургия, 1986. – 424 с.
9. Selective oxidation of ternary Fe-Mn-Si alloys during annealing process / X. Zhang, C. Corrêa da Silva, C. Liu, M. Prabhakar, M. Rohwerder // *Corrosion Science*. – 2020. – Vol. 174. – P. 108859. – DOI: 10.1016/j.corsci.2020.108859.
10. Zheng X., Kang Y., Zhou J. Influence of coating and dew point on hearth roll pickup // *Journal of Iron and Steel Research International*. – 2019. – Vol. 26 (6). – P. 647–652. – DOI: 10.1007/s42243-019-00231-z.
11. Changing oxide layer structures with respect to the dew point prior to hot-dip galvanizing of δ -TRIP steel / H. Wang, X. Jin, G. Hu, Y. He // *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – Vol. 337. – P. 260–269. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.12.046.
12. Effect of dew point on the selective oxidation of advanced high strength steels / M. Maderthaner, A. Jarosik, G. Angeli, R. Haubner // *Materials Science Forum*. – 2017. – Vol. 891. – P. 292–297. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.891.292.
13. Cause analysis on buildup formation of carbon sleeve in continuous annealing furnace for non-oriented silicon steel produced by CSP process / M. He, S. Peng, G. Xue, Y. Ouyang, J. Zhang, H. Chen, B. Liu // *Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2015*. – Cham: Springer International Publishing, 2016. – P. 587–593. – DOI: 10.1007/978-3-319-48191-3_73.
14. Applications and developments of thermal spray coatings for the Iron and Steel Industry / S. Singh, C.C. Berndt, R.K. Singh Raman, H. Singh, A.S.M. Ang // *Materials*. – 2023. – Vol. 16 (2). – P. 516. – DOI: 10.3390/ma16020516.
15. Сухов А.И., Коротченко А.В. Особенности производства электротехнических изотропных сталей с особо низкими удельными магнитными потерями // *Современные материалы, техника и технологии*. – 2019. – № 5 (26). – С. 172–180.
16. Midorikawa S., Yamada T., Nakazato K. Development of surface-modifying technologies by thermal spraying of process rolls in steel production process // *Kawasaki Steel Technical Report*. – 2001. – N 45. – P. 57–63. – URL: https://www.jfe-steel.co.jp/archives/en/ksc_giho/no.45/tobira057.html (accessed: 20.11.2025).
17. Effect of microstructure on resistance to buildups formation of carbon sleeves in continuous annealing furnace for silicon steel production / M. He, X. Wang, W. Zhou, X. Gong, J. Zhang, J. Xu // *Characterization of Minerals, Metals, and Materials*. – Springer, 2019. – P. 351–359. – (Minerals, Metals and Materials Series). – DOI: 10.1007/978-3-030-05749-7_35.
18. Turkdogan E.T. Fundamentals of steelmaking. – Maney Publishing, 2010. – 345 p. – ISBN 1906540977.
19. Superalloys II: High-temperature materials for aerospace and industrial power / ed. by C.T. Sims, N.S. Stoloff, W.C. Hagel. – New York: Wiley, 1987. – 640 p. – ISBN 0471011479.
20. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали: учебник для студентов вузов. – М.: Металлургия, 1985. – 408 с.
21. Dorfman M.R., Sporer D., Meyer P. Thermal spray technology growth in gas turbine applications //

ASM Handbook. Vol. 5A. Thermal Spray Technology. – ASM International, 2013. – P. 280–286. – DOI: 10.31399/asm.hb.v05a.a0005737.

22. *Matthews S., James B.* Review of thermal spray coating applications in the steel industry: Part 1 – Hardware in steel making to the continuous annealing process // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2010. – Vol. 19 (6). – P. 1267–1276. – DOI: 10.1007/s11666-010-9518-8.

23. Современное применение металлокерамических покрытий на основе систем металл-хром-

алюминий-иттрий (м-кролей) / Ф.И. Пантелеенко, В.А. Оковитый, О.Г. Девойно, А.С. Володько, В.А. Сидоров, В.В. Оковитый, В.М. Асташинский // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения*. – 2021. – № 3 (74). – С. 72–81.

24. Влияние Y_2O_3 на стойкость NiCrAlY плазменных покрытий против образования наростов на печных роликах / А.А. Чернов, К.А. Берсенева, М.П. Пузанов, Ю.С. Коробов, Л.С. Каренина, Ю.В. Худорожкова, А.В. Макаров, Д.И. Давыдов // *Сталь*. – 2025. – № 5. – С. 24–30.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Development of an assessment method for pickup formation on furnace rolls

Kirill Bersenev^{1, a, *}, Mikhail Puzanov^{2, b}, Aleksey Chernov^{1, c}, Yury Korobov^{1, d},
 Larisa Karenina^{2, e}, Yulia Khudorozhkova^{3, f}, Aleksey Makarov^{1, g},
 Denis Davydov^{1, h}, Galiya Kinzhebaeva^{1, i}

¹ M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, RAS (Ural Branch), 18 S. Kovalevskaya st., Ekaterinburg, 620108, Russian Federation

² NLMK Group, VIZ-Steel, 28 Kirova st., Ekaterinburg, 620108, Russian Federation

³ Institute of Engineering Science, RAS (Ural Branch), 34 Komsomolskaya st., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0009-0004-5505-3000>, bersenev@imp.uran.ru; ^b <https://orcid.org/0009-0009-9457-4008>, puzanov_mp@nlmk.com;
^c <https://orcid.org/0009-0006-3478-6277>, chernov_aa@imp.uran.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0003-0553-918X>, yukorobov@imp.uran.ru;
^e <https://orcid.org/0009-0001-5439-2711>, karenina_ls@nlmk.com; ^f <https://orcid.org/0000-0003-3832-1419>, khjv@mail.ru;
^g <https://orcid.org/0000-0002-2228-0643>, avm@imp.uran.ru; ^h <https://orcid.org/0000-0003-1381-0929>, davidov@imp.uran.ru;
ⁱ <https://orcid.org/0009-0004-1243-6765>, galikinz@outlook.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 16 July 2025

Revised: 02 September 2025

Accepted: 15 November 2025

Available online: 15 December 2025

Keywords:

Pickup formation test

Furnace roll

Morphology

Chemical composition and phase structure

Coating

Funding

The research was carried out using the equipment of the equipment of the Plastometriya shared research facilities at the Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme "Structure" No. 122021000033-2), and the state assignment of the Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (theme No. 124020600045-0).

Acknowledgements

The authors express their gratitude to S.P. Kochugov, NPP TSP LLC, for preparing the specimens.

ABSTRACT

Introduction. During the recrystallization annealing of cold-rolled electrical and automotive steels, the formation of pickups on the surface of furnace rolls presents a significant issue, as they lead to surface damage of the steel strip in the form of indentations. **The focus of the present study** is the evaluation of this defect. **Methods.** To this end, a laboratory-based methodology was developed to assess the tendency of furnace rolls to form pickups. The method replicates the contact interaction between the furnace roll and the steel strip under real annealing conditions, taking into account the applied contact pressure, a temperature range of 700–900 °C, the (H_2-N_2) furnace atmosphere, and a humidity level arising from the presence of oxygen adsorbed on the steel strip. To validate the method's reliability, a comparative analysis was conducted between pickups formed on the roll surface after industrial operation and those generated under laboratory conditions in the contact zone between steel samples made of roll and strip materials. The analysis employed optical microscopy, X-ray diffraction, and scanning electron microscopy. **Results and discussion.** The study confirmed that the developed methodology produces pickups on the specimen surfaces with morphology, chemical composition, and phase structure closely resembling those observed on the furnace rolls. A comparative assessment of the pickup formation rate between a typical furnace roll material (*EI 283* steel) and a *NiCrAlY* coating applied by plasma spraying revealed that the pickup formation rate for the *EI 283* steel was an order of magnitude higher. The validated methodology can thus be used to evaluate the effectiveness of strategies aimed at mitigating pickup formation on furnace rolls under long-term high-temperature contact conditions.

For citation: Bersenev K.A., Puzanov M.P., Chernov A.A., Korobov Y.S., Karenina L.S., Khudorozhkova Y.V., Makarov A.V., Davydov D.I., Kinzhebaeva G.M. Development of an assessment method for pickup formation on furnace rolls. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 4, pp. 309–324. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-309-324. (In Russian).

* Corresponding author

Bersenev Kirill A., Post-graduate Student, Research assistant
 M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, RAS (Ural Branch),
 18, S. Kovalevskaya st.,
 620108, Ekaterinburg, Russian Federation
 Tel.: +7 982 326-70-30, e-mail: bersenev@imp.uran.ru



References

1. Mindlin B.I., Nastich V.P., Cheglov A.E. *Izotropnaya elektrotekhnicheskaya stal'* [Isotropic electrical steel]. Moscow, Intermet Inzhiniring Publ., 2006. 240 p. ISBN 5-89594-130-3.
2. Mikl G., Höfler T., Gierl-Mayer C., Danninger H., Linder B., Angeli G. Scaling behaviour of Si-alloyed steel slabs under reheating. *Conditions Journal of Casting & Materials Engineering*, 2021, vol. 5 (4), pp. 71–74. DOI: 10.7494/jcme.2021.5.4.71.
3. Grabke H.J., Leroy V., Viehhaus H. Segregation on the surface of steels in heat treatment and oxidation. *ISI International*, 1995, vol. 35 (2), pp. 95–113. DOI: 10.2355/isijinternational.35.95.
4. Kuklik V., Kudláček J. *Hot-dip galvanizing of steel structures*. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2016. 234 p. ISBN 9780081007532. DOI: 10.1016/C2014-0-03512-5.
5. Fukubayashi H.H., Brennan M.S. Present furnace and pot roll coatings and future development. *ITSC 2004 – Conference Proceedings*, Osaka, Japan, May 2004. ASM, 2004, pp. 125–131. DOI: 10.31399/asm.cp.itsc2004p0125.
6. Huang T.S. Effect of Mn on the formation of oxide buildups upon HVOF-sprayed MCrAlY-ceramic-type cermet coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, vol. 20 (3), pp. 447–455. DOI: 10.1007/s11666-010-9531-y.
7. Kim Y., Lee J., Shin K., Jeon S., Chin K. Effect of dew point on the formation of surface oxides of twinning-induced plasticity steel. *Materials Characterization*, 2014, vol. 89, pp. 138–145. DOI: 10.1016/j.matchar.2014.01.012.
8. Devereux O.F. *Problemy metallurgicheskoi termodinamiki* [Topics in metallurgical thermodynamics]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 424 p. (In Russian).
9. Zhang X., Corrêa da Silva C., Liu C., Prabhakar M., Rohwerder M. Selective oxidation of ternary Fe-Mn-Si alloys during annealing process. *Corrosion Science*, 2020, vol. 174, p. 108859. DOI: 10.1016/j.corsci.2020.108859.
10. Zheng X., Kang Y., Zhou J. Influence of coating and dew point on hearth roll pickup. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2019, vol. 26 (6), pp. 647–652. DOI: 10.1007/s42243-019-00231-z.
11. Wang H., Jin X., Hu G., He Y. Changing oxide layer structures with respect to the dew point prior to hot-dip galvanizing of δ -TRIP steel. *Surface and Coatings Technology*, 2018, vol. 337, pp. 260–269. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.12.046.
12. Maderthaner M., Jarosik A., Angeli G., Haubner R. Effect of dew point on the selective oxidation of advanced high strength steels. *Materials Science Forum*, 2017, vol. 891, pp. 292–297. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.891.292.
13. He M., Peng S., Xue G., Ouyang Y., Zhang J., Chen H., Liu B. Cause analysis on buildup formation of carbon sleeve in continuous annealing furnace for non-oriented silicon steel produced by CSP process. *Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2015*. Cham, Springer International Publishing, 2016, pp. 587–593. DOI: 10.1007/978-3-319-48191-3_73.
14. Singh S., Berndt C.C., Singh Raman R.K., Singh H., Ang A.S.M. Applications and developments of thermal spray coatings for the Iron and Steel Industry. *Materials*, 2023, vol. 16 (2), p. 516. DOI: 10.3390/ma16020516.
15. Sukhov A.I., Korotchenkova A.V. Osobennosti proizvodstva elektrotekhnicheskikh izotropnykh stalei s osobo nizkimi udel'nymi magnitnymi poteryami [Features of the production of isotropic electrical steel with very low specific magnetic losses]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*, 2019, no. 4 (26), pp. 172–180. (In Russian).
16. Midorikawa S., Yamada T., Nakazato K. Development of surface-modifying technologies by thermal spraying of process rolls in steel production process. *Kawasaki Steel Technical Report*, 2001, no. 45, pp. 57–63. Available at: https://www.jfe-steel.co.jp/archives/en/ksc_giho/no.45/tobira057.html (accessed 20.11.2025).
17. He M., Wang X., Zhou W., Gong X., Zhang J., Xu J. Effect of microstructure on resistance to buildups formation of carbon sleeves in continuous annealing furnace for silicon steel production. *Characterization of Minerals, Metals, and Materials. Minerals, Metals and Materials Series*. Springer, 2019, pp. 351–359. DOI: 10.1007/978-3-030-05749-7_35.
18. Turkdogan E.T. *Fundamentals of steelmaking*. Maney Publishing, 2010. 345 p. ISBN 1906540977.
19. Sims C.T., Stoloff N.S., Hagel W.C., eds. *Superalloys II: High-temperature materials for aerospace and industrial power*. New York, Wiley, 1987. 640 p. ISBN 0471011479.
20. Gol'dshtein M.I., Grachev S.V., Veksler Yu.G. *Spetsial'nye stali* [Special steels]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 408 p.
21. Dorfman M.R., Sporer D., Meyer P. Thermal spray technology growth in gas turbine applications. *ASM Handbook. Vol. 5A. Thermal Spray Technology*. ASM International, 2013, pp. 280–286. DOI: 10.31399/asm.hb.v05a.a0005737.

22. Matthews S., James B. Review of thermal spray coating applications in the steel industry: Part 1 – Hardware in steel making to the continuous annealing process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2010, vol. 19 (6), pp. 1267–276. DOI: 10.1007/s11666-010-9518-8.

23. Panteleenko F.I., Okovity V.A., Devoino O.G., Volodko A.S., Sidorov V.A., Okovity V.V., Astashinskii V.M. Sovremennoe primeneniye metallokeramicheskikh pokrytii na osnove sistem metall-khrom-alyuminii-itruii [Modern application of cermet coatings based on metal-chromium-aluminum-yttrium systems]. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya = Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering*, 2021, no. 3 (74), pp. 72–81.

24. Chernov A.A., Bersenev K.A., Puzanov M.P., Korobov Yu.S., Karenina L.S., Khudorozhkova Yu.V., Makarov A.V., Davydov D.I. Vliyanie Y_2O_3 na stoikost' NiCrAlY plazmennyykh pokrytii protiv obrazovaniya narostov na pechnykh rolikakh [The influence of Y_2O_3 on the durability of NiCrAlY plasma coatings against the formation of deposits on furnace rollers]. *Stal' = Steel in Translation*, 2025, no. 5, pp. 24–30. (In Russian).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).