



УДК 621.793.5:620.191

DOI 10.17073/0368-0797-2024-1-89-105



Оригинальная статья

Original article

## ИЗУЧЕНИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АГРЕГАТОВ НЕПРЕРЫВНОГО ГОРЯЧЕГО ОЦИНКОВАНИЯ, СВЯЗАННЫХ С ДЕФЕКТАМИ ПРОДУКЦИИ

М. Ю. Рябчиков<sup>✉</sup>, Е. С. Рябчикова, В. С. Новак, А. Е. Клименко

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (Россия, 455000, Челябинская обл., Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

✉ [mr\\_mgn@mail.ru](mailto:mr_mgn@mail.ru)

**Аннотация.** Целями работы являлись поиск и систематизация ограничений скорости движения стальной полосы при горячем оцинковании, связанных с угрозой возникновения дефектов продукции. Поскольку скорость может оказывать совместное влияние с множеством других факторов, в работе проведен обзор известных причин возникновения распространенных дефектов. Выполнена группировка причин с учетом операций секций агрегатов непрерывного горячего оцинкования. Для определения обстоятельств возникновения дефектов применен способ, предполагающий поэтапную стратификацию ретроспективных данных и сопоставление плотности распределения влияющих факторов для дефектной и не дефектной продукции. Проведен анализ данных о дефектах на заводе «ММК Metallurgy» в Турции, полученных в 2020 – 2021 гг. Для анализа были отобраны допустимые и не допустимые дефекты двадцати одного вида, возникающие при оцинковании стали DX51D. В качестве факторов приняты двадцать два технологических параметра, включая скорость движения полосы. Для каждого отобранного вида дефектов определен набор влияющих факторов, для некоторых из них указаны предполагаемые причины их возникновения. Показано, что наблюдаемая для многих видов дефектов связь со скоростью движения полосы в действительности может быть вызвана иными факторами. Определены виды дефектов, вероятность возникновения которых увеличивается с ростом скорости или уровнем ее изменения. Предложены мероприятия, направленные на предотвращение роста доли продукции с дефектами при увеличении производительности.

**Ключевые слова:** непрерывное горячее оцинкование, стальная полоса, дефекты, скорость движения полосы, производительность

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10058, <https://rscf.ru/project/23-29-10058/>.

**Для цитирования:** Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Новак В.С., Клименко А.Е. Изучение ограничений производительности агрегатов непрерывного горячего оцинкования, связанных с дефектами продукции. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2024;67(1):89–105. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-1-89-105>

## INVESTIGATION OF PERFORMANCE LIMITATIONS IN CONTINUOUS HOT-DIP GALVANIZING UNITS ASSOCIATED WITH PRODUCT DEFECTS

M. Yu. Ryabchikov<sup>✉</sup>, E. S. Ryabchikova, V. S. Novak, A. E. Klimenko

✉ [mr\\_mgn@mail.ru](mailto:mr_mgn@mail.ru)

**Abstract.** The goals of the work were to search and systematize the speed limits of the steel strip during hot-dip galvanizing, associated with the threat of product defects. Since speed can be combined with many other factors, this paper provides an overview of the known causes of common defects. The causes were grouped taking into account the operations of individual sections of continuous hot-dip galvanizing units. To determine the circumstances in which defects occur, a method was used that involved step-by-step stratification of retrospective data and comparison of the distribution density of influencing factors for defective and non-defective products. The method was applied in the analysis of the data on defects at the MMK Metallurgy plant in Turkey, obtained in 2020–2021. Twenty-one types of acceptable and unacceptable defects that occur during galvanizing of DX51D steel were selected for analysis. Twenty-two technological parameters were taken as factors, including the strip speed. For each selected type of the defects, a set of influencing factors is determined, and for some types of defects, the alleged causes of their occurrence are indicated. It is shown that the relationship

observed for many types of defects with the strip speed can actually be caused by other factors. We determined the types of defects, the probability of which increases with an increase in the speed or the level of its change. The paper proposes measures aimed at preventing the increase in the proportion of defective products along with the performance gain.

**Keywords:** continuous hot-dip galvanizing, steel strip, defects, strip speed, performance

**Acknowledgements:** The work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-29-10058, <https://rscf.ru/project/23-29-10058/>.

**For citation:** Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S., Novak V.S., Klimenko A.E. Investigation of performance limitations in continuous hot-dip galvanizing units associated with product defects. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(1):89–105.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-1-89-105>

## ВВЕДЕНИЕ

Оцинкованный листовой прокат является одним из основных видов продукции металлургических предприятий. Объемы производства продукции на агрегатах непрерывного горячего оцинкования (АНГЦ) существенно выросли за последние десятилетия. Согласно работе [1], доля оцинкованного проката в структуре мирового потребления металлопродукции составляет порядка 10 %. В развитых странах эта доля достигает 15 % и более. Основными потребителями являются автомобильная и строительная промышленность [2].

Производительность АНГЦ определяется скоростью движения полосы и простоями. Выбор скорости предполагает учет специфики систем автоматического управления операциями на разных стадиях технологического процесса. Так, например, приближение расхода топлива к предельному (исходя из мощности горелок) уровню в отделении термической обработки полосы может затруднить решение задач регулирования [3].

Значимость человеческого фактора в выборе скорости движения полосы демонстрирует отчет о результатах исследования [4]. Показано, что разные бригады могут выбирать различную скорость движения полосы и вести процесс с разным разбросом значений используемой скорости. Это приводит к значительным изменениям производительности АНГЦ. Авторами предложена система-советчик, которая позволяет распространить опыт более эффективной бригады на другие бригады. При этом влияние бригады на качество продукции не оценивалось. В работе [5] отмечается, что сложности эксплуатации и технологические ограничения непрерывного отжига приводят к существенной роли человеческого фактора, что, в свою очередь, часто ведет к неэффективности операций в плане производительности. В то же время существуют ограничения на скорость линии, связанные с качеством продукции, которые плохо систематизированы и обычно выявляются опытным путем.

## ТИПОВЫЕ ПРИЧИНЫ СНИЖЕНИЯ СКОРОСТИ ЛИНИИ

Как правило, оборудование рассчитано на определенную максимальную скорость линии, которая может быть снижена в течение коротких или продолжительных интервалов времени. Краткосрочные снижения связаны с использованием скорости в качестве управ-

ляющего воздействия. Так, в работе [6] предлагается использовать скорость линии как управляющее воздействие для быстрой коррекции температуры полосы при возмущениях, связанных с изменением сортамента и при изменении требований к температуре отжига.

Снижение скорости в долгосрочной перспективе может быть связано с ограничением мощности систем нагрева и охлаждения секций термической обработки полосы. Так, например, инструкции завода «ММК Metallurgy» содержат рекомендации по скорости линии в зависимости от толщины, ширины и требуемых температур полосы на выходе секций прямого нагрева  $t_H$ , косвенного нагрева  $t_B$  и охлаждения  $t_{Oxл}$  (рис. 1). Из рис. 1 следует, что при толщине более 1 мм рекомендуемая скорость значительно ниже предельной 180 м/мин.

Совершенствование управления непрерывным отжигом позволяет увеличить скорость линии. Однако этому может препятствовать возникновение дефектов по причинам, не связанным с нарушением требований к отжигу.

## КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ НА ЗАВОДЕ «ММК METALLURGY»

ГОСТ 14918–2020 (основан на ISO 3575:2016 и других стандартах) указывает на допустимость ряда дефек-

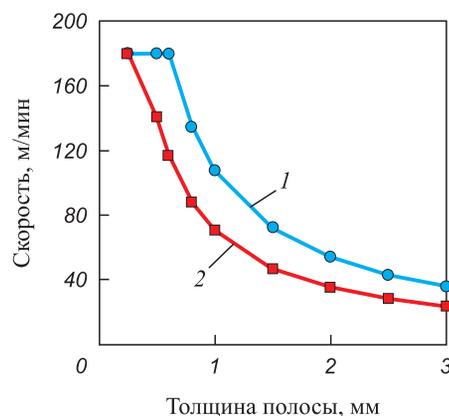


Рис. 1. Рекомендуемые скорости в зависимости от режима термической обработки:

1 – тип CQ ( $t_H = 720$  °C,  $t_B = 750$  °C,  $t_{Oxл} = 460$  °C);  
 2 – тип EDDQ ( $t_H = 750$  °C,  $t_B = 850$  °C,  $t_{Oxл} = 460$  °C)

Fig. 1. Recommended speeds depending on heat treatment mode:

1 – CQ type ( $t_{heat} = 720$  °C,  $t_{hold} = 750$  °C,  $t_{cool} = 460$  °C);  
 2 – EDDQ type ( $t_{heat} = 750$  °C,  $t_{hold} = 850$  °C,  $t_{cool} = 460$  °C)

тов в зависимости от типа, вида и группы отделки покрытия. К общим допускаемым дефектам относятся:

- следы от перегибов полосы и роликов;
  - царапины, потертости, не нарушающие сплошность покрытия;
  - светлые и матовые пятна;
  - неравномерность окраски пассивной пленки.
- Для некоторых типов и видов покрытия допустимы:
- наплывы, натеки, наслоения без растрескивания;
  - местная шероховатость покрытия (сыпь);
  - крупинки;
  - неравномерность кристаллизации покрытия;
  - темные точки и дорожки (полосы).

Не допускаются нарушения сплошности покрытия в виде растрескивания на мелких наплывах, расположенных на дефектах стальной основы. Указаны недопустимые дефекты кромок и заданы ограничения по массе покрытия.

В табл. 1 приведены виды дефектов по данным «ММК Metallurgy» за 2020 – 2021 гг., вероятность появления которых у бракованной продукции ( $P_{\text{деф}}$ ) существенно выше, чем у качественной ( $P_{\text{норм}}$ ). Наиболее распространенными дефектами брака являются пятна без покрытия (непроцинковка и отслоение) и неравномерность покрытия. Распространенные дефекты качественной продукции представлены в табл. 2.

**ИЗВЕСТНЫЕ ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЕФЕКТОВ**

Причины дефектов могут быть обусловлены технологическим процессом АНГЦ, а также свойствами исходной стальной полосы, которая подвергается оцинкованию.

**Влияние свойств исходной стальной полосы.**

Свойства стальной основы подразделяются на:

- структуру стали;

**Таблица 1. Распространенные дефекты отбракованной продукции**

**Table 1. Common defects in rejected products**

Номер	Обозначение (англ. / тур.)	Дефект	$P_{\text{норм}}, \%$	$P_{\text{деф}}, \%$
D1	Uncoated Spots / Kaplama Almama	Пятна без покрытия	0,46	25,90
D2	Rough Coating / Pas Kaynakli Puruzlu Kaplama	Неравномерность покрытия	0,12	22,29
D3	Damage Marks / Markalama Izi (Darbe Izi)	Следы ударов (надав)	0,29	8,40
D4	Dent / Batik (Batma Boslugu)	Вмятины (отпечатки)	0,31	4,88
D5	Edge Roughness / Kenar Puruzlulugu	Неровности кромки	1,06	2,71
D6	Coating Thickness Defect / Kaplama Uygunsuzlugu	Дефект толщины покрытия	0,58	1,63
D7	Macro Inclusion / Makro Inkluzyon	Макровключения	0,36	1,08
D8	Unappropriate Mechanical Test / Mekanik Test Uygunsuzlugu	Нарушение механических свойств	0,10	1,08

\* При расчете вероятности исключили случаи при останове / запуске агрегата.

**Таблица 2. Распространенные дефекты качественной продукции**

**Table 2. Common acceptable defects**

Номер	Обозначение (англ. / тур.)	Дефект	$P_{\text{норм}}, \%$	$P_{\text{деф}}, \%$
D9	Ridge / Ridge	Наплывы цинка	55,61	8,94
D10	Rough Coating / Puruzlu Kaplama	Шероховатость покрытия	52,98	13,55
D11	Snout Marks / Surtunme Izi	Потертость	49,21	6,23
D12	Sink Roll Marks / Sink Roll Merdane Izi	Следы ролика	16,98	2,98
D13	Ocean Wave (Coating ripple) / Yuzey Akintisi (Dalgali Kaplama)	Волнообразное покрытие	16,79	16,26
D14	Skin pass mill break-marks / SPM Kirigi	Отметины, связанные с дрессировкой	11,05	1,63
D15	Roll Shadow / Merdane Golgesi	Темные полосы по длине полосы	5,07	0,27
D16	Chromate Stain / Kromat Lekesi	Хромовые пятна	4,45	4,34
D17	Matt Appearance / Mat Goruntu	Матовый вид	4,39	4,34
D18	Scratch / Cizik	Царапины	2,73	4,07
D19	Orange Peel / Portakal Kabugu Olusumu	Микрошероховатость (апельсиновая корка)	2,05	0,54
D20	Break Mark / Kirilma Izi	Трещины в покрытии	1,67	0,54
D21	Blister / Blister	Пузыри на покрытии	0,79	0

- химический состав стали;
- механические свойства;
- свойства поверхности, включая наличие загрязнений [7; 8].

Авторы работы [9] указывают, что химический состав стали (особенно содержание кремния) оказывает существенное влияние на формирование цинкового покрытия. При содержании кремния 0,06 – 0,10 % наблюдается аномальный рост толщины цинкового покрытия. Покрытие может быть рыхлым и иметь нетоварный серый цвет. В то же время для многих марок сталей допуски по содержанию кремния достаточно велики.

Согласно работе [10], причиной штриховых следов на покрытии являются особенности стальной основы. На поверхности образуются мелкие зерна феррита диаметром примерно 1 – 2 мм. Химический анализ показал пики Ti и Mn в области мелких зерен и наличие тонких (до 150 нм) оксидов Mn и Si на границе раздела покрытие/основа.

Высокое содержание фосфора в стали (более 0,03 %) вызывает отслаивание покрытия.

Согласно работе [11], дефекты формы холоднокатаного подката приводят к дефектам покрытия вследствие нетипичного воздействия газовых ножей на подобные области поверхности полосы. К таким дефектам относят: неплоскость, складки, корбоватость, волнистость, рванины.

В работе [8] указано, что при наличии на поверхности царапин, выбоин или иных механических повреждений активность стали значительно возрастает. Возникают очаги интенсивного роста кристаллов Zn–Fe в покрытии. Это приводит к появлению областей с более толстым покрытием. Согласно данным работы [12], при оцинковании изначально неровных поверхностей возможно получение неравномерного покрытия. В таких случаях его следует наносить толстым слоем. При этом повышенная температура цинка или продолжительность пребывания в цинковой ванне могут привести к тому, что избежать дефекта не удастся.

В работах [13 – 15], посвященных освоению автолитовых сталей, отмечается, что в современных условиях требуется обеспечение комплекса трудно сочетаемых требований (прочность, пластичность, штампуемость, коррозионная стойкость и др.). Указывается, что достижение высоких показателей прочности стали затруднительно без учета кинетических особенностей протекающих фазовых и структурных превращений. Так, согласно работе [13], повышенное содержание Cr, Ni и Cu смещает рекристаллизацию к более высоким температурам. Рекомендуется повышение на 30 – 50 °C температуры выдержки при отжиге.

Причины дефектов, обусловленные технологическим процессом АНГЦ, сгруппированы с учетом секций, операции которых привели к дефектам.

**Секция очистки.** В технологической части АНГЦ полоса проходит ванну с щелочным раствором, подвергается воздействию вращающихся роликовых щеток и проходит электролитическую очистку.

Поверхностные загрязнения полосы состоят в основном из железной мелочи, масла и грязи. Согласно работе [8], целью очистки является снижение до уровня 20 мг/м<sup>2</sup> железной мелочи и масла на поверхности полосы. Перенос мелких частиц в ванну может вызвать образование дросса, налипания и непокрытых участков из-за недостаточной смачиваемости цинком.

Авторы работы [10] рассматривают причины такого дефекта, как полосы. Полосы длиной в десятки метров расположены параллельно направлению прокатки без каких-либо иных закономерностей и имеют ширину до 15 мм. Отмечается, что полосы вызваны высокой концентрацией оксидов на границе раздела между покрытием и стальной подложкой, что может свидетельствовать о наличии загрязнений поверхности полосы и неэффективности очистки.

Согласно работе [16], оголенные участки и отслоение покрытия в первую очередь связаны с наличием остатков масла на стальной основе. Масло проходит стадию обжига в печах прямого и косвенного нагрева и образует углеродистые отложения, наблюдаемые при изучении дефектов. Дефектов можно избежать за счет эффективного выгорания смазки и правильного химического состава ванны.

В работе [8] указывается, что углубления без отслоения покрытия могут быть связаны с тем, что не удаленная своевременно или захваченная твердая частица на поверхности сдувается газовыми ножами.

**Нагрев и выдержка.** Секция нагрева полосы предназначена для проведения непрерывного рекристаллизационного отжига. Она может включать в свой состав печь косвенного нагрева в атмосфере экзотермического газа или одновременно печи прямого и косвенного нагрева. В защитной атмосфере протекают восстановительные процессы, способствующие очистке полосы.

В работе [8] указано, что ошибки управления соотношением воздух/топливо в печи прямого нагрева АНГЦ могут привести к высокому уровню СО и отложению сажи на полосе. Такие отложения далее приводят к оголенным участкам в цинковом покрытии. В печи косвенного нагрева, где полоса нагревается в защитной атмосфере N<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>, чистота полосы повышается, но только если точка росы или содержание кислорода находятся на низком уровне. Иначе загрязнения, связанные, например, с прогаром радиантных труб, могут ухудшить сцепление покрытия с полосой. При оцинковании низкоуглеродистых сталей утечки смазки из подшипников валков могут науглероживать поверхность.

Согласно работе [17], при горячем оцинковании двухфазных сталей отжиг при низкой точке росы вызывает сильное внешнее окисление второстепенных легирующих элементов, что затрудняет последующее реак-

тивное смачивание цинком. Увеличение точки росы уменьшает покрытие оксидами.

В работе [6] указано, что тепловая нагрузка в секции нагрева существенно возрастает с ростом скорости движения полосы. Это увеличивает тепловую выпуклость валков (вызванную распределением температуры внутри валков), что сильно повышает вероятность смещения полосы. В печи полоса подвержена тепловым короблениям (изгибы из-за неравномерного распределения тепла), поскольку предел текучести полосы снижен.

Согласно работе [18], основной причиной коробления полосы в печи является комбинированное воздействие высокой температуры и натяжения. С ростом ширины полосы вероятность коробления возрастает. Повышение равномерности распределения температуры по ширине полосы позволяет избежать коробления только в низкотемпературном диапазоне. При определенном распределении температуры по длине полосы превышение натяжением первого критического значения приводит к короблению. При дальнейшем увеличении натяжения и превышении второго критического значения коробление может уменьшиться, если деформационные процессы еще не получили развития.

В работах [6; 19; 20] отмечается сильное влияние условий термической обработки стали при отжиге на механические свойства продукции АНГЦ. Чтобы избежать дефектов при изменении сортамента или режима рекомендуется модельно-упреждающее управление температурой полосы [21].

**Закрытое охлаждение.** Секция закрытого охлаждения конструктивно представляет собой часть печи косвенного нагрева. Для охлаждения полосы применяется азотно-водородный газ. На выходе секции температура полосы приближается к температуре расплава в ванне оцинкования.

Авторами работы [22] были изучены причины возникновения наплывов цинка в условиях ЛПЦ-11 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Указывается, что причиной является накопление цинковой пыли в носке выходного желоба печи АНГЦ. При пониженной точке росы в защитной атмосфере частицы пыли цинка испаряются из ванны и осаждаются на носке, с которого падают на поверхность полосы, образуя наросты цинка. Для устранения дефекта рекомендуют модернизировать носок выходного желоба печи для измерения и управления точкой росы.

В работе [8] указывается, что высокая температура полосы на входе в цинковую ванну после закрытого охлаждения в сочетании с низкой точкой росы носка может вызвать испарение цинка при высокой скорости движения полосы. Если пары цинка конденсируются на полосе, то могут возникать пупырышки и выпуклости на покрытии. Влияние высокой температуры полосы после закрытого охлаждения на дефекты отмечается также в работе [23]. Авторы работы [24] указывают,

что разница между температурой полосы после охлаждения и температурой ванны должна быть сведена к минимуму. При температуре полосы выше 470 °С увеличивается захват алюминия из ванны, происходит большее растворение стальной полосы и ускоряется образования дресса.

В работе [17] применительно к двухфазным сталям показано влияние скорости охлаждения на механические свойства.

**Ванна цинкования.** Согласно работе [9], появление донного дресса в ванне цинкования делает расплав более вязким и приводит к неравномерности толщины покрытия и появлению наплывов. Это требует добавления алюминия в расплав ванны.

Частицы верхнего дресса ванны захватываются покрытием, если оксидная пленка поверхности ванны захватывается полосой [8]. Поэтому важно поддерживать чистоту поверхности ванны. Неверное содержание алюминия в ванной и колебания температуры расплава приводят к увеличению количества дресса, частицы которого оседают на покрытии и валках. Крупные частицы дресса могут вызывать вмятины на полосе. Избыток железа в ванне отрицательно влияет на текучесть расплавленного цинка и приводит к матовому покрытию.

В работе [25] исследуется влияние температуры расплава в цинковой ванне на толщину покрытия. Показано, что повышение температуры снижает толщину покрытия для сталей с высоким содержанием кремния.

**Газовые ножи.** После ванны полоса проходит через газовые ножи, которые сдувают избыточный цинк обратно в ванну. При этом обеспечивается требуемая толщина и равномерность слоя покрытия.

В работе [8] указывается, что вследствие воздействия газовых ножей могут возникать натеки и рябь покрытия. При этом натеки появляются при толстом покрытии на толстых полосах, а рябь при тонком покрытии на тонких полосах. Причинами являются:

- слишком гладкая поверхность полосы;
- высокая температура полосы или цинка в ванне;
- чрезмерные вибрации и разрушение оксидного слоя на жидком цинке.

В работе [26] рассматриваются причины образования наплывов, имеющих определенный узор. Указано, что вихреобразный центр струи газового ножа имеет относительно низкое давление по сравнению с периферией. Высокое давление удаляет больше цинка, что приводит к неравномерности покрытия. Вихри перемещаются вследствие нестабильности струи и давления. Возникающий узор зависит от скорости движения полосы. В работе [27] показано, что параметры наплывов зависят от исходного распределения толщины покрытия в поперечном направлении и скорости движения стальной полосы. Подобные наплывы снижают качество, производительность и рентабельность конечной продукции [28]. В работе [29] указывается, что давление струи на краю полосы резко падает по сравне-

нию с пиком давления в средней ее части. Это приводит к утолщениям на кромке полосы.

В работах [30; 31] отмечены основные факторы, влияющие на толщину покрытия:

- скорость движения полосы;
- давление на газовых ножах;
- высота расположения газового ножа над ванной;
- расстояние между газовым ножом и полосой;
- раскрытие щели;
- угол наклона воздушного ножа.

В работе [32] указывается, что одной из основных причин отклонения толщины покрытия от заданного уровня является вибрация полосы вблизи газовых ножей. Вибрации могут быть связаны с флуктуациями натяжения и особенностями движения роликов в цинковой ванне. Таким образом, влияние параметров газовых ножей на качество может проявляться в совокупности со скоростью движения полосы и другими ее параметрами через вибрацию полосы. Исследования показывают, что скорость полосы оказывает заметное влияние на амплитуду вибраций вблизи воздушного ножа [33]. С ростом скорости становится сложнее уменьшить вибрацию. Ограничить пиковые значения амплитуды можно за счет большего натяжения и управления скоростью движения полосы. Авторы работы [34] отмечают, что примененные системы электромагнитной стабилизации полосы «EMG eMASS» позволяет снизить разброс толщины покрытия в два раза за счет меньшей вибрации.

В работе [11] установлено, что сильная вибрация полосы, расплескивание расплава и забивание воздушных ножей расплавом приводят к наплывам цинка. Указано, что при наличии дефектов, связанных с вибрацией, требуется коррекция натяжения и скорости движения полосы. Также авторы указывают, что устранение дефектов возможно путем коррекции:

- давления на ножах;
- расстояния до полосы;
- угла наклона газовой струи;
- температуры и скорости движения полосы.

Авторами работы [35] отмечается, что при выходе полосы из ванны происходит реакция между внешней поверхностью расплавленного цинка покрытия и кислородом воздуха. Это делает верхний оксидный слой покрытия более вязким, что приводит к волнам. Эффект проявляется при толстом покрытии и низкой скорости движения полосы. Избежать дефекта можно путем увеличения скорости движения полосы или путем использования азота для газового ножа.

В работе [36] выполнено исследование влияния воздушных ножей на течение жидкого цинка в ванне. Показано, что струи газовых ножей могут эффективно воздействовать на поток цинка вокруг выхода полосы, что создает основу для дальнейшего повышения качества покрытия.

**Дрессировочная клеть и правильно-растяжная машина.** После воздушных ножей и глубокого

охлаждения полоса поступает на дрессировочный стан, где происходит прокатка с малым коэффициентом удлинения. Это позволяет сохранить способность стали к вытяжке, разглаживает поверхность и устраняет рельеф цинкового покрытия. Правильно-растяжная машина нужна для повышения плоскостности полосы.

Авторы работы [8] указывают, что из-за трения скольжения между твердой поверхностью рабочего вала и мягким покрытием происходит захват цинка валком и возникают отпечатки на поверхности полосы во время прокатки.

В работе [37] рассматриваются два независимых механизма образования трещин покрытия в зонах листа с наибольшей вытяжкой. Макротрещины возникают вследствие проникновения материала покрытий в металл и охрупчивания границ зёрен. Микротрещины возникают в момент дрессировки оцинкованного листа при больших касательных напряжениях и при малых изгибах полосы.

В работе [38] указывается, что дефект типа «апельсиновая корка» возникает вследствие дрессировки при достижении удлинения, соответствующего пределу текучести. Устранению проблемы может способствовать соответствующая технология отжига.

**Совместное влияние секций.** Многие авторы указывают на совокупность причин, которые привели к возникновению дефекта.

Авторы работы [11] рассматривают причины возникновения такого дефекта, как наплывы цинка. Указано, что сложно устранимой причиной наплывов цинка являются простои. Застывание цинка в месте контакта полосы с поверхностью цинкового расплава затрудняет работу воздушных ножей, целью которых является точное формирование покрытия заданной толщины.

В работе [10] показано, что появление трещин на поверхности покрытия возможно при одновременном наличии двух обстоятельств. Во-первых, несовершенство технологического процесса приводит к появлению волнообразного рисунка. Подобный рисунок сопровождается появлением в центре покрытия пустот и трещин, образование которых не связано с наличием поверхностных оксидов стальной основы. Вторым обстоятельством являются особенности дрессировки, в ходе которой в покрытии возникают трещины.

В работе [39] определены две ситуации, которые наиболее часто сопровождают нарушение сцепления цинкового слоя со стальной основой. Условия первой ситуации:

- низкая температура в ванне цинкования;
- низкая температура в шестой зоне печи (последняя по ходу металла);
- скорость движения полосы резко падает.

Условия второй ситуации:

- внезапные изменения скорости;
- низкая температура цинковой ванны;
- низкая температура полосы на выходе из печи.

Авторы работы [40] рассматривали влияние на качество таких параметров, как:

- среднее удлинение;
- скорость движения полосы;
- расстояние до газовых ножей;
- давление на газовых ножах.

Под качеством понимают отсутствие ряда дефектов, включая непроцинковку и неравномерность цинкового покрытия, которая связана с наростами, полосами, ямками, частицами дресса. Определены условия, когда доля дефектов существенно возрастает:

- наличие значимого удлинения;
- скорость более 57 м/мин;
- расстояние до ножей более 1226 мм;
- высокое давление на ножах.

Из обзора следует наличие влияния скорости движения полосы на возникновение разных дефектов. Одновременный учет всех отмеченных особенностей – сложная задача. Поэтому актуален поиск причин дефектов с учетом скорости линии.

### Исходные данные

Основой изучения связи между производительностью и дефектами является накопленная на заводе «ММК Metallurgy» ретроспективная информация о работе подсистем АНГЦ и выявленных дефектах продукции за 2020–2021 гг. для стали DX51D. Для каждого рулона полосы в базе данных содержится информация о максимальном, минимальном и среднем значении каждого технологического параметра за период времени, когда рулон обрабатывался.

### Влияние остановок на возникновение дефектов

Согласно работе [11], одним из факторов, который сам по себе значимо влияет на дефекты, является простой. В табл. 3 представлены доли рулонов с дефектами, при производстве которых возникала остановка агрегата.

Только три из рассматриваемых дефектов продукции имеют повышенную вероятность возникновения при остановке агрегата. Наибольшую зависимость от остановки демонстрирует дефект D1 – пятна без покрытия. Ни для одного из рассматриваемых дефектов остановки

Таблица 3. Доли рулонов с дефектами, при производстве которых возникла остановка

Table 3. Proportion of rolls with defects during production of which there was a stoppage of the unit

Дефект	Доля, %
D1 – Uncoated Spots (пятна без покрытия)	8,84
D3 – Damage Marks (надав)	3,47
D4 – Dent (отпечатки)	1,50

агрегата не являются причиной, которая объясняла бы большую часть случаев появления дефекта. В дальнейшем из анализа были исключены рулоны, при обработке которых возникали остановки агрегата.

В качестве факторов приняты величины, представленные в табл. 4.

### СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБСТОЯТЕЛЬСТВ ПОЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ

Сложность определения сопутствующих обстоятельств появления дефектов заключается в большом числе параметров технологического процесса, которые потенциально могут оказывать влияние, и взаимосвязанном изменении многих сигналов.

Для каждого отдельного дефекта был определен индивидуальным набор факторов для дальнейшего расслоения данных. С этой целью для каждого из параметров первоначально оценили соответствие законов его распределения для дефектной и не дефектной продукции.

Для исключения влияния мешающих факторов при взаимосвязанном изменении сигналов использовали стратификацию. При этом данные группировали в зависимости от условий их получения, и для исключения влияния мешающих факторов рассматривали данные групп отдельно. Так, например, было установлено, что появлению дефекта D19 сопутствуют изменения толщины полосы и скорости линии. Для проверки влияния скорости были сгруппированы данные по толщине полосы, и для каждой отдельной страты проведена оценка влияния скорости на появление дефектов. На рис. 2, а показаны плотности распределения скорости для продукции с дефектом D19 и без него при

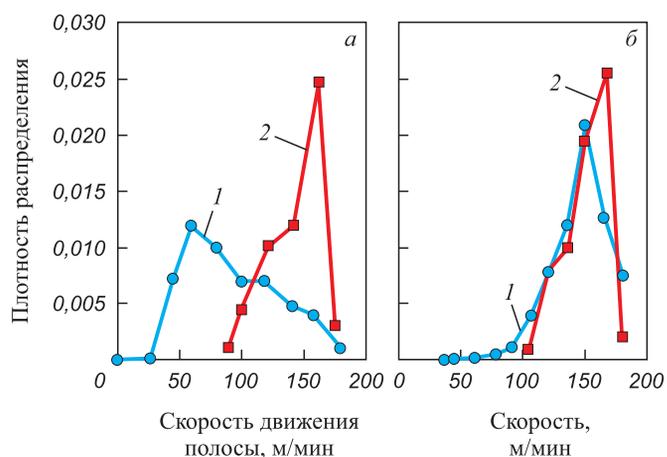


Рис. 2. Плотность распределения скорости для продукции с дефектом D19 (2) и без такого дефекта (1): а – без стратификации; б – при стратификации для страты толщиной 0,40–0,65 мм

Fig. 2. Speed distribution density for products with (2) and without (1) defect D19: а – without stratification; б – without stratification (strip heights (0.40–0.65 mm))

Таблица 4. Факторы для объяснения причин дефектов

Table 4. Factors explaining the causes of defects

Номер	Величина
Ф1	Средняя скорость движения полосы
Ф2	Разница между максимальной и минимальной скоростью
Ф3	Средняя толщина полосы
Ф4	Разница между максимальной и минимальной толщиной полосы
Ф5, Ф6	Минимальная и максимальная температуры полосы после секции прямого нагрева
Ф7, Ф8	Минимальная и максимальная температуры полосы после секции косвенного нагрева
Ф9, Ф10	Минимальная и максимальная температуры полосы после закрытого охлаждения
Ф11	Ширина полосы
Ф12, Ф13	Минимальная и максимальная температура расплава в цинковой ванне
Ф14, Ф15	Давление на переднем и заднем газовых ножах*
Ф16, Ф17	Минимальная и максимальная точка росы в секции косвенного нагрева
Ф18, Ф19	Минимальная и максимальная точка росы в секции закрытого охлаждения
Ф20	Минимальное натяжение полосы на входе в печь**
Ф21	Заданная толщина цинкового покрытия (масса покрытия)
Ф22	Удлинение при прокатке***
* При стабилизации толщины покрытия характеризует вязкость расплава в цинковой ванне. ** Для некоторых дефектов рассматривали натяжение на разных участках. *** Учитывали для дефектов D19, D20.	

отсутствии стратификации, а на рис. 2, б для одной из страт при стратификации. Из графиков следует, что вероятность появления дефекта связана с толщиной полосы, а не со скоростью линии.

Расслоение данных проводили в несколько этапов. Первоначально скорость линии и толщину полосы рассматривали в качестве факторов риска. Далее в зависимости от результата эти параметры относили к мешающим факторам.

#### НАБОРЫ ФАКТОРОВ ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАССЛОЕНИЯ ДАННЫХ

В табл. 5 для каждого рассматриваемого дефекта указаны факторы с отклонением плотности распределения для дефектной и не дефектной продукции.

Согласно табл. 5, связь факторов Ф16 и Ф19 с рассматриваемыми дефектами не выявлена. Для дефектов D16 (Chromate Stain) и D17 (Matt Appearance) все факторы демонстрируют схожие частные плотности распределения для дефектной и не дефектной продукции, и, видимо, не влияют на возникновение этих дефектов. Факторы Ф14 и Ф15 (давление на переднем и заднем газовых ножах) имеют схожие частные распределения для всех дефектов.

Некоторые из факторов потенциально могут влиять на возникновение множества разных дефектов:

- скорость движения полосы – 17 видов;
- толщина полосы – 16;

- натяжение полосы – 12;
- толщина цинкового покрытия – 10;
- давление на газовом ноже – 9;
- минимальная температура полосы после секции прямого нагрева – 8.

#### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТРАТИФИКАЦИИ

Факторы, которые могут влиять на возникновение дефекта, представлены в табл. 6.

Результаты после стратификации показали, что зависимость вероятности появления дефекта от скорости движения полосы часто объясняется влиянием толщины полосы. Кроме толщины на значительное число дефектов влияют:

- скорость движения полосы – шесть видов;
- давление на газовом ноже и толщина покрытия – по пять видов;
- перепады скорости и натяжение полосы – по три вида;
- точка росы в секции закрытого охлаждения и температура полосы после этой секции – по два вида.

Возникновение четырех дефектов сопровождается различием распределений только толщины полосы (D11 – потертости, D12 – следы ролика, D18 – царапины, D21 – пузыри). После толщины полосы скорость является фактором, который связан с возникновением наибольшего числа видов дефектов.

Таблица 5. Факторы, которые потенциально могут влиять на возникновение дефекта

Table 5. Factors that can potentially affect the occurrence of a defect

Дефект	Номер фактора																					
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
D1	+	+			+		+	+	+									+		+		
D2	+		+										+									+
D3	+	+	+		+												+			+		
D4		+						+						+	+		+					
D5	+		+								+			+	+					+	+	
D6										+				+	+							
D7	+		+			+			+					+	+					+	+	
D8	+		+		+	+		+														
D9	+		+									+		+	+						+	
D10	+		+											+	+		+			+	+	
D11	+		+																	+	+	
D12	+		+																	+	+	
D13	+		+											+	+						+	
D14	+	+	+		+									+	+		+			+	+	
D15	+		+		+		+													+		
D16																						
D17																						
D18	+		+	+	+		+					+		+	+					+		
D19	+		+		+													+			+	+
D20	+		+																		+	
D21	+		+		+																+	
N	17	4	16	1	8	2	3	3	1	2	1	2	1	9	9	0	4	2	0	12	10	1

**СООТВЕТСТВИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗВЕСТНЫМ ПРИЧИНАМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЕФЕКТОВ**

**D1 – Пятна без покрытия.** Результаты показывают, что скорость полосы и особенно ее перепады сильно влияют на вероятность пятен без покрытия (рис. 3). Влияние перепадов скорости соответствует данным работы [39]. Однако только малая часть дефектов этого вида связана с остановками агрегата. По-видимому, остановка агрегата сама по себе не является причиной возникновения дефектов этого вида. Связь с натяжением указывает на то, что причиной, вероятно, являются механические воздействия. Отмеченное в работах [8; 17] влияние высоких и низких значений точки росы в печи косвенного нагрева не наблюдается.

**D2 – Неравномерность покрытия.** Результаты соответствуют данным работы [12] – повышенная температура расплава затрудняет получение равномерного покрытия при высокой его толщине (рис. 4). Высокая температура расплава сопровождается высокой производительностью АНГЦ по металлу и, возможно, обусловлена трудностями при регулировании. Причиной дефекта может являться диффузия железа через

ингибирующий межфазный слой Fe–Al, что, согласно работе [41], негативно влияет на смачивание поверхности. При содержании алюминия в ванне 0,2 % инги-

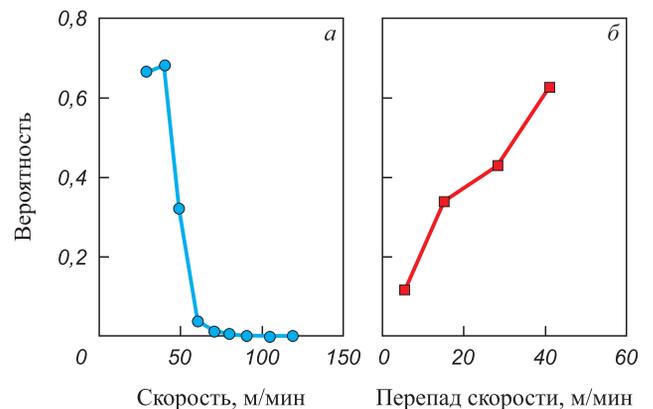


Рис. 3. Зависимость вероятности пятен без покрытия (D1) от: а – скорости при толщине полосы  $h_m = 0,80 - 0,95$  мм; б – перепада скорости при  $h_m \approx 0,8$  мм и средней скорости 50 м/мин

Fig. 3. Dependence of probability of uncoated spots (D1) on: а – speed at strip height  $h_{met} = 0.80 - 0.95$  mm; б – speed difference at  $h_{met} \approx 0.8$  mm and an average speed of 50 m/min

Таблица 6. Факторы, влияющие на возникновение дефекта

Table 6. Factors affecting the occurrence of a defect

Дефект	Влияние		Обстоятельства возникновения дефекта
	сильное	слабое	
D1	Ф1, Ф2, Ф20	Ф3, Ф9, Ф18	Для малой толщины полосы ( $h_m$ ) при низкой скорости ( $v$ ). Большие перепады $v$ , особенно у тонких полос. Низкое натяжение у тонких полос. Высокая точка росы в отделении закрытого охлаждения. Повышенная температура полосы после закрытого охлаждения при низкой $v$ для полос с $h_m < 1$ мм.
D2	Ф1, Ф3, Ф13, Ф21	нет	Высокая $v$ толстых полос. Высокая температура расплава в цинковой ванне при обработке тонких полос с высокой $v$ или толстых полос при любой $v$ . Большая толщина покрытия.
D3	Ф1, Ф2, Ф3, Ф20	Ф17	Для толстых полос при низкой $v$ . Для тонких полос при низкой $v$ и пониженном натяжении. Большие перепады $v$ , кроме высокой $v$ . Повышенная точка росы в печи косвенного нагрева.
D4	Ф1, Ф2, Ф17	Ф8	Пониженная $v$ . Высокая точка росы в печи косвенного нагрева при низкой скорости. Повышенные перепады $v$ при высокой $v$ . Повышенная температура полосы после косвенного нагрева.
D5	Ф3, Ф14–15, Ф21	Ф11	При высокой ( $>2$ мм) или низкой ( $<0,5$ мм) $h_m$ . Толстое покрытие при высокой $h_m$ . Тонкое покрытие при высокой $h_m$ при сильно пониженном давлении на ножах. Вероятность дефекта растет с увеличением ширины полосы при высокой $h_m$ .
D6	Нет	Ф10	Повышенная (490 – 500 °С) температура полосы после закрытого охлаждения.
D7	Ф1, Ф3, Ф6, Ф10, Ф14–15, Ф21	Нет	При $h_m$ от 0,6 мм. Чаще при $h_m = 2$ мм. При $h_m$ до 1 мм при высокой $v$ . При больших $h_m$ влияния $v$ нет. При $h_m > 1,8$ мм при повышенных температурах полосы после прямого нагрева и секции закрытого охлаждения. При толстом покрытии или низком давлении на газовых ножах для полос с $h_m$ до 1 мм и $h_m > 2,5$ мм.
D8	Малый объем данных не допускает стратификацию.		
D9	Ф1, Ф3	Ф14–15	Чаще при $h_m < 1,5$ мм. При $h_m < 1,2$ мм при повышенной $v$ . При $h_m > 2,4$ мм при низком давлении на ножах. При пониженном натяжении на входе секции дрессировки.
D10	Ф3	Ф20	При $h_m$ от 1 до 2 мм при повышенном натяжении.
D11	Ф3	Нет	Часто у полос с $h_m < 1,5$ мм.
D12	Нет	Ф3	Очень редко возникает у полос с $h_m < 1$ мм.
D13	Ф1, Ф14–15, Ф21	Нет	При толстом покрытии независимо от $h_m$ . При тонком покрытии увеличение $v$ снижает вероятность дефекта. При тонком покрытии пониженное давление на ножах увеличивает вероятность дефекта.
D14	Ф3, Ф14–15, Ф21	Ф17	Обычно при $h_m < 0,6$ мм при пониженном давлении на ножах и малой толщине покрытия. При $h_m > 1,2$ мм отмечено неоднозначное влияние точки росы в секции закрытого охлаждения.
D15	Ф3, Ф7	Нет	Возникает при разной $h_m$ . При $h_m > 2$ мм вероятность выше в 3 – 4 раза. При $h_m$ 1,8 – 2,2 мм и пониженной температуре полосы после печи косвенного нагрева.
D18	Ф3, Ф20	Нет	Вероятность увеличивается с ростом $h_m$ ( $P = 0,0011 \exp(1,7856h_m)$ ) или при снижении натяжения. При $h_m < 1$ мм редко возникает.
D19	Ф3, Ф18, Ф22	Ф5	При $h_m < 1$ мм; очень низких значениях точки росы в секции закрытого охлаждения; удлинении во время прокатки на 1 %; пониженной температуре полосы после печи прямого нагрева. Чаще при $h_m \approx 0,3$ мм.
D20	Ф3, Ф21	Нет	При разных $h_m$ . Чаще у тонких полос ( $P = -0,015 \ln(h_m) + 0,0196$ ). До $h_m = 0,9$ мм толщина покрытия не влияет на вероятность дефекта. По мере роста $h_m$ увеличение толщины покрытия сопровождается все большим увеличением вероятности дефекта.
D21	Ф1, Ф3	Нет	Преимущественно при $h_m < 1$ мм. Вероятность резко снижается при высокой $v$ .

бирующий слой полностью формируется при температурах полосы на входе ванну от 440 до 480 °С. Однако, согласно работе [24], с ростом температуры диффузия железа через ингибирующий слой увеличивается, и не рекомендуется превышать 470 °С по температуре полосы. Поскольку содержание алюминия в расплаве до 0,3 % оказывает существенно-нелинейное влияние

на время до образования фаз Fe–Zn, то истощение ванны по алюминию совместно с высокой температурой полосы и расплава могут привести к дефекту.

**D3, D4 – Надав, Отпечатки.** Причины дефектов обычно связаны с механическими повреждениями проката. Результаты позволяют предположить, что повреждения могут возникнуть непосредственно на линии

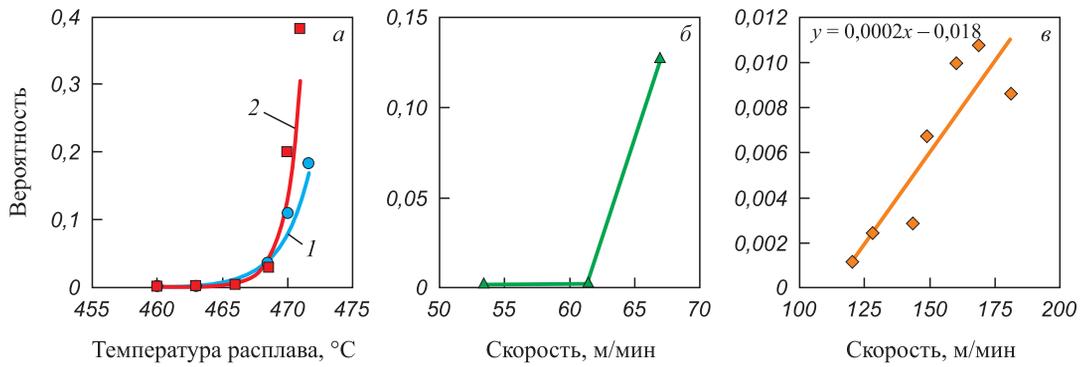


Рис. 4. Зависимость вероятности получения неравномерного покрытия (D2) от:

а – температуры расплава в цинковой ванне (1 –  $h_m = 0,5 - 0,6$  мм при скорости 160 м/мин; 2 –  $h_m \approx 2$  мм при скорости 60 м/мин);  
 б – скорости при  $h_m \approx 2$  мм; в – скорости при  $h_m \approx 0,5$  мм

Fig. 4. Dependence of probability of obtaining an uneven coating (D2) on:

а – the temperature of the melt in the zinc bath (1 –  $h_{met} = 0.5 - 0.6$  mm at a speed of 160 m/min; 2 –  $h_{met} \approx 2$  mm at a speed of 60 m/min);  
 б – speed at  $h_{met} \approx 2$  mm; в – speed at  $h_{met} \approx 0.5$  mm

АНГЦ при сильном изменении скорости (рис. 5, 6). Высокая точка росы для продукции с отпечатками позволяет предположить связь дефекта с загрязнениями (согласно работе [8], причиной вмятин могут быть частицы дресса).

**D5 – Неровности кромки.** Типовые неровности кромки, такие как рванина, гофра и пилообразность, ассоциируют со свойствами исходной полосы. Полученная связь с толщиной покрытия и давлением на газовых ножах не ясна.

**D6 – Нарушение толщины покрытия.** Можно предположить, что рост температуры полосы на входе в ванну увеличивает, согласно работе [24], захват алюминия из ванны, что при прочих равных условиях делает, согласно работе [9], расплав более вязким и может привести к нарушению требуемой толщины покрытия.

**D7 – Макровключения.** Согласно работе [8], дефект, вероятно, обусловлен захватом полосой частиц дресса совместно с оксидной пленкой на поверхности цинковой ванны. Видимо, толстое покрытие в большей степени способствует сохранению крупных частиц дресса (рис. 7, б). Можно допустить, что, согласно работе [36], низкое давление на ножах в меньшей степени воздействует на расплав ванны в области выхода полосы, где образуется и захватывается оксидная пленка. Влияние повышенной температуры полосы на входе в ванну может заключаться в загрязнении расплава оксидами цинка. Увеличение толщины полосы и ее скорости после уровня 125 м/мин приводит к росту вероятности дефекта (рис. 7, а, в), что возможно объясняется движением расплава и более активным поступлением частиц дресса в область захвата.

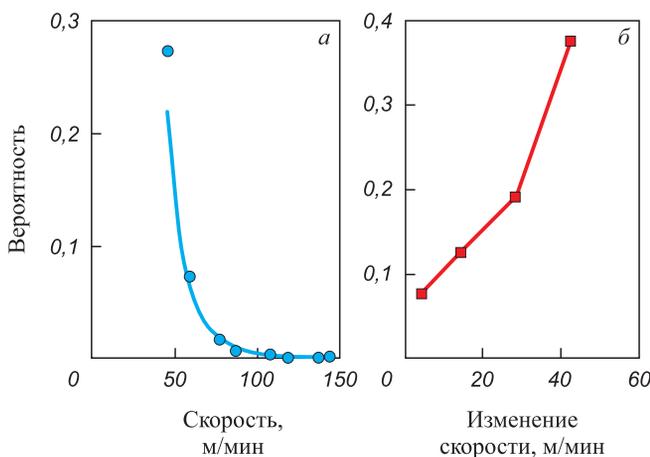


Рис. 5. Зависимости вероятности надрывов (D3) от:

а – скорости при  $h_m \approx 0,8$  мм;  
 б – изменения скорости при  $h_m \approx 0,8$  мм и скорости 50 м/мин

Fig. 5. Dependences of tail marks probability (D3) on:

а – speed at  $h_{met} \approx 0.8$  mm;  
 б – speed changes at  $h_{met} \approx 0.8$  mm and a speed of 50 m/min

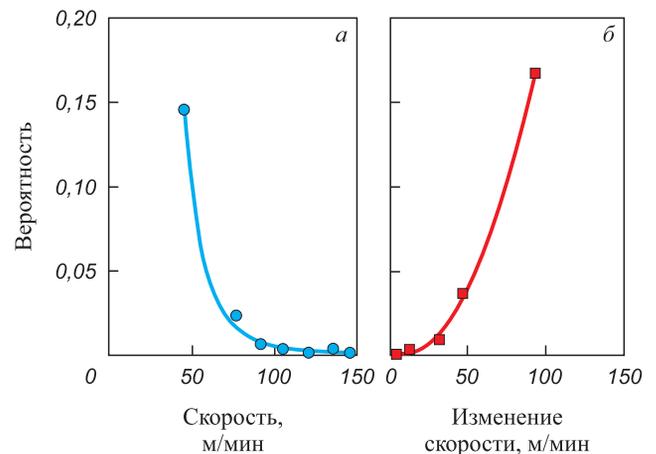


Рис. 6. Зависимости вероятности отпечатков (D4) от:

а – скорости при  $h_m = 0,8; 0,9$  мм;  
 б – изменения скорости при  $h_m \approx 0,8$  мм и скорости 110 м/мин

Fig. 6. Dependences of probability of imprints (D4) on:

а – speed at  $h_{met} = 0.8; 0.9$  mm;  
 б – speed changes at  $h_{met} \approx 0.8$  mm and a speed of 110 m/min

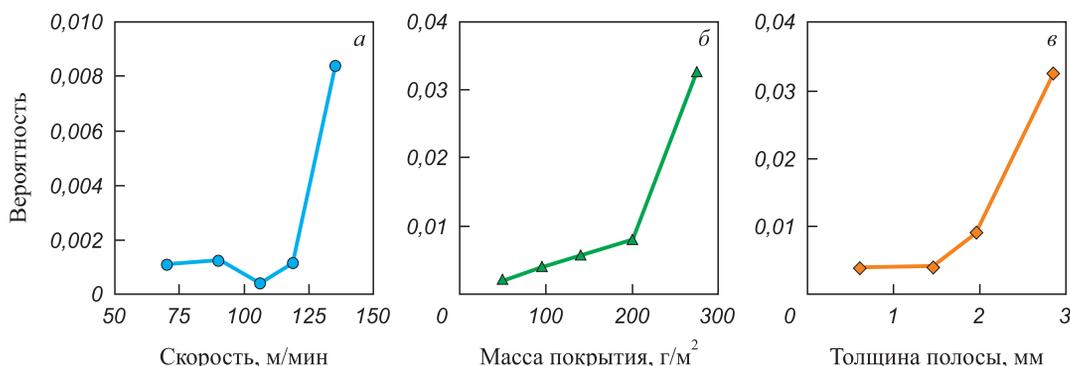


Рис. 7. Зависимость вероятности появления макровключений (D7) от:

а – скорости движения полосы при  $h_m \approx 0,9$  мм; б – массы покрытия при  $h_m = 2,5; 2,8$  мм и скорости 45 м/мин; в –  $h_m$  при массе покрытия 275 г/м<sup>2</sup> и скорости 50 – 80 м/мин

Fig. 7. Dependence of probability of macroinclusions (D7) on:

а – strip speed at  $h_{met} \approx 0.9$  mm; б – coating mass at  $h_{met} = 2.5; 2.8$  mm and a speed of 45 m/min; в –  $h_{met}$  at a coating mass of 275 g/m<sup>2</sup> and a speed of 50 – 80 m/min

**D8 – Нарушение механических свойств.** Распределение температуры полосы на выходе печей прямого и косвенного нагрева различается для дефектной и не дефектной продукции. Однако подтвердить различие с применением стратификации сложно из-за малого объема данных. Поскольку определить наличие дефектов этого типа визуально нельзя, необходимо строго соблюдать требования к термической обработки стали.

**D9 – Наплывы цинка.** На рис. 8, а показана вероятность появления дефекта в зависимости от скорости движения полосы при ее толщине порядка 0,5 мм. Со снижением скорости вероятность дефекта также снижается. Установлено, что вероятность возникновения дефекта зависит от толщины полосы (рис. 8, б) только при скорости менее 90 м/мин. При большей скорости вероятность дефекта изменяется слабо. Низкое давление на ножах (низкая вязкость расплава) ока-

зывает влияние только при пониженной скорости для толстых полос при слабом развитии дефекта. С ростом натяжения на входе секции дрессировки (рис. 8, в) вероятность дефекта снижается и одной из причин наплывов могут быть вибрации.

**D10 – Шероховатость покрытия.** Дефект влияет на защитные свойства оцинкованной полосы, износостойкость и внешний вид покрытия. Обычно определяется свойствами исходной полосы. По-видимому, имеется связь шероховатости исходной полосы с ее толщиной. Причины отклонения натяжения для дефектной и не дефектной продукции неясны.

**D11, D12 – Потертости и следы ролика.** Потертости имеют связь только с толщиной, что согласуется с данными работы [10], где причиной указаны свойства исходной полосы. Вероятность появления потертостей равномерно снижается с ростом толщины

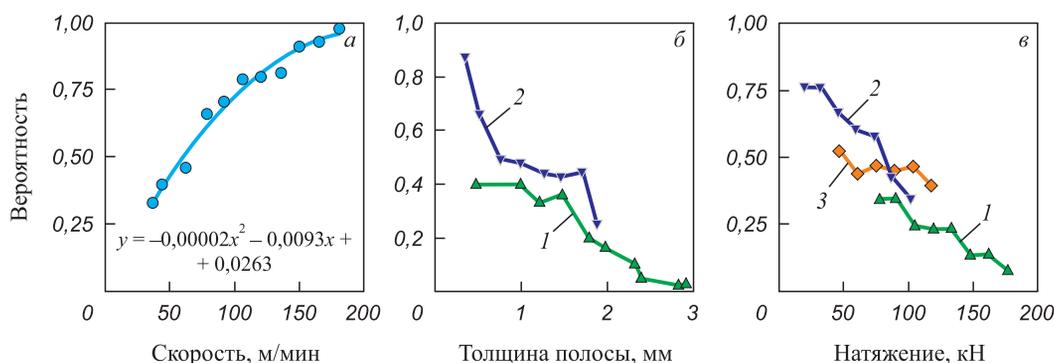


Рис. 8. Зависимость вероятности появления наплывов (D9) от:

а – скорости движения полосы при  $h_m \approx 0,5$  мм; б –  $h_m$  при скорости: 1 – 45 м/мин; 2 – 75 м/мин; в – натяжения на входе секции дрессировки (1 – толщина 1,8 – 2,0 мм, скорость 60 м/мин; 2, 3 – толщина 0,8 – 1,5 мм, скорость соответственно 100 – 130 и 75 – 80 м/мин)

Fig. 8. Dependence of probability of bright edges (D9) on:

а – strip speed at  $h_{met} \approx 0.5$  mm; б –  $h_{met}$  at speed: 1 – 45 m/min; 2 – 75 m/min; в – tension at the inlet of the skin pass section (1 – thickness 1.8 – 2.0 mm, speed 60 m/min; 2, 3 – thickness 0.8 – 1.5 mm, speeds 100 – 130 m/min and 75 – 80 m/min)

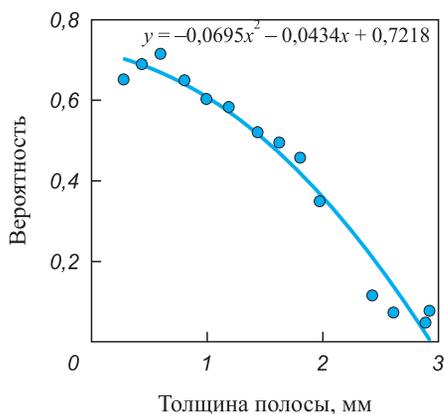


Рис. 9. Зависимость вероятности появления потертостей (D11) от  $h_{мет}$

Fig. 9. Dependence of probability of abrasions (D11) on  $h_{мет}$

(рис. 9). Вероятность появления следов ролика составляет порядка 0,25 – 0,30, за исключением полос с толщиной менее 1 мм, где дефект практически не возникает. Причины этого неясны.

**D13 – Волнообразное покрытие.** Вероятность дефекта растет с увеличением толщины покрытия независимо от толщины полосы (рис. 10, а), что соответствует данным работы [35]. Однако увеличение скорости снижает вероятность дефекта только при тонком покрытии (до 140 г/м<sup>2</sup>), при котором возникновение дефектов сопровождается пониженным давлением на ножах (рис. 10, б). Таким образом низкая вязкость расплава при тонком покрытии может приводить к появлению волнообразного покрытия.

**D14 – Отметины, связанные с дрессировкой.** Считается [8], что отметины связаны с налипанием покрытия на вальки. Дефект возникает при массе покрытия более 80 г/м<sup>2</sup> (рис. 11, а). При массе покрытия 80 – 140 г/м<sup>2</sup> появление дефекта сопровождается

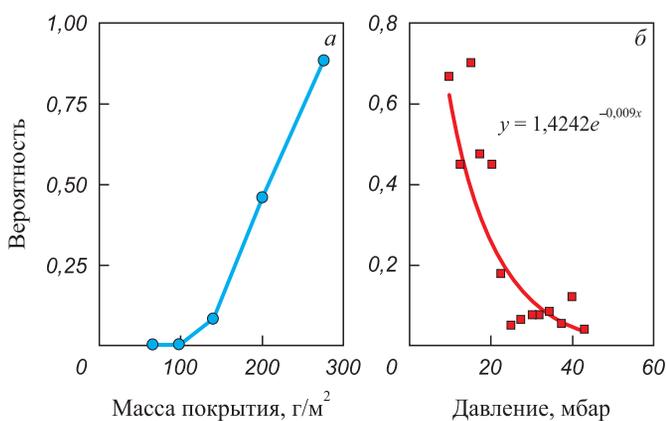


Рис. 10. Зависимость вероятности дефекта D13 от: а – толщины покрытия; б – давления на ножах при массе покрытия 100 – 140 г/м<sup>2</sup>, скорости 45 м/мин и  $h_{мет} \approx 2,5$  мм

Fig. 10. Dependence of probability of D13 defect on: а – coating thickness; б – knives pressure at coating mass of 100 – 140 g/m<sup>2</sup>, a speed of 45 m/min and  $h_{мет} \approx 2.5$  mm

пониженным давлением на ножах (рис. 11, б) и можно допустить связь налипания с наличием волнообразного покрытия.

**D15 – Темные полосы.** Согласно работе [10], дефект вызван оксидами на границе покрытия и стали. Неясно, как образование оксидов связано с толщиной полосы и ее температурой.

**D18 – Царапины.** Известны три возможные причины царапин:

- царапины на исходной полосе;
- проседание полосы, приводящее к отсутствию трения с роликами (чаще в цинковой ванне);
- налипание дресса на ролик в цинковой ванне.

Установлено, что вероятность царапин резко возрастает при толщинах полосы более 2 мм. Для дефекта в качестве фактора Ф20 использовали натяжение полосы на разных участках. Для полос с толщиной более 2 мм вероятность дефекта снижается с ростом натяжения на входе секции дрессировки (рис. 12).

**D19 – Апельсиновая корка.** Установлено, что дефект возникает у тонких полос при сильно пониженной точке росы в секции закрытого охлаждения, что согласуется с данными работы [8], где возникновение пупырышков ассоциируется с испарением цинка при низкой точке росы носка. Вероятность дефекта имеет пик в окрестностях удлинения 1 % (рис. 13), что показывает связь с выводами в работе [38].

**D20 – Трещины.** Причиной, согласно работе [37], могут являться трещины исходной полосы или внутренние напряжения в стали, которые не были устранены при отжиге. Учитывая отсутствие зависимости от параметров отжига, можно предположить, что причиной являются трещины исходной полосы. Это подтверждается резкими изменениями вероятности дефекта для

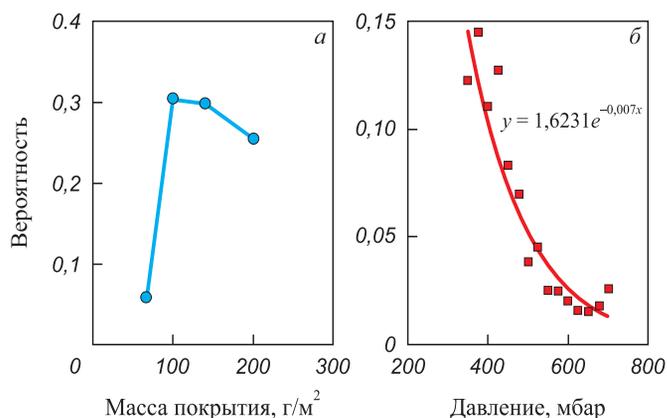


Рис. 11. Зависимость вероятности дефекта D14 от: а – массы покрытия при  $h_{мет} \approx 0,45$  мм, скорости 150 м/мин; б – давления на ножах при массе покрытия 100 г/м<sup>2</sup>, скорости 125 м/мин и  $h_{мет} \approx 0,6$  мм

Fig. 11. Dependence of probability of D14 defect on: а – coating thickness at  $h_{мет} \approx 0.45$  mm, speed of 150 m/min; б – knives pressure at coating mass of 100 g/m<sup>2</sup>, a speed of 125 m/min and  $h_{мет} \approx 0.6$  mm

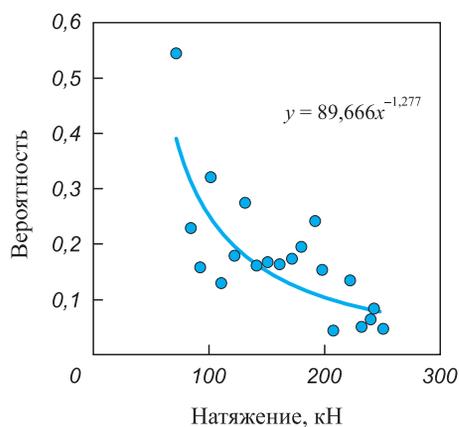


Рис. 12. Зависимость вероятности дефекта D18 от натяжения перед дрессировкой при  $h_m = 2,5; 3,0$  мм

Fig. 12. Dependence of probability of D18 defect on tension before tempering at  $h_{met} = 2.5; 3.0$  mm

разных толщин. По-видимому, при толстом покрытии эффект проявляется сильнее.

**D21 – Пузыри.** Пузыри могут быть связаны с водородом, который поглощается при травлении и выделяется при температурах цинкования. Другой причиной может быть дросс, частицы которого захватываются при нарушении слоя дросса на дне ванны. Отсутствие связи с толщиной покрытия позволяет предположить наличие второй из указанных причин. Связь с толщиной полосы (рис. 14, а) и скоростью линии (рис. 14, б) может быть обусловлена особенностями движения полосы в цинковой ванне.

### Виды дефектов, ограничивающих производительность

Основные резервы роста производительности АНГЦ связаны с увеличением скорости движения полосы распространенных сортов. Из рис. 2 следует, что на рассматриваемом агрегате только самые тонкие полосы,

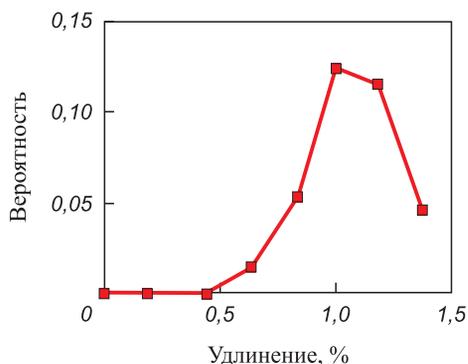


Рис. 13. Зависимость вероятности D19 от удлинения при прокатке при  $h_m \approx 0,4$  мм и скорости 160 м/мин

Fig. 13. Dependence of probability of D19 defect on extension during rolling at  $h_{met} \approx 0.4$  mm and a speed of 160 m/min

толщиной до 0,4 мм, стабильно обрабатываются при максимальной для агрегата скорости. Доля рулонов полосы стали DX51D такой толщины менее 4 %. Доля рулонов с толщиной полосы более 1 мм, где потенциально есть значительные резервы увеличения скорости, составляет порядка 60 %.

С учетом этого можно указать дефекты, вероятность которых возрастает с ростом скорости, и которые могут ограничивать производительность при условии выполнения требований к термической обработке:

- D2 – Неравномерность покрытия;
- D7 – Макровключения;
- D9 – Наплывы цинка.

Неравномерность покрытия ограничивает повышение скорости. Исходя из полученных результатов, снизить вероятность дефекта возможно путем более точного управления температурой расплава в цинковой ванне. Этому может способствовать минимизация отклонения температуры полосы после закрытого охлаждения от температуры расплава.

Макровключения являются другим распространенным дефектом брака. Влияние скорости на макровключения проявляется в резком увеличении вероятности дефекта при скорости полосы более 125 м/мин. На рассматриваемом агрегате при такой скорости обрабатываются полосы толщиной менее 1 мм. Неясно, возрастет ли частота возникновения дефекта при увеличении скорости для более толстых полос.

При увеличении скорости до предельных уровней возникновение наплывов цинка на рассматриваемом агрегате становится неизбежным. Это ограничение может быть менее критичным, поскольку наплывы часто относят к допустимым дефектам. Видимо, устранение дефекта требует совершенствования конструкции газовых ножей.

Кроме отмеченных дефектов можно ожидать роста вероятности появления дефектов, которые не были рас-

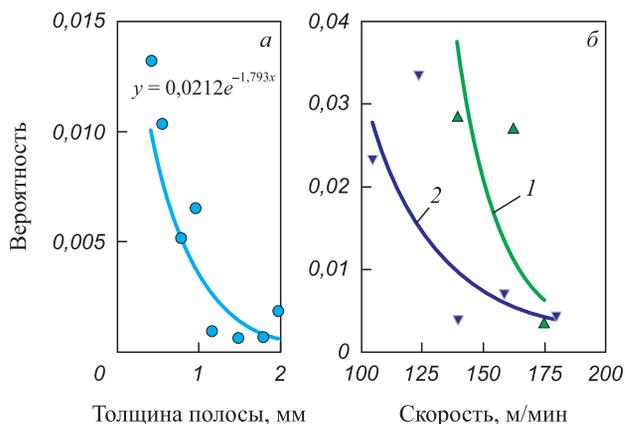


Рис. 14. Зависимость вероятности D21 от: а –  $h_m$ ; б – скорости при  $h_m$  (1 – 0,4 мм; 2 – 0,5 мм)

Fig. 14. Dependence of probability of D21 effect on: а –  $h_{met}$ ; б – speed (at  $h_{met}$ : 1 – 0.4 mm; 2 – 0.5 mm)

смотрены из-за их редкого появления и малого объема данных. Например, согласно работе [6], увеличение скорости может привести к коробоватости полосы.

Варьирование скорости движения полосы с целью выбора оптимальной на текущий момент производительности может привести к частым и большим по величине разовым изменениям скорости. В то же время перепады скорости оказывают существенное влияние на вероятность возникновения ряда дефектов:

- D1 – Пятна без покрытия;
- D3 – Надав;
- D4 – Отпечатки.

В ходе анализа были получены подобные зависимости влияния скорости и ее изменения на возникновение всех трех указанных дефектов. Это позволяет предположить схожую природу их возникновения, которая, по-видимому, связана с управлением натяжением в периоды изменения скорости движения полосы. Наименьшую связь с изменением скорости демонстрируют отпечатки (высокая вероятность появления только при значительных изменениях скорости более 50 м/мин). Вероятность появления дефектов всех трех видов с ростом скорости снижается до пренебрежимо малого уровня.

## Выводы

Полученные результаты показывают, что для повышения скорости движения полосы и, соответственно, производительности требуется совершенствование управления температурой и химическим составом расплава в цинковой ванне, а также температурой полосы после секции закрытого охлаждения. Поскольку сопутствующие дефекты частой смены скорости движения полосы относятся к недопустимым дефектам, то требуется изучение систем управления натяжением полосы на различных участках агрегата.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Субботина Ю.М., Радионова Л.В. Технологические особенности агрегатов непрерывного горячего цинкования стальной полосы. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. 2016;16(1):112–119. <https://doi.org/10.14529/met160116>  
Subbotina Yu.M., Radionova L.V. Technological features of continuous lines for hot-dip galvanizing of a steel strip. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2016;16(1):112–119. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/met160116>
2. Никифоров Б.А., Салганик В.М., Денисов С.В., Стеканов П.А. Освоение производства высокопрочного проката для автомобилестроения в ОАО «ММК». *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2006;4(16):41–45.  
Nikiforov B.A., Salganik V.M., Denisov S.V., Stekanov P.A. Commercial production of high-strength rolled products at MMK JSC for the automotive industry. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2006;4(16):41–45. (In Russ.).
3. Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Кокорин И.Д. Система стабилизации температуры в нагревательной печи с применением скользящего регулирования и нечеткой логики. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2020;21(3):143–157. <https://doi.org/10.17587/mau.21.143-157>  
Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S., Kokorin I.D. System of temperature stabilization in a heating furnace based on sliding mode control and fuzzy logic. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2020;21(3):143–157. (In Russ.). <https://doi.org/10.17587/mau.21.143-157>
4. Антоненко О. Как мы узнали, что одна из бригад оцинковщиков работала быстрее других и что было дальше. URL: <https://habr.com/ru/company/nlmc/blog/589267/> (дата обращения: 30.04.2023).
5. Sahay S.S., Kapur P.C. Model based scheduling of a continuous annealing furnace. *Ironmaking and Steelmaking*. 2007;34(3):262–268. <https://doi.org/10.1179/174328107X165708>
6. Yahiro K., Shigemori H., Hirohata K. Development of strip temperature control system for a continuous annealing line. *Proceedings of IECON '93 – 19<sup>th</sup> Annual Conf. of IEEE Industrial Electronics*. 2002:481–486. <https://doi.org/10.1109/IECON.1993.339029>
7. Мезин И.Ю., Зотов С.В., Крамзина Л.В. Анализ и повышение качества нанесения цинкового покрытия на проволоку для автомобилей. *Качество в обработке материалов*. 2017;(1(7)):14–18.  
Mezin I.Yu., Zotov S.V., Kramzina L.V. Analysis and increase of quality of zinc coating on wire for automobiles. *Kachestvo v obrabotke materialov*. 2017;(1(7)):14–18. (In Russ.).
8. Saravanan P., Srikanth S. Surface defects and their control in hot dip galvanized and galvanized sheets. *International Journal of Advanced Research in Chemical Science (IJARCS)*. 2018;5(11):11–23.
9. Радионова Л.В., Субботина Ю.М. Преимущества и недостатки способа горячего оцинкования стальной полосы. *Проблемы цинкования. Машиностроение: сетевой электронный журнал*. 2013;(2):3–9.  
Radionova L.V., Subbotina Yu.M. Advantages and shortcomings of hot dip galvanizing steel sheet. *Galvanizing problems. Russian Internet Journal of Industrial Engineering*. 2013;(2):3–9. (In Russ.).
10. Hong M.-H., Saka H. FIB and TEM observations of defects in hot-dip zinc coatings. *Journal of Electron Microscopy*. 2004;53(5):545–552. <https://doi.org/10.1093/jmicro/dfh053>
11. Бережная Г.А., Заруцкая А.О., Каримова Д.Ю. Анализ качества горячеоцинкованной полосы в ЛПЦ-11 ОАО «ММК». *Качество в обработке материалов*. 2016;(2(6)):39–42.  
Berezhnaya G.A., Zarutskaya A.O., Karimova D.Yu. Quality analysis of hot-dip galvanized strip produced at plate rolling mill no 11 at MMK OJSC. *Kachestvo v obrabotke materialov*. 2016;(2(6)):39–42. (In Russ.).
12. İlhami Pektaş. Galvaniz hataları ve çözüm önerileri. *Ankara*; 2020:76. (In Turk.).
13. Родионова И.Г., Углов В.А., Зайцев А.И., Протасов А.В., Мишнев П.А., Адигамов Р.Р., Павлов С.И., Ласьков С.А.,

- Николаев О.А., Кирюшин А.А., Тихонов А.К., Рябчиков В.Г. Разработка и освоение высококачественных экономичных автолистовых сталей нового поколения. *Сталь*. 2016;(1):46–54.
- Rodionova I.G., Uglov V.A., Zaitsev A.I., Protasov A.V., Mishnev P.A., Adigamov R.R., Pavlov S.I., Las'kov S.A., Nikolaev O.A., Kiryushin A.A., Tikhonov A.K., Ryabchikov V.G. A new generation of economical automotive steel. *Steel in Translation*. 2016;46(1):65–73. <https://doi.org/10.3103/S0967091216010125>
14. Зайцев А.И., Колдаев А.В., Родионова И.Г., Степанов А.Б. Современный подход к повышению комплекса свойств автолистовых и других типов сталей. В сборнике: *Научно-технический прогресс в черной металлургии – 2019. Материалы IV Международной научной конференции*. 2019:66–72.
  15. Tikhonov A.K., Rodionova I.G. Thermomechanical treatment in the recrystallizational annealing of automotive cold-rolled steel. *Steel in Translation*. 2022;52:451–459. <https://doi.org/10.3103/S0967091222040143>
  16. Srikanth S., Sharma C.B., Bhattacharyya A., Amitava Ray. Metallurgical investigations into genesis of bare spots, exfoliation, and matte coating appearance in hot dip galvanized steel sheets. *JFAPBC*. 2005;(3):73–81. <https://doi.org/10.1361/15477020523509>
  17. Liu H., Li F., Shi W., Swaminathan S., He Y., Rohwerder M., Li L. Challenges in hot-dip galvanizing of high strength dual phase steel: Surface selective oxidation and mechanical property degradation. *Surface & Coatings Technology*. 2012;206(16):3428–3436. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.02.001>
  18. Luo H., Dunbar W.S., Moore J.E. Buckling analysis of a heated steel strip in a continuous annealing furnace. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 1999;121(1):76–83. <https://doi.org/10.1115/1.2830578>
  19. Wu H., Speets R., Ozcan G., Ekhard R., Heijke R., Nederlof C., Boeder C.J. Non-linear model predictive control to improve transient production of a hot dip galvanising line. *Ironmaking & Steelmaking*. 2016;43(7):541–549. <https://doi.org/10.1080/03019233.2015.1126687>
  20. Ryabchikov M.Yu. Selection of steel strip annealing energy-saving conditions in view of the substandard products share. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2020;55(1):182–191.
  21. Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Новак В.С. Гибридная модель для предупреждающего управления температурой металла при горячем оцинковании стальной полосы. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2023;24(8):421–432. <https://doi.org/10.17587/mau.24.421-432>  
Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S., Novak V.S. Hybrid model for metal temperature control during hot dip galvanizing of steel strip. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2023;24(8):421–432. (In Russ.). <https://doi.org/10.17587/mau.24.421-432>
  22. Клещева С.Е., Касаткина Е.Г. Анализ уровня качества оцинкованного металлопроката в ЛПЦ-11 ПАО «ММК». *Качество в обработке материалов*. 2019;(1(11)):18–23.  
Kleshcheva S.E., Kasatkina E.G. Analysis of the quality level of galvanized metal in the sheet-rolling shop No. 11 of the PJSC “ММК”. *Kachestvo v obrabotke materialov*. 2019;(1(11)):18–23. (In Russ.).
  23. Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Шманев Д.Е., Кокорин И.Д. Управление охлаждением стальной полосы при гибком производстве оцинкованного листового проката. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021;64(7):519–529. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-7-519-529>  
Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S., Shmanev D.E., Kokorin I.D. Strip cooling control for flexible production of galvanized flat steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021;64(7):519–529. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-7-519-529>
  24. Sawaitil P.B., Chowriwar S.A., Lade I.P. Minimization of dross formation during the continuous galvanizing process in the steel industry. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2012;2(1):45–51.
  25. Бондарева О.С., Мельников А.А. Влияние температуры цинкового расплава на толщину и структуру покрытия при высокотемпературном горячем цинковании сталей с высоким содержанием кремния. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2015;(1):66–70. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2015-1-66-70>  
Bondareva O.S., Mel'nikov A.A. Influence of the temperature of a zinc melt on the coating thickness and structure during high-temperature zincplating steels with a high silicon content. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2015;(1):66–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2015-1-66-70>
  26. Yoon H.G., Ahn G.J., Chung M.K., Kim J.K. Aerodynamic investigation of air knife system to find out the mechanism of the check mark in a continuous hot-dip galvanizing process. *Proceedings of IMECE2008 2008 ASME Int. Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 2008:1–7. <https://doi.org/10.1115/IMECE2008-68056>
  27. Hongyun S., Gi Y.H., Kyoony C.M. CFD analysis of sag line formation on the zinc-coated steel strip after the gas-jet wiping in the continuous hot-dip galvanizing process. *ISIJ International*. 2011;51(1):115–123. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.115>
  28. Gi Y.H., Kyoony C.M. Development of novel air-knife system to prevent check-mark stain on galvanized strip surface. *ISIJ International*. 2010;50(5):752–759. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.50.752>
  29. Bao C., Kang Y., Li Y. Numerical analysis of edge over coating and baffle effect on hot-dip galvanizing. *Surface Review and Letters*. 2017;24(1):1750010. <https://doi.org/10.1142/S0218625X1750010X>
  30. Mao K., Yang Y.-L., Huang Z., Yang D.-y. Coating thickness modeling and prediction for hot-dip galvanized steel strip based on GA-BP neural network. *2020 Chinese Control and Decision Conf. (CCDC 2020)*. 2020;3484–3489. <https://doi.org/10.1109/CCDC49329.2020.9164854>
  31. Zhang Y., Cui Q.-p., Shao F.-q., Wang J.-s., Zhao H.-y. Influence of air-knife wiping on coating thickness in hot-dip galvanizing. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2012;19(6):70–78. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60130-7](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60130-7)
  32. Xu P., Wang B., Ye J., Zhang H., Huang Z., Xu X. Research on the vibration of sheet metal near the zinc pot area in continuous hot-dip galvanizing line. *Applied Mechanics and Materials*. 2012;141:471–477. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.141.471>

33. Li J., Yan Y.-H., Guo X.-H., Wang Y.-Q. Research on vibration control method of steel strip for a continuous hot-dip galvanizing line. *ISIJ International*. 2012;52(6):1072–1079. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.1072>
34. Dombrowski S., Pereira A. Electromagnetic strip stabilization: EMG-EMASS® – technology, results, customer experiences, and future development. *50° Seminário de Laminação*. 2013:252–260.
35. Rajiv E.P., Jain N.C., Mahakalkar Nilesh, Pawar B.D. *Defects in continuous hot dip galvanized steel sheet and their remedies*. URL: <http://samoseyindia.in/web-english/galvn1.html> (дата обращения: 30.04.2023)
36. Yuan S., Zhou X., Huang Y., Yang P. Influence of air knives on liquid zinc flow in galvanising bath. *Ironmaking & Steelmaking*. 2016;43(2):83–87. <https://doi.org/10.1179/1743281215Y.0000000051>
37. Белов В.К., Кривко О.В., Губарев Е.В., Демчук Ф.А., Погонин Е.Ю., Самородова Э.Г. Выявление причин пыления покрытия при штамповке деталей из горячеоцинкованного листа. *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. 2021;12(1):99–103.  
Belov V.K., Krivko O.V., Gubarev E.V., Demchuk F.A., Pogonin E.Yu., Samorodova E.G. Identification of causes of coating dusting during stamping of parts from hot-dip galvanized sheet. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya*. 2021;12(1):99–103. (In Russ.).
38. Wang L., Tang D., Liu X., Zhang Y., Zhou S. Analysis of orange peel defects on hot-dip galvanized high strength low alloy steel. *Advanced Materials Research*. 2014;1004–1005: 221–226. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1004-1005.221>
39. Martínez-de-Pisón F.J., Sanz A., Martínez-de-Pisón E., Jiménez E., Conti D. Mining association rules from time series to explain failures in a hot-dip galvanizing steel line. *Computers & Industrial Engineering*. 2012;63(1):22–36. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.01.013>
40. Colla V., Matarese N., Cervigni F. Quality improvement in hot dip galvanizing line through hybrid case-based reasoning system. *UKSim 15<sup>th</sup> Int. Conf. on Computer Modelling and Simulation*. 2013:161–166. <https://doi.org/10.1109/UKSim.2013.24>
41. Yang H., Zhang S., Li J., Liu X., Wang H. Effect of strip entry temperature on the formation of interfacial layer during hot-dip galvanizing of press-hardened steel. *Surface & Coatings Technology*. 2014;240:269–274. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.12.040>

## Сведения об авторах

## Information about the Authors

**Михаил Юрьевич Рябчиков**, к.т.н., доцент кафедры автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ORCID: 0000-0001-5337-0951

E-mail: mr\_mgn@mail.ru

**Елена Сергеевна Рябчикова**, к.т.н., доцент кафедры автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ORCID: 0000-0001-6441-1157

E-mail: mika.elena@mail.ru

**Владимир Сергеевич Новак**, бакалавр кафедры автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

E-mail: Vladimir.novak.02@mail.ru

**Александр Евгеньевич Клименко**, магистр кафедры автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

E-mail: klimenko\_alexandr@mail.ru

**Mikhail Yu. Ryabchikov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Automated Control Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University

ORCID: 0000-0001-5337-0951

E-mail: mr\_mgn@mail.ru

**Elena S. Ryabchikova**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Automated Control Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University

ORCID: 0000-0001-6441-1157

E-mail: mika.elena@mail.ru

**Vladimir S. Novak**, Bachelor of the Chair of Automated Control Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University

E-mail: Vladimir.novak.02@mail.ru

**Aleksandr E. Klimenko**, Master Student of the Chair of Automated Control Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University

E-mail: klimenko\_alexandr@mail.ru

## Вклад авторов

## Contribution of the Authors

**М. Ю. Рябчиков** – разработка способа оценки влияния факторов на возникновение дефектов, сопоставление результатов исследования с известными причинами возникновения дефектов, выявление предполагаемых причин возникновения дефектов.

**Е. С. Рябчикова** – проведение аналитического обзора по тематике исследований, определение зависимостей вероятности возникновения дефектов от принятых факторов.

**В. С. Новак** – обработка экспериментальных данных, подготовка базы данных, оформление графических материалов и статьи.

**А. Е. Клименко** – поиск научных работ по тематике исследования.

**M. Yu. Ryabchikov** – developing the method for assessing the factors influence on defects occurrence, comparing the research results with the known causes of defects, identifying the alleged causes of defects.

**E. S. Ryabchikova** – analytical review on research topics, determining the defects probability dependences on accepted factors.

**V. S. Novak** – processing of experimental data, database preparation, design of graphic materials and text.

**A. E. Klimenko** – search for scientific papers on the research subject.

Поступила в редакцию 05.05.2023

После доработки 29.10.2023

Принята к публикации 12.12.2023

Received 05.05.2023

Revised 29.10.2023

Accepted 12.12.2023