

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ STANDARDIZATION, CERTIFICATION AND QUALITY MANAGEMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.793.5:620.191
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-93-104



ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ И НАТЯЖЕНИЯ СТАЛЬНОЙ ПОЛОСЫ НА ДЕФЕКТЫ ПРОДУКЦИИ АГРЕГАТОВ НЕПРЕРЫВНОГО ГОРЯЧЕГО ОЦИНКОВАНИЯ

Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Чута А.С., Васильева Е.И., Емелюшин А.Н.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Достижения последних лет в области управления термической обработкой стальной полосы на агрегатах непрерывного горячего оцинкования позволяют оптимизировать скорость линии под текущие производственные условия. Однако ошибки управления натяжением полосы при частых изменениях скоростного режима могут приводить к дефектам покрытия. **Цель работы.** Работа посвящена определению дефектов оцинкованного листового проката, появление которых может ограничить производительность агрегатов непрерывного горячего оцинкования вследствие проблем управления натяжением стальной полосы, и поиску причин возникновения таких дефектов. **Используемые методы.** Выполнен анализ данных о дефектах продукции одного из агрегатов непрерывного горячего оцинкования завода «ММК Metallurgy» в Турции. Для исключения влияния мешающих факторов при определении сопутствующих обстоятельств возникновения дефекта использовали стратификацию по мешающим параметрам, к которым отнесли вид дефекта, марку стали и толщину полосы. Для оценки воздействия факторов на частоту возникновения дефектов использовали тест Мантеля-Ханзела. **Новизна.** Анализ больших данных о дефектной и недефектной продукции за период порядка двух лет позволил применить стратификацию по многим мешающим факторам и выявить причины возникновения некоторых из дефектов. **Результат.** Определены допустимые и недопустимые дефекты, вероятность появления которых увеличивается с ростом скорости линии или уровнем её изменения. Показано влияние натяжения на вероятность возникновения этих дефектов и рассмотрены перспективы дальнейшего совершенствования систем управления натяжением стальной полосы. **Практическая значимость.** Полученные результаты являются основой дальнейшего совершенствования систем поддержки управления производством оцинкованного листового проката путем учета качества продукции.

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

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

© Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Чута А.С., Васильева Е.И., Емелюшин А.Н., 2023

Для цитирования

Влияние скорости движения и натяжения стальной полосы на дефекты продукции агрегатов непрерывного горячего оцинкования / Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Чута А.С., Васильева Е.И., Емелюшин А.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 93-104. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-93-104>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

INFLUENCE OF STEEL STRIP SPEED AND TENSION ON PRODUCT DEFECTS ON CONTINUOUS HOT-DIP GALVANIZING LINES

Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S., Chuta A.S., Vasilyeva E.I., Emelyushin A.N.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Recent advances in steel strip heat treatment control on continuous hot-dip galvanizing lines contribute to optimizing line speed for current production conditions. However, errors in strip tension control with frequent changes in speed conditions can lead to coating defects. **Objectives.** The paper is devoted to identifying defects in galvanized sheet products, which can limit the productivity of continuous hot-dip galvanizing lines due to problems in controlling steel strip tension, and searching for the causes of such defects. **Methods Applied.** The authors analyzed the data on defects in the products of one of the continuous hot-dip galvanizing lines of MMK Metalurji in Turkey. To exclude the influence of interfering factors, when determining the accompanying circumstances of occurrence of a defect, the stratification was used according to interfering parameters. Such parameters included a defect type, steel grade and strip thickness. The Cochran-Mantel-Haenszel test was used to assess the impact of factors on the defects frequency. **Originality.** By analyzing big data on defective and non-defective products over around two years, the authors applied the stratification according to many interfering factors and identified the causes of some defects. **Result.** The authors determined acceptable and unacceptable defects, whose probability increases with increasing line speed or the level of its change. The paper shows the influence of tension on the probability of occurrence of these defects and considers the prospects for further improvement of steel strip tension control systems. **Practical Relevance.** The results obtained are the basis for further improvement of support systems for production control of galvanized sheet products by factoring into the product quality.

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

The study was funded by grant No. 23-29-10058 of the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/23-29-10058/>.

For citation

Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S., Chuta A.S., Vasilyeva E.I., Emelyushin A.N. Influence of Steel Strip Speed and Tension on Product Defects on Continuous Hot-Dip Galvanizing Lines. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 93-104. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-93-104>

Введение

Оцинкованная стальная полоса – один из основных видов продукции металлургических предприятий с высокой добавочной стоимостью, который, например, широко используется в автомобильной и строительной промышленности [1, 2]. Спрос на данный вид продукции в течение последних десятилетий увеличивался. Так, в развитых странах доля оцинкованного проката в структуре потребления металлопродукции достигает 15% и более.

Повышение эффективности работы агрегатов непрерывного горячего оцинкования (АНГЦ) является важной задачей. До настоящего времени значительные усилия исследователей в данной области были сосредоточены на решении задач энергосбережения и повышения качества продукции. Известно значительное число недопустимых и допустимых дефектов оцинкованного листового проката, которые в той или иной степени снижают его коррозионную стойкость. При этом существует относительно мало работ в области оптимизации скорости движения полосы, несмотря на то, что увеличение производительности уже введенных в строй агрегатов непрерывного горячего оцинко-

вания при минимальных сопутствующих затратах является чрезвычайно актуальной задачей. Причиной этого является значительное число факторов, связанных как с мощностью систем нагрева и охлаждения металла при его термической обработке, так и с повышением вероятности получения дефектов продукции. Сложности учета всех технологических ограничений приводят к существенной роли человеческого фактора, что, в свою очередь часто приводит к неэффективности операций в плане производительности.

В то же время за последние годы были предложены новые решения в области управления термической обработкой [3, 4]. Это дает возможность повышения производительности при выполнении требований к термической обработке, но связь скорости движения полосы с дефектами по-прежнему изучена относительно слабо. Одной из причин этого является то, что влияние скорости движения полосы на возникновение некоторых дефектов связано с другими факторами. Если, например, параметры полосы и скорость ее движения оказывают совместное влияние на возникновение дефекта, то выявить влияние скорости может быть затруднительно.

Управление натяжением стальной полосы в различных секциях агрегата производится с учетом скорости движения полосы, ее толщины и ширины. Ошибки управления натяжением могут приводить к различным дефектам полосы. Вследствие этого представляет интерес оценка готовности существующих систем управления натяжением к повышению скорости движения полос толщиной более 1 мм. Для таких полос используемые в настоящее время скорости существенно ниже предельной для агрегата скорости.

Влияние натяжения на дефекты

В работе [5] указано, что тепловая нагрузка в секции нагрева АНГЦ существенно возрастает с ростом скорости движения полосы. Это увеличивает тепловую выпуклость валков, что может привести к смещению полосы. Стальная полоса, которая находится в печи, имеет пониженный предел текучести. Это может привести к тепловым короблениям вследствие изгибов из-за неравномерного распределения тепла. Основной причиной коробления полосы в печи является комбинированное воздействие высокой температуры и натяжения. Согласно [6], 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 деформация еще не получила развития. С ростом ширины полосы вероятность коробления возрастает, но повышение равномерности распределения температуры по ширине полосы позволяет избежать коробления только в низкотемпературном диапазоне.

Авторы [7] указывают, что для отсутствия царапин, притиров и вмятин необходимо точно поддерживать заданную скорость и крутящий момент. Причины колебаний натяжения могут быть различны. Согласно [7], требуется эффективная отработка возмущений от входного накопителя и предотвращения их попадания в печь путем управления изменением момента в натяжном узле и снижения пульсаций скорости. В [8] указывается, что из-за нагрева полоса в печи удлиняется. При этом также снижается твердость и увеличивается пластичность, а также вязкость стали. Это приводит к колебаниям полосы в промежутках между роликками в секциях нагрева и выдержки. В работе [9] указывается, что секция закрытого охлаждения отличается значительной протяженностью. Вследствие этого потоки охлаждающего газа могут приводить к колебаниям полосы при недостаточном ее натяжении. Учитывая, что при дрессировке полоса подвергается механическому воздействию, натяжение полосы на этом участке также может влиять на возникновение дефектов.

В [10] отмечается, что возмущения, возникающие в ванне и в секции закрытого охлаждения, а также

направляющие ролики в ванне влияют на смещение полосы в области газовых ножей. Даже при использовании систем электромагнитной стабилизации полосы перед газовыми ножами следует учитывать, что, согласно [11], толщина полосы и параметры стали оказывают значительное влияние на управление стабилизацией. Вследствие этого натяжение полосы на участке газовых ножей может оказывать влияние на возникновение дефектов. Согласно [12], вибрации полосы вблизи газового ножа могут привести к нарушению заданной толщины цинкового покрытия. Авторы указывают, что причинами вибраций являются движения роликков в расплаве, а также несовершенство систем управления натяжением полосы. В работе [13] авторы отмечают, что подавить вибрацию полосы в окрестностях газовых ножей оказывается существенно сложнее с ростом скорости движения полосы. При этом скорость оказывает существенное влияние на амплитуду колебаний полосы. Большее натяжение позволяет ограничить максимальную амплитуду колебаний. Авторы [13] также отмечают, что при исследовании вибраций влиянием расплавленного цинка можно пренебречь. Увеличение жесткости опор контактных валков также способствует уменьшению амплитуды вибраций.

В работе [14] исследуется влияние ряда факторов на возникновение желательного дефекта – блесок. Показано, что натяжение полосы, а также ряд других факторов (толщина полосы, концентрации свинца и сурьмы в цинковой ванне, давление воздуха на верхнем и нижнем ножах, вес покрытия) влияют на возникновение этого дефекта. В [15] получено, что блеск оцинкованного листа увеличивается до скорости движения полосы 100 м/мин и далее имеет тенденцию к уменьшению. Возможно, полученный результат является следствием изменения натяжения, которое сопутствует изменению скорости.

Материалы и методы исследования

Рассматриваемый АНГЦ. Рассматриваемый агрегат непрерывного горячего цинкования функционирует на заводе «ММК Metallurgy» в Турции. Агрегат предназначен для обработки полос толщиной от 0,25 до 3 мм. Технологическая часть агрегата включает в свой состав секции для: очистки полосы в ванне со щелочью; прямого нагрева полосы; термической выдержки в печи косвенного нагрева; закрытого охлаждения в атмосфере защитного газа; нанесения цинкового покрытия; обжарки с малым усилием при дрессировке. Значительная часть сортамента (порядка 60%) имеет толщину более 1 мм. Такая продукция обрабатывается при скоростях существенно ниже предельного для агрегата уровня 180 м/мин. Поэтому актуально выявление ограничений производительности, связанных с возникновением дефектов при росте скорости движения полосы.

Анализируемые дефекты. Исходя из известных особенностей влияния натяжения полосы на дефекты, их можно подразделить на две группы. Дефекты первой группы предположительно могут быть связаны с механическим повреждением стальной полосы до или после нанесения цинкового покрытия. Список подобных дефектов для условий рассматриваемого агрегата представлен в **табл. 1**. Ко второй группе отнесем дефекты, на которые может влиять вибрация полосы при прохождении газовых ножей, где происходит удаление лишнего цинка и формируется покрытие требуемой толщины. Такие дефекты показаны в **табл. 2**. Представленные в таблицах дефекты имеют разный уровень допустимости. В **табл. 1, 2** показана вероятность возникновения дефектов для рулонов, отнесенных к браку ($P_{\text{брак}}$, %), где видно, что пятна без покрытия и неравномерность покрытия являются основными недопустимыми дефектами, при которых продукцию обычно относят к браку.

Способ определения сопутствующих обстоятельств дефекта. В рамках данной работы поставлена задача изучения ограничений на скорость движения полосы и, соответственно, производительность. Однако скорость движения полосы выбирают с учетом ее толщины для обеспечения требуемой термической обработки при ограниченной мощности систем нагрева и охлаждения. Вследствие этого различие

скорости для дефектной и недефектной продукции может быть обусловлено связью дефекта с сортаментом, а не скоростью. Для исключения влияния мешающих факторов использовали стратификацию по мешающим параметрам, к которым отнесли вид дефекта, марку стали и толщину полосы. Определение сопутствующих обстоятельств возникновения дефектов проводили в два этапа.

На первом этапе для оценки объединенного воздействия каждого из факторов на частоту возникновения дефектов использовали тест Мантеля-Ханзела с поправкой на непрерывность и тест Вульфа. Тест Мантеля-Ханзела использовали для проверки гипотезы о равенстве всех рисков в стратах единице (оценка значимости влияния фактора). Тест Вульфа использовали для оценки однородности рисков. В качестве фактора риска принимали среднюю для рулона скорость движения полосы либо перепад скорости за время обработки рулона. По результатам первого этапа отбирали такие дефекты, вероятность появления которых увеличивается с ростом скорости либо ее перепада за время обработки рулона. Например, на **рис. 1** показаны плотности распределения скорости движения полосы при определенной толщине полосы ($h_m = 0,5$ мм) для продукции с дефектом D9 (неравномерность покрытия) и без него для стали DX51D. Вероятность дефекта увеличивается с ростом скорости.

Таблица 1. Дефекты, которые могут быть связаны с механическими повреждениями

Table 1. Defects that may be associated with mechanical damage

Номер	Обозначение (англ. / тур.)	Дефект	$P_{\text{брак}}$, %
Недопустимые дефекты			
D1	Uncoated Spots / Kaplama Almama	Пятна без покрытия	25,90
D2	Damage Marks / Markalama Izi (Darbe Izi)	Следы ударов (надав)	8,40
D3	Dent / Batik (Batma Boslugu)	Вмятины (отпечатки)	4,87
D4	Edge Roughness / Kenar Puruzlulugu	Неровности кромки	2,71
Допустимые дефекты			
D5	Snout Marks / Surtunme Izi	Потертость	6,23
D6	Scratch / Cizik	Царапины	4,06
D7	Sink Roll Marks / Sink Roll Merdane Izi	Следы ролика	2,98
D8	Skin pass mill break-marks / SPM Kirigi	Отметины дрессировки	1,62

Таблица 2. Дефекты, которые могут быть связаны с вибрацией полосы в области газовых ножей

Table 2. Defects that may be associated with strip vibration in the area of gas knives

Номер	Обозначение (англ. / тур.)	Дефект	$P_{\text{брак}}$, %
Недопустимые дефекты			
D9	Rough Coating / Pas Kaynakli Puruzlu Kaplama	Неравномерность покрытия	22,28
Допустимые дефекты			
D10	Ocean Wave / Yuzey Akintisi (Dalgali Kaplama)	Волнообразное покрытие	16,26
D11	Ridge / Ridge	Наплывы цинка	8,94

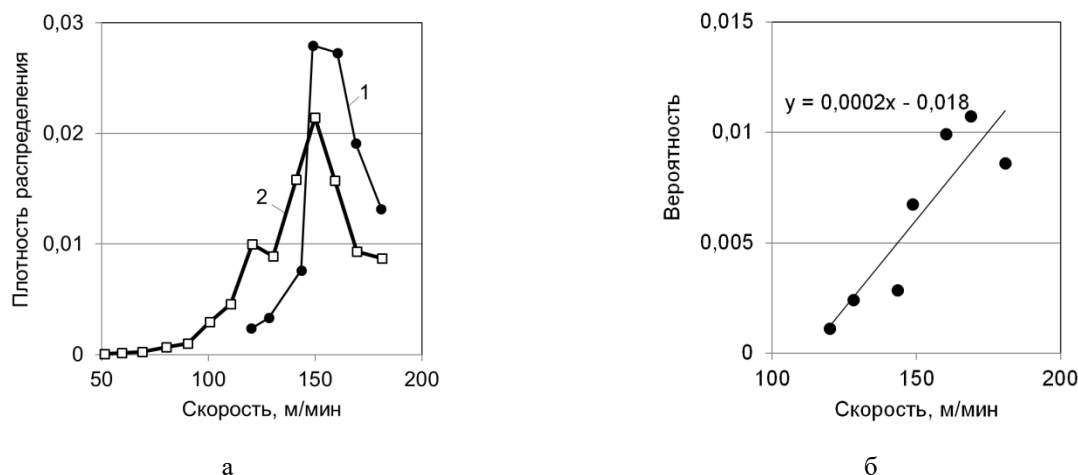


Рис. 1. Плотности распределения скорости (а) для продукции с дефектом (кривая 1) и без него (кривая 2) и зависимость вероятности дефекта от скорости (б) при толщине полосы $h_m \approx 0,5$ мм

Fig. 1. Probability density functions of speed (a) for defective products (curve 1) and non-defective products (curve 2) and the relation between probability of defects and speed (б) at strip thickness $h_m \approx 0.5$ mm

На втором этапе, в зависимости от результатов первого этапа, к мешающим факторам при стратификации дополнительно относили либо скорость, либо ее перепад за время обработки рулона. Для дефектов, возникновение которых может быть связано с вибрацией полосы в области газовых ножей, в качестве мешающего фактора дополнительно учитывали толщину покрытия. Факторы риска на втором этапе характеризуют натяжение полосы на разных участках агрегата.

На обоих этапах гипотезу о равенстве всех рисков в стратах единице (об отсутствии влияния) отвергали, если для всех парных комбинаций страт границы доверительного интервала (расчет по методу Робинса), определяемые вероятностью попадания 95%, не охватывали единицу.

Исходные данные. В качестве исходных данных использовалась информация об агрегированных значениях технологических параметров, которых характеризуют среднее, минимальное и максимальное за время обработки рулона значения параметра, а также данные о наличии у рулонов дефектов за период 2020-2021 годов на заводе «ММК Metallurgy» в Турции. Использовались данные по стали DX51D ($[C] < 0,12\%$; $[Si] < 0,5\%$; $[Mn] < 0,6\%$; $[P] < 0,01\%$; $[S] < 0,045\%$; $Ti < 0,3\%$).

Характеризующие натяжение полосы факторы риска. В качестве факторов, которые характеризуют сопутствующие обстоятельства появления дефекта кроме скорости, толщины полосы и покрытия, приняли ряд величин (табл. 3). Величины представляют собой значения натяжения полосы в различных секциях агрегата, агрегированные за время обработки рулона.

Исходя из проведенного обзора, недостаточное натяжение полосы может являться одной из основных причин появления дефектов. Поэтому выбранные факторы Ф1-Ф4 характеризуют минимальное для рулона натяжение на входе секций. Для оценки влияния управления натяжением в переходных режимах на качество продукции приняли факторы Ф5-Ф8, характеризующие перепад натяжения за время обработки

рулона. Факторы Ф10-Ф13 используются для оценки влияния на качество совместного управления натяжением в соседних секциях.

Полученные результаты и их обсуждение

Дефекты, на возникновение которых влияет скорость движения полосы. После изучения влияния на возникновение дефектов скорости движения полосы и уровня ее изменения за время обработки рулона получено, что с ростом значений данных факторов вероятность появления увеличивается только для некоторых из дефектов (табл. 4).

Дефекты D1, D2, D3, которые предположительно могут быть вызваны механическими повреждениями полосы, демонстрируют связь с изменением скорости при обработке рулона. С ростом скорости вероятность этих дефектов снижается до пренебрежимо малого уровня, что может быть связано с особенностями управления натяжением. Вероятность появления дефектов D9, D11, на которые предположительно влияет вибрация полосы в области газовых ножей, увеличивается с ростом скорости.

Влияние факторов на возникновение дефектов. В табл. 5 указаны факторы риска, которые демонстрируют значимую связь с вероятностью появления дефектов при определенных комбинациях толщины полосы, скорости ее движения либо изменения скорости за время обработки рулона. Из таблицы следует, что вероятность появления дефектов, которые предположительно вызваны механическими воздействиями, демонстрирует связь с натяжением полосы во многих секциях. Связь с вероятностью дефектов D9 и D10 показывает малое число рассматриваемых факторов. Перепад натяжения за время обработки рулона на входе в цинковую ванну (Ф6) и перепад натяжения между секцией дрессировки и правильно-растяжной машиной (Ф12) не показали связи с рассматриваемыми дефектами.

Таблица 3. Факторы для определения сопутствующих обстоятельств появления дефекта
Table 3. Factors for determining accompanying circumstances of the defect

Номер фактора	Величина
Ф1, Ф2, Ф3, Ф4	Минимальное для рулона натяжение полосы на входе в секции: термической обработки; цинковой ванны; дрессировки; правильно-растяжной машины
Ф5, Ф6, Ф7, Ф8	Разница между максимальным и минимальным за время обработки рулона натяжением полосы на входе в те же секции
Ф9	Среднее для рулона натяжение полосы на входе наматывателя
Ф10, Ф11, Ф12, Ф13	Разница между средним за время обработки рулона натяжением на входе соседних секций (Ф10 – разница между натяжением на входе секций термической обработки и цинковой ванны и т.д.)

Таблица 4. Дефекты, вероятность появления которых увеличивается с ростом скорости или уровнем ее изменения за время обработки рулона
Table 4. Defects, whose probability increases with increasing speed or the level of its change during coil coating

Номер дефекта	Дефект	Увеличение вероятности дефекта при		
		росте скорости	снижении скорости	изменении скорости
D1	Участки без покрытия	Нет	Да	Да
D2	Следы ударов (надав)	Нет	Да	Да
D3	Вмятины (отпечатки)	Нет	Да	Да
D9	Неравномерность покрытия	Да	Нет	Нет
D11	Наплывы цинка	Да	Нет	Нет

Таблица 5. Факторы, которые потенциально могут влиять на возникновение дефекта
Table 5. Factors that can potentially influence occurrence of a defect

Дефект	Факторы												
	Ф1	Ф2	Ф3	Ф4	Ф5	Ф6	Ф7	Ф8	Ф9	Ф10	Ф11	Ф12	Ф13
D1 – Участки без покрытия	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+		+
D2 – Следы ударов (надав)	+	+	+	+			+	+	+	+	+		
D3 – Вмятины (отпечатки)	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+		
D9 – Неравномерность покрытия		+	+							+	+		
D11 – Наплывы цинка			+										

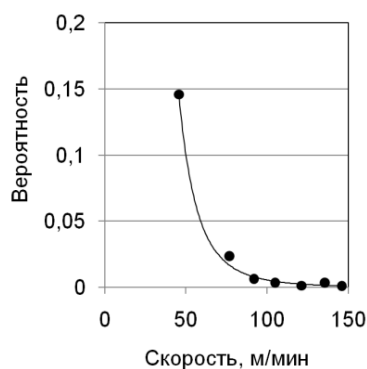
D1, D2, D3 – Участки без покрытия, Следы ударов и Вмятины. Особенности влияния многих факторов схожи для данных дефектов, включая влияние скорости и ее изменения. В качестве примера на рис. 2 показана зависимость вероятности вмятин от средней скорости и ее перепада за время обработки рулона. Схожие зависимости характерны для всех трех дефектов.

Факторы Ф1-Ф4, Ф9 оказывают схожее влияние на каждый из дефектов D2, D3. Снижение натяжения сопровождается ростом вероятности дефекта для полос толщиной 0,8-1,5 мм, где скорость обработки часто ниже 100 м/мин. В качестве примера на рис. 3 показаны функции плотности распределения Ф3 для продукции с дефектом D2 и без такого дефекта.

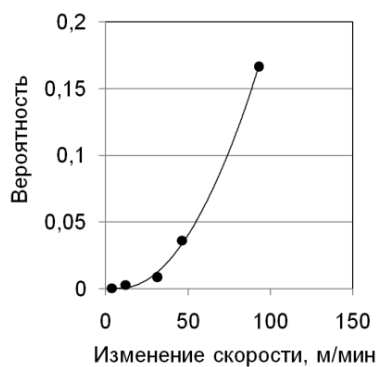
Отмеченная тенденция выполняется также и для дефекта D1 (участки без покрытия). Однако, в отличие

от D2, D3, влияние уровня натяжения на вероятность D2 неоднозначно. При толщине полосы 1,8-2,5 мм повышение натяжения сопровождается ростом вероятности дефекта D1. Данная тенденция выполняется для факторов Ф1, Ф2, Ф4, Ф9.

Факторы Ф5-Ф8 также оказывают схожее влияние на вероятность дефектов D1, D2, D3. С ростом перепада натяжения за время обработки рулона вероятность дефекта увеличивается. Для дефекта D1 условия применимости тенденции зависят от фактора (Ф5 – для полос толщиной более 2 мм; Ф7 – тенденция всегда применима; Ф8 – для полос толщиной 0,8-1,5 мм). Для дефекта D2 тенденция возникает применительно к факторам Ф7-Ф8 при скорости менее 70 м/мин. Для дефекта D3 условия применимости тенденции также зависят от фактора (Ф5, Ф7 – для полос толщиной более 2 мм; Ф8 – при скорости менее 70 м/мин).



а



б

Рис. 2. Зависимости вероятности вмятин (D3) 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. 2. Dependences between the probability of dents (D3) and: a) speed at $h_m [0.8; 0.9]$ mm; б) speed changes at $h_m \approx 0.8$ mm and 110 m/min

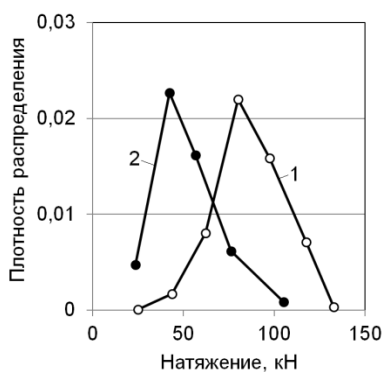


Рис. 3. Функции плотности распределения F_3 для продукции с дефектом D2 (кривая 2) и без такого дефекта (кривая 1) при толщине полосы 0,8-1,2 мм, скорости 55-70 м/мин и весе покрытия 50-70 г/м²

Fig. 3. Distribution density functions F_3 for products with a D2 defect (curve 2) and without such defect (curve 1) at a strip thickness of 0.8-1.2 mm, a speed of 55-70 m/min, and a coating weight of 50-70 g/m²

Изучение влияния натяжения на вероятность дефекта при разном уровне перепада скорости движения полосы ограничено объемом экспериментальных данных. Вследствие этого удалось получить только некоторые индивидуальные для дефектов тенденции. Так, для дефекта D2 при больших перепадах скорости влияние натяжения на вероятность дефекта больше, но только для относительно тонких полос. Для дефекта D3 повышение натяжения при низком перепаде скорости для полос толщиной более 2 мм приводит к росту вероятности дефекта.

Изучение влияния разницы между натяжением полосы на входе соседних секций также показало наличие общей тенденции для дефектов D1, D2, D3. Для полос толщиной 0,8-1,5 мм при скорости менее 70 м/мин дефектная продукция имеет меньшее различие натяжения между соседними секциями. Наиболее сильно эта особенность выражена для дефекта D1 применительно к факторам Φ_{11} - Φ_{12} (рис. 4).

В целом сопутствующие обстоятельства возникновения дефектов D1, D2, D3 в высокой степени схожи. Предположительно дефекты имеют общие причины возникновения, связанные с особенностями управления натяжением.

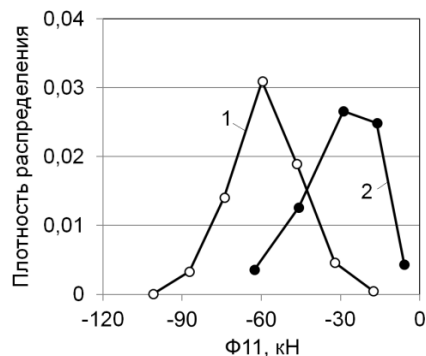


Рис. 4. Функции плотности распределения Φ_{11} для продукции с дефектом D1 (кривая 2) и без такого дефекта (кривая 1) при толщине полосы 0,8-1,2 мм, скорости 45-70 м/мин

Fig. 4. Distribution density functions F_{11} for products with a D1 defect (curve 2) and without such defect (curve 1) at a strip thickness of 0.8-1.2 mm, a speed of 45-70 m/min

D9 – Неравномерность покрытия. Данный дефект обычно ассоциируется с процессами в цинковой ванне и может быть связан, например, с повышенной температурой металла на входе в ванну и диффузией железа через ингибирующий межфазный слой Fe-Al [16]. Вероятность дефекта увеличивается с ростом толщины и скорости движения полосы (рис. 5, а). Также вероятность дефекта увеличивается с ростом толщины покрытия.

Результаты изучения совместной плотности показали связь вероятности дефекта с факторами Φ_2 и Φ_3 (натяжение перед цинковой ванной и секцией дрессировки). С ростом толщины покрытия все большая

доля дефектов получена при низком натяжении. При большой толщине покрытия (вес 275 г/м^2) все дефекты получены при минимальном используемом для такой продукции натяжении (рис. 5, б).

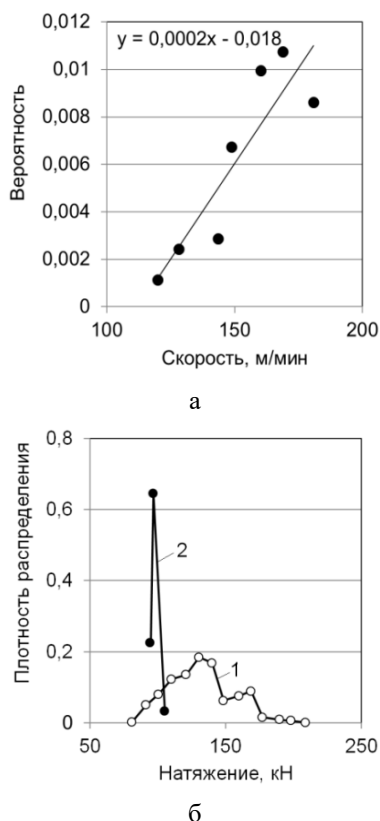


Рис. 5. Зависимость вероятности дефекта D9 от скорости при толщине полосы 0,5 мм (а), плотности распределения Ф3 для продукции с дефектом D9 (кривая 2) и без такого дефекта (кривая 1) при толщине полосы 2 мм, скорости 65 м/мин, весе покрытия 275 г/м^2 (б)

Fig. 5. Dependence between the D9 defect probability and the speed at a strip thickness of 0.5 mm (a), distribution density F3 for products with a D9 defect (curve 2) and without such defect (curve 1) at a strip thickness of 2 mm, a speed of 65 m/min, and a coating weight of 275 g/m^2 (б)

D11 – Наплывы. Данный дефект может быть обусловлен различными причинами. Неровности исходной поверхности, наличие царапин на исходной полосе могут приводить к появлению областей с более толстым покрытием [17, 18]. В [19] указывается, что причиной наплывов является в том числе накопление цинковой пыли в носке выходного желоба печи АНГЦ вследствие пониженной точки росы. Согласно [20], появление донного шлака в ванне цинкования делает расплав более вязким и приводит к появлению наплывов. Авторы [21] связывают наплывы с сильной вибрацией полосы, расплескиванием расплава и забиванием воздушных ножей расплавом, что требует коррекции натяжения и скорости движения полосы.

Изучение исходных данных показало, что со снижением скорости вероятность дефекта снижается (рис. 6, а). Получено, что вероятность возникновения дефекта зависит от толщины полосы только при скорости менее 90 м/мин. Изучение влияния натяжения показало связь с единственным фактором – Ф3 (натяжение на входе секции дрессировки). Получено, что у тонких полос (толщина менее 0,5 мм) изменение натяжения в характерном для таких полос диапазоне не позволяет уменьшить дефект. Для полос с толщиной более 1,5 мм натяжение всегда влияет на возникновение дефекта. С ростом натяжения вероятность возникновения дефекта снижается. При толщине полосы в диапазоне 0,8-1,5 влияние натяжения проявляется при более высоких скоростях движения полосы (рис. 6, б). Полученные результаты позволяют предположить, что одной из причин возникновения наплывов могут быть вибрации.

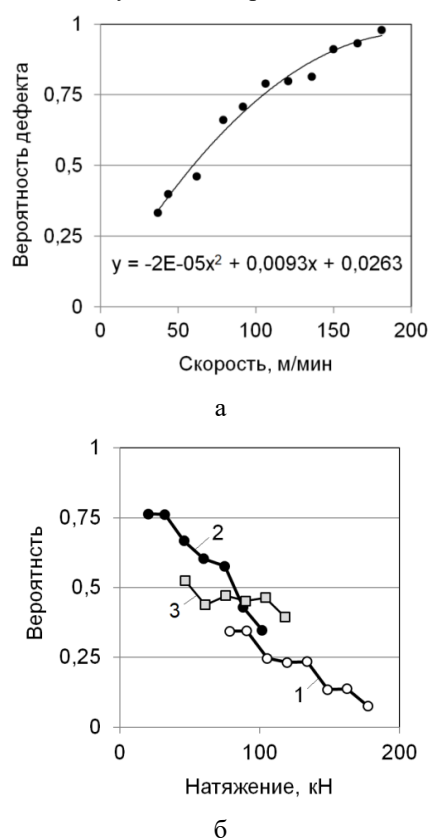


Рис. 6. Зависимость вероятности появления наплывов (D11) от: а – скорости при толщине полосы 0,5 мм; б – натяжения на входе секции дрессировки (1 – толщина 1,8-2 мм, скорость 60 м/мин; 2, 3 – толщина 0,8-1,5 мм, скорости соответственно 100-130 и 75-80 м/мин)

Fig. 6. Dependence between the sagging (D11) probability and: a) speed at a strip thickness of 0.5 mm; б) tension at the entry of the skin pass section (1 is a thickness of 1.8-2 mm, 60 m/min; 2, 3 is a thickness of 0.8-1.5 mm, 100-130 m/min and 75-80 m/min, respectively)

Направления совершенствования управления натяжением. Исходя из полученных результатов, для снижения вероятности возникновения дефектов D1, D2 и D3 необходимо повышение натяжения полосы. Однако при управлении натяжением следует учитывать ресурс оборудования. Согласно [8], уменьшение заданного натяжения на участке погружного оборудования приводит к существенному росту срока службы погружного ролика, но низкий уровень натяжения может не обеспечить требуемой устойчивости движения полосы. При этом также следует учитывать усилия при изменении скорости движения полосы. Для выявления сверхнормативных нагрузок на оборудование авторы [8] разработали модель взаимосвязанных электроприводов. Для устранения сверхнормативной нагрузки на погружное оборудование предложено снижение натяжения, что увеличило срок службы погружного ролика. При этом связь предложения с дефектами не рассматривается. В то же время натяжение на данном участке (Ф2, Ф3) оказывает влияние на все дефекты, которые, согласно полученным результатам, имеют связь со скоростью движения полосы и ее перепадами. Обоснованный выбор натяжения на участке требует прогноза ресурса службы погружного оборудования в различных условиях.

По-видимому, натяжение на участке воздушных ножей является одним из немногих факторов, который позволяет уменьшить наплывы цинка при высокой производительности по металлу. Несмотря на то, что данный дефект часто относят к допустимым дефектам, его наличие снижает, согласно [22], коррозионную стойкость на 20%. В то же время увеличение натяжения не является основным способом подавления вибраций. Следует ожидать, что вибрации будут устранены на основе дальнейшего совершенствования систем электромагнитной стабилизации полосы.

Согласно полученным результатам, для дефекта D1 (участки без покрытия) возможен рост вероятности дефекта с увеличением натяжения. Согласно [23], увеличение натяжения может приводить к двум последствиям, которые могут послужить причиной дефекта. Если сила натяжения превышает силу трения, то полоса может проскальзывать по ролику и наступает пробуксовка. Если сила натяжения меньше или равна силе трения, то вследствие увеличения натяжения полоса получит дополнительное удлинение. Так как D1 относится к недопустимым дефектам, то увеличение натяжения для устранения дефектов требует расчетов для определения условий возникновения пробуксовки.

В работе [9] авторы указывают на необходимость минимизации колебаний натяжения в периоды изменения скорости движения полосы. Учитывая наличие связи дефектов D1, D2, D3 с уровнем перепада натяжения за время обработки рулона, решение данной задачи актуально. Авторами [9] определено, что амплитуда колебаний натяжения зависит от темпа изменения скорости, который определяется темпом изменения задания на скорость. По-видимому, наличие

проблем стабилизации натяжения является одним из факторов, затрудняющих использование скорости как ресурса оперативной коррекции режимов термической обработки стали. Несмотря на то, что такие решения известны [6], их применение в настоящий момент может быть связано с ростом доли дефектной продукции. Для обоснованного ограничения темпа изменения скорости требуется дальнейшее изучение его влияния на вероятность возникновения дефектов с использованием временных рядов данных. Основой для определения рационального темпа изменения скорости могут являться модели образования трещин в покрытии, рассмотренные в [24], предполагающие применение метода блочных элементов.

Заключение

В результате работы определены дефекты, вероятность возникновения которых может увеличиться с ростом скорости движения полосы (неравномерность покрытия, наплывы) или уровня ее изменения за время обработки рулона (участки без покрытия, следы ударов, вмятины) вследствие особенностей управления натяжением. Показано, что натяжение полосы на участке цинковой ванны и газовых ножей влияет на множество дефектов. Для обоснованного выбора натяжения необходим прогноз ресурса службы погружного оборудования в различных условиях. Кроме того, следует учитывать, что не только снижение натяжения, но и его рост может являться причиной появления недопустимого дефекта – участков без покрытия.

Получено, что вероятность появления таких недопустимых дефектов, как участки без покрытия, следы ударов, вмятины, зависит от перепадов скорости и натяжения полосы в различных секциях агрегата. С учетом этого целесообразно проведение дальнейших исследований, направленных на снижение колебаний натяжения в периоды изменений скорости и изучение влияния темпа изменения скорости на вероятность возникновения дефектов.

Список источников

1. Освоение производства высокопрочного проката для автомобилестроения в ОАО «ММК» / Никифоров Б.А., Салганик В.М., Денисов С.В., Степанов П.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. Т. 16. № 4. С. 41-45.
2. Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Новак В.С. Гибридная модель для упреждающего управления температурой металла при горячем оцинковании стальной полосы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2023. Т. 24. №8. С. 421-432.
3. 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, vol. 55, no. 1, pp. 182-191.
4. Strip cooling control for flexible production of galvanized flat steel / Ryabchikov M.Y., Ryabchikova E.S.,

- Shmanev D.E., Kokorin I.D. // *Steel in Translation*. 2021, vol. 51, no. 7, pp. 446-455.
5. Sahay S.S., Kapur P.C. Model based scheduling of a continuous annealing furnace // *Ironmaking and Steelmaking*. 2007, vol. 34, no. 3, pp. 262-268.
 6. Kazuhiro Yahiro, Hiroyasu Shigemori, Kazuhiro Hirohata. Development of Strip Temperature Control System for a Continuous Annealing Line // *Proceedings of IECON '93 – 19th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*. 2002, pp. 481-486. DOI: 10.1109/IECON.1993.339029
 7. Advanced Electric Drive Control System of Continuous Hot-Dip Galvanizing Line / Kornilov G.P., Abdulvelev I.R., Khramshin T.R., Shokhin V.V. // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi, 2020. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111905
 8. Исследование режимов работы взаимосвязанных электроприводов агрегата непрерывного горячего цинкования / Фатхуллин Д.А., Николаев А.А., Камаев А.П., Минеев Е.В., Вахитов Т.Ю. // *Известия вузов. Электромеханика*. 2009. №1. С. 81-83.
 9. Повышение качества регулирования натяжения полосы агрегата непрерывного горячего цинкования / Корнилов Г.П., Абдулвелеев И.Р., Шохин В.В., Храмшин Т.Р., Николаев А.А. // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика»*, 2020. Т. 20. №2. С. 120-126. DOI: 10.14529/power200211
 10. Фонтен П. Бесконтактная электромагнитная стабилизация полосы в линиях цинкования // *Металлургическое производство и технология*. 2010. №2. С. 40-49.
 11. Magnetic actuator design for strip stabilizers in hot-dip galvanizing lines: Examining rules and basic tradeoffs / Marko L., Saxinger M., Steinboeck A., Kugi A. // *IEEE Industry Applications Magazine*. 2020, vol. 26, no. 2, pp. 54-63. DOI: 10.1109/MIAS.2019.2943662
 12. Research on the Vibration of Sheet Metal near the Zinc Pot Area in Continuous Hot-dip Galvanizing Line / Peimin Xu, Biao Wang, Jinjie Ye, Haijuan Zhang, Zhilai Huang, Xiaokui Xu // *Applied Mechanics and Materials*. 2012, vol. 141, pp. 471-477. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.141.471
 13. Research on Vibration Control Method of Steel Strip for a Continuous Hot-dip Galvanizing Line / Jian Li, Yun-Hui Yan, Xing-Hui Guo, Yan-Qing Wang // *ISIJ International*. 2012, vol. 52, no. 6, pp. 1072-1079.
 14. Monojit Dutta, Ananya Mukhopadhyay, Shantanu Chakrabarti. Effect of Galvanising Parameters on Spangle Size Investigated by Data Mining Technique // *ISIJ International*. 2004, vol. 44, no. 1, pp. 129-138.
 15. Affecting Factors on Gloss Value for Galvanized Cold Rolled Sheets / Özgür Karakaş, Erdogan Kanca, İbrahim Göçer, Alper Akün, Erkan Püğe, Güzin Müge Lüle, Ali Doğan, Ahmet Özdemir // 3rd Iron and Steel Symposium (UDCS'17). Turkey: Karabuk, 2017, pp. 233-237.
 16. Sawaitul Pranay, 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, vol. 2, no. 1, pp. 45-51.
 17. Saravanan P., Srikanth S. Surface Defects and their Control in Hot Dip Galvanized and Galvannealed Sheets // *International Journal of Advanced Research in Chemical Science (IJARCS)*. 2018, vol. 5, no. 11, pp. 11-23.
 18. İlhami Pektaş. Galvaniz hataları ve çözüm önerileri. Ankara, 2020. 76 p.
 19. Клещева С.Е., Касаткина Е.Г. Анализ уровня качества оцинкованного металлопроката в ЛПЦ-11 ПАО «ММК» // *Качество в обработке материалов*. 2019. Т. 11. №1. С. 18-23.
 20. Радионова Л.В., Субботина Ю.М. Преимущества и недостатки способа горячего оцинкования стальной полосы. Проблемы цинкования // *Машиностроение: сетевой электронный журнал*. 2013. №2. С. 3-9.
 21. Бережная Г.А., Заруцкая А.О., Каримова Д.Ю. Анализ качества горячеоцинкованной полосы в ЛПЦ-11 ОАО «ММК» // *Качество в обработке материалов*. 2016. Т. 6. №2. С. 39-42.
 22. Metallurgical assessment of critical defects in continuous hot dip galvanized steel sheets / Azimi A., Ashrafizadeh F., Toroghinejad M.R., Shahriari F. // *Surface & Coatings Technology*. 2012, vol. 206, no. 21, pp. 4376-4383.
 23. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л. О настройке натяжных многороликовых устройств при обработке полосового проката // *Сталь*. 2014. №1. С. 49-51.
 24. On the influence of multiple surface defects on the behavior of media of different rheology / Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M., Telyatnikov I.S. // *Materials Physics and Mechanics*. 2020, vol. 44, pp. 306-315.

References

1. Nikiforov B.A., Salganik V.M., Denisov S.V., Stekanov P.A. Learning the production of high-strength rolled products for the automotive industry at OJSC MMK. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2006;16(4):41-45. (In Russ.)
2. 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* [Mechatronics, Automation, Control]. 2023;24(8):421-432. (In Russ.)
3. 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.
4. Ryabchikov M.Y., Ryabchikova E.S., Shmanev D.E., Kokorin I.D. Strip cooling control for flexible produc-

- tion of galvanized flat steel. *Steel in Translation*. 2021;51(7):446-455.
5. Sahay S.S., Kapur P.C. Model based scheduling of a continuous annealing furnace. *Ironmaking and Steelmaking*. 2007;34(3):262-268.
 6. Kazuhiro Yahiro, Hiroyasu Shigemori, Kazuhiro Hirohata. Development of strip temperature control system for a continuous annealing line. *Proceedings of IECON '93 - 19th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*. 2002;481-486. DOI: 10.1109/IECON.1993.339029
 7. Kornilov G.P., Abdulveleev I.R., Khramshin T.R., Shokhin V.V. Advanced electric drive control system of continuous hot-dip galvanizing line. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi, 2020. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111905
 8. Fatkhullin D.A., Nikolaev A.A., Kamaev A.P., Mineev E.V., Vakhitov T.Yu. Study on the operating modes of interlocked electric actuators of the hot dip galvanizing line. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika [Proceedings of Universities. Electromechanics]*. 2009;(1):81-83. (In Russ.)
 9. Kornilov G.P., Abdulveleev I.R., Shokhin V.V., Khramshin T.R., Nikolaev A.A. Improving the quality of strip tension adjustment on the hot dip galvanizing line. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Energetika» [Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering]*. 2020;20(2):120-126. DOI: 10.14529/power200211. (In Russ.)
 10. Fontaine P. Non-contact electromagnetic strip stabilization on galvanizing lines. *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tekhnologiya [Metallurgical Production and Technology]*. 2010;(2):40-49. (In Russ.)
 11. Marko L., Saxinger M., Steinboeck A., Kugi A. Magnetic actuator design for strip stabilizers in hot-dip galvanizing lines: Examining rules and basic tradeoffs. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2020;26(2):54-63. DOI: 10.1109/MIAS.2019.2943662
 12. Peimin Xu, Biao Wang, Jinjie Ye, Haijuan Zhang, Zhilai Huang, Xiaokui Xu. 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. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.141.471
 13. Jian Li, Yun-Hui Yan, Xing-Hui Guo, Yan-Qing Wang. Research on vibration control method of steel strip for a continuous hot-dip galvanizing line. *ISIJ International*. 2012;52(6):1072-1079.
 14. Monojit Dutta, Ananya Mukhopadhyay, Shantanu Chakrabarti. Effect of galvanising parameters on spangle size investigated by data mining technique. *ISIJ International*. 2004; 44(1):129-138.
 15. Özgür Karakaş, Erdogan Kanca, İbrahim Göçer, Alper Akün, Erkan Püğe, Güzin Müge Lüle, Ali Doğan, Ahmet Özdemir. Affecting factors on gloss value for galvanized cold rolled sheets. 3rd Iron and Steel Symposium (UDCS'17). Turkey: Karabuk, 2017, pp. 233-237.
 16. Sawaitul Pranay, 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.
 17. 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.
 18. İlhami Pektaş. Galvaniz hatalari ve çözüm önerileri. Ankara. 2020. ISBN: 978-605-80004-0-7
 19. Kleshcheva S.E., Kasatkina E.G. Analysis of the quality of galvanized steel products at Rolling Shop No. 11 of PJSC MMK. *Kachestvo v obrabotke materialov [Quality in Materials Treatment]*. 2019;11(1):18-23. (In Russ.)
 20. Radionova L.V., Subbotina Yu.M. Advantages and disadvantages of a hot dip galvanizing method for steel strips. *Mashinostroenie: setevoy elektronny zhurnal [Mechanical Engineering: Network Electronic Journal]*. 2013;(2):3-9. (In Russ.)
 21. Berezhnaya G.A., Zarutskaya A.O., Karimova D.Yu. Analysis of the quality of hot dip galvanized strips at Rolling Shop No. 11 of OJSC MMK. *Kachestvo v obrabotke materialov [Quality in Materials Treatment]*. 2016;6(2):39-42. (In Russ.)
 22. Azimi A., Ashrafizadeh F., Toroghinejad M.R., Shariari F. Metallurgical assessment of critical defects in continuous hot dip galvanized steel sheets. *Surface & Coatings Technology*. 2012;206(21):4376-4383.
 23. Maksimov E.A., Shatalov R.L. Adjusting multi-roll bridles, when treating rolled strips. *Stal [Steel]*. 2014;(1):49-51. (In Russ.)
 24. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M., Telyatnikov I.S. On the influence of multiple surface defects on the behavior of media of different rheology. *Materials Physics and Mechanics*. 2020;44:306-315.

Поступила 13.09.2023; принята к публикации 26.09.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 13/09/2023; revised 26/09/2023; published 25/12/2023

Рябчиков Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: mr_mgn@mail.ru. ORCID 0000-0001-5337-0951

Рябчикова Елена Сергеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: mika.elena@mail.ru. ORCID 0000-0001-6441-1157

Чута Артур Станиславович – студент кафедры автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: Arturchuta@gmail.com.

Васильева Елена Ивановна – студентка кафедры автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: ev.magtu@gmail.com.

Емелюшин Алексей Николаевич – доктор технических наук, профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: emelushin@magtu.ru.

Mikhail Yu. Ryabchikov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Automated Control Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: mr_mgn@mail.ru. ORCID 0000-0001-5337-0951

Elena S. Ryabchikova – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Automated Control Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: mika.elena@mail.ru. ORCID 0000-0001-6441-1157

Artur S. Chuta – student of the Department of Automated Control Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: Arturchuta@gmail.com.

Elena I. Vasilyeva – student of the Department of Automated Control Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: ev.magtu@gmail.com.

Aleksey N. Emelyushin – DrSc (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: emelushin@magtu.ru.