

На правах рукописи



АНТОНОВ Павел Валерьевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ МЕТОДОВ
ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОПЕРЕЧНЫЙ ПРОФИЛЬ ХОЛОДНОКАТАНЫХ
ПОЛОС И ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИХ ПОВЕРХНОСТИ**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Череповецкий государственный университет».

Научный руководитель: - доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки и техники РФ
Гарбер Эдуард Александрович

Официальные оппоненты: - **Шаталов Роман Львович**
доктор технических наук, профессор кафедры
«Обработка материалов давлением и
аддитивные технологии» Московского
политехнического университета

- **Ионов Сергей Михайлович**
кандидат технических наук, профессор
кафедры «Обработка металлов давлением»
национального исследовательского
технологического университета «Московский
институт стали и сплавов»

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Липецкий государственный
технический университет»

Защита диссертации состоится 26 февраля 2020 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.060.02 в Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский пр., д.49

С диссертацией можно ознакомиться в технической библиотеке ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова и на сайте ИМЕТ РАН <http://www.imet.ac.ru>

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью, с указанием почтового адреса и контактного телефона) просьба отправлять по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский пр., д.49, Диссертационный совет Д 002.060.02. Копии отзывов в электронном виде направлять по e-mail: kalash.ds@mail.ru

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 20 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук



Калашников И.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Взросшая за последние десятилетия конкуренция на мировом рынке продукции листопрокатного производства потребовала от российских металлургов повышения показателей качества холоднокатаной листовой стали до уровня лучших мировых стандартов.

В связи с этим приобрели большую актуальность две задачи:

- уменьшение поперечной разнотолщинности холоднокатаных полос до значения, не превышающего 2% от заданной толщины, соответствующего высшему мировому уровню;

- предотвращение дефекта холоднокатаных листов «сварка витков рулона при колпаковом отжиге», приводящего к потерям сотен и тысяч тонн металла и росту себестоимости продукции.

Степень разработанности проблемы.

Практика работы непрерывных широкополосных станов холодной прокатки показала, что отклонение толщины в поперечном направлении, не превышающее 2 % от номинального (заданного) значения, не всегда выполняется, даже при использовании передовой системы профилировок валков «CVC плюс» с осевой сдвижкой рабочих валков и работе всех других средств регулирования межвалкового зазора. Выполненный аналитический обзор публикаций, посвященных исследованию регулирующих воздействий на поперечный профиль полос, показал, что вопросы устранения причин увеличения поперечной разнотолщинности при применении выпукло-вогнутых CVC профилировок не нашли достаточного освещения в публикациях.

Выполненный аналитический обзор публикаций, посвященных обнаружению, исследованию и устранению дефекта «сварка витков рулона при колпаковом отжиге», показал, что в публикациях не рассмотрена совокупность всех факторов, оказывающих влияние на этот дефект, не выполнена их градуировка по степени значимости, не описана математическая модель взаимосвязи значимых факторов с количественной характеристикой доли длины рулона, имеющей этот дефект.

Объект и предмет исследования.

Объектом исследования в диссертации является холоднокатаная стальная полоса. Предмет исследования – механизмы формирования требуемой точности поперечного профиля холоднокатаных листов и предотвращения дефекта «сварка витков рулона при колпаковом отжиге».

Цель работы и задачи исследования.

Целью работы является совершенствование технологии производства стальных холоднокатаных полос для повышения качества поверхности и эффективности воздействия на поперечный профиль прокатываемых полос на основе моделирования и исследования факторов технологии.

Для достижения указанной цели, учитывая степень разработанности проблемы, были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработать новое математическое описание нагружения и деформирования валковой системы «кварто», отличающееся от известных учетом выпукло-вогнутых CVC профилировок валков и осевой сдвижки рабочих валков.

2. Выполнить усовершенствование профилировки валковой системы «CVC-плюс» для уменьшения поперечной разнотолщинности холоднокатаных полос до значения 2% от номинальной толщины, соответствующего мировому уровню качества.

3. Разработать математическую модель взаимосвязи факторов технологии с количественной характеристикой дефекта «сварка витков рулона при отжиге».

4. Предложить обоснованные параметры производства стальных холоднокатаных полос, минимизирующие отсортировку продукции по дефекту «сварка витков рулона при отжиге».

5. Опробовать и внедрить в производство предлагаемые решения по повышению качества поверхности холоднокатаных широких полос и эффективности воздействия на их поперечный профиль.

Научная новизна работы.

1. На основе конечно-элементного моделирования разработано новое математическое описание нагружения и деформирования валковой системы «кварто», отличающееся от известных учетом выпукло-вогнутых профилировок «CVC плюс» и осевой сдвижки рабочих валков.

2. Усовершенствован метод моделирования профилировок валков с возможностью учета выпукло-вогнутых CVC профилировок и осевой сдвижки рабочих валков.

3. Впервые разработана регрессионная модель взаимосвязи факторов технологии с количественной характеристикой дефекта «сварка витков рулона при отжиге».

4. С использованием модели п. 3 впервые установлены параметры технологии, увеличение которых оказывает наибольшее влияние на вероятность возникновения и увеличения межвитковой сварки (в порядке убывания значимости):

- удельное натяжение полосы на моталке стана холодной прокатки;
- температура защитного газа при снятии нагревательного колпака;
- максимальная температура нагрева при отжиге.

5. С использованием той же модели впервые установлены параметры технологии, увеличение которых оказывает наибольшее влияние на вероятность уменьшения и предотвращения межвитковой сварки (также в порядке убывания значимости):

- сила прокатки в последней клетки стана холодной прокатки;
- толщина полосы;
- концентрация эмульсола в эмульсии, подающейся на валки последней клетки стана холодной прокатки;
- выпуклость поперечного профиля холоднокатаной полосы.

Практическая значимость.

Результаты диссертационной работы реализованы в практической деятельности ПАО «Северсталь» и состоят в следующем:

– разработаны и внедрены в производство усовершенствования в технологии прокатки, отжига и дрессировки холоднокатаных полос, обеспечивающие снижение отсортировки продукции по дефекту «сварка витков рулона при отжиге» на 29 %;

– разработана и внедрена в производство профилировка валковой системы «CVC плюс», устраняющая сверхнормативную поперечную разнотолщинность холоднокатаных полос, обеспечивая значение этого показателя не более 2 % от номинальной толщины.

Новые результаты, полученные при исследовании деформаций, напряжений, профилировок валков, поперечного профиля прокатываемой полосы в валковой системе «кварто», используются в учебном процессе при преподавании дисциплины «Технология производства холоднокатаного проката» на кафедре металлургии, машиностроения и технологического оборудования Череповецкого государственного университета.

Методы исследований и достоверность результатов.

Теоретические и практические исследования выполнены с применением статистического метода анализа и математического моделирования, основанного на методе конечных элементов, реализованного в системе инженерного анализа SIMULIA Abaqus, а также на основе промышленного эксперимента.

Основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе, имеют теоретическое и практическое обоснование, они согласуются с известными работами по проблемам повышения качественных показателей металлопродукции и эффективности производства. Достоверность результатов работы была подтверждена экспериментально в цехе прокатки и отжига ПАО «Северсталь».

Личный вклад соискателя состоит в постановке задач исследований, активном участии в получении основных научных результатов, в организации и проведении экспериментов, обработке и анализе их результатов, во внедрении в производство усовершенствованной технологии производства холоднокатаных полос.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Новое математическое описание нагружения и деформирования валковой системы «кварто», отличающееся учетом профилировок «CVC плюс» и осевой сдвижки валков.
2. Новая регрессионная модель взаимосвязи факторов технологии с количественной характеристикой дефекта «сварка витков рулона при отжиге».
3. Впервые установленные и расположенные в порядке убывания значимости параметры технологии, увеличение которых оказывает влияние на вероятность увеличения/уменьшения межвитковой сварки.
4. Результаты практического использования и внедрения положений 1-3.

Апробация диссертации.

Материалы диссертации докладывались на Всероссийской научной конференции «Череповецкие научные чтения – 2017» (г. Череповец, 2017 г.), III Международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии – 2017» (г. Череповец, 2017 г.) и XII Международном конгрессе прокатчиков (г. Выкса, 2019 г.).

Публикации.

Основные положения диссертации изложены в 11 печатных работах, из которых 6 статей опубликованы в рецензируемых журналах и изданиях из перечня ВАК, 2 статьи – в научных журналах, индексируемых в базе данных Scopus.

Структура диссертации.

Диссертация изложена на 100 страницах машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 102 наименований, 3-х приложений, 17 рисунков и 4 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертации.

В первой главе выполнен аналитический обзор публикаций, посвященных, исследованию и устранению сверхнормативной поперечной разнотолщинности и дефекта «сварка витков рулонов при колпаковом отжиге».

Описана сущность и причина появления сверхнормативной поперечной разнотолщинности и сварки витков рулона.

Один из показателей качества стальных холоднокатаных полос, нормируемых международными стандартами – отклонения толщины δh от номинального (заданного) значения $h_{ном}$ по всей площади полосы. Полоса соответствует по этому показателю мировому уровню качества, если $\delta h \leq 0,02h_{ном}$. Это требование относится и к такой важной разновидности показателя δh , как поперечная разнотолщинность:

$$\delta h_{поп} = h_c - \frac{h_{лев} + h_{пр}}{2}, \quad (1)$$

где h_c , $h_{лев}$, $h_{пр}$ – толщина полосы в середине ширины, по левой и правой боковым кромкам.

Поскольку поперечный профиль тонколистового проката должен иметь выпуклую форму ($h_c > h_{лев}$, $h_c > h_{пр}$), требование к поперечной разнотолщинности выражается неравенством:

$$\delta h \leq 0,02h_{ном}. \quad (2)$$

Выполнение этого требования обеспечивается прежде всего профилировкой бочек валков, выполняемой вне стана – на вальцешлифовальном станке.

На современных станах холодной прокатки бочку валков профилируют выпукло-вогнутой, S-образной, при этом рабочие валки оснащают механизмами встречной осевой сдвижки. Такую систему профилирования, названную CVC (Continuously Variable Crown – непрерывно изменяемая кривизна), разработала фирма SMS group (SMS Demag AG, SMS Schloemann Siemag AG). Принцип действия этой системы показан на рис. 1.

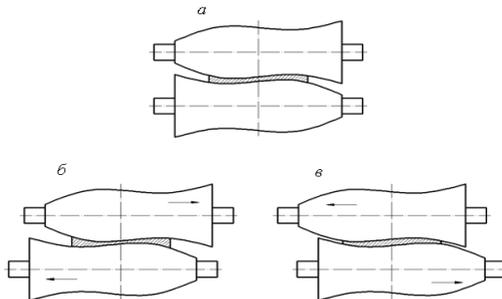


Рис. 1. Принцип действия системы CVC

При встречном осевом перемещении по схеме рис. 1, б (верхний валок – вправо, нижний – влево относительно исходного положения рис. 1, а) поперечный профиль полосы в очаге деформации без учета действия силовых, тепловых факторов, а также износа бочек становится вогнутым ($\delta h_{\text{поп}} < 0$), т.е. коэффициент вытяжки ее в середине становится больше, чем у боковых кромок. При встречном осевом перемещении по схеме рис. 1, в (верхний валок – влево, нижний – вправо) поперечный профиль полосы становится выпуклым ($\delta h_{\text{поп}} > 0$), т.е. коэффициент вытяжки ее в середине становится меньше, чем у боковых кромок.

Системы CVC представлены в двух вариантах исполнения, отличающихся профилем бочки опорных валков. В первом варианте профиль бочки опорных валков цилиндрический, во втором варианте, называемом «CVC плюс» (рис. 2), бочки опорных валков выполняют, как у рабочих – выпукло-вогнутыми.

Для расчета и выполнения профиля CVC чаще всего его выражают в виде полинома третьей степени:

$$R(x) = R_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3, \quad (3)$$

где x – текущая координата в осевом направлении валка. Начало оси x для верхних валков находится на кромке бочки валка со стороны обслуживания, а для нижних – на кромке бочки валка со стороны привода; $R(x)$ – радиус в точке x ; R_0 – радиус в положении $x = 0$; a_1, a_2, a_3 – полиномиальные коэффициенты.

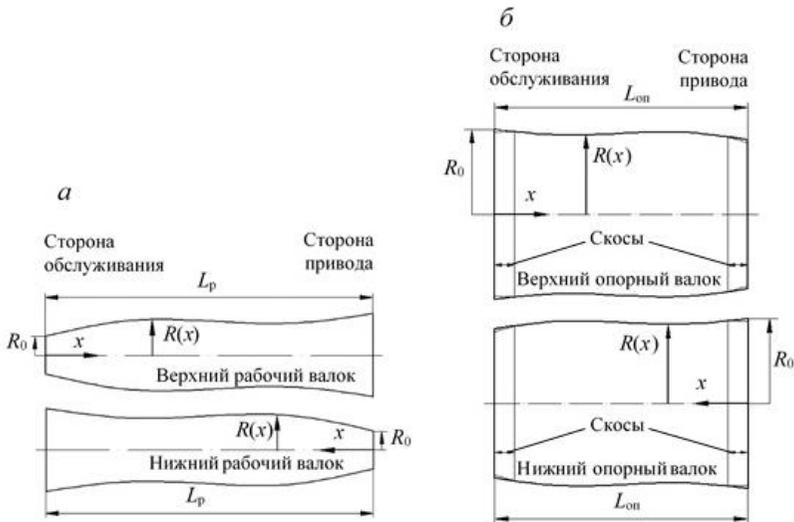


Рис. 2. Профили бочек валков в системе «CVC-плюс»:

а – рабочих; б – опорных (L_p и $L_{\text{оп}}$ – длины бочек рабочего и опорного валков)

Помимо профилировки, величина поперечной разнотолщинности полосы зависит от точности работы исполнительных механизмов и других систем регулирования процесса прокатки. Погрешности работы этих систем, вызванные

колебаниями толщины горячекатаного подката, износом бочек валков, неодинаковым по их длине, и другими нестабильными факторами технологии, приводили к тому, что требование (2) не всегда выполнялось: на значительной части длины полос шириной 900 – 1300 мм величина $\delta h_{\text{пол}}$ превышала $0,02h_{\text{ном}}$.

Этот недостаток профилировок «СВС плюс», его причины и методы устранения не нашли достаточного освещения в известных публикациях.

Дефект стальных полос «сварка витков холоднокатаных рулонов в процессе колпакового отжига» возникает в крупных цехах холодной прокатки во время отжига в колпаковых печах и обнаруживается при размотке рулона перед его дрессировкой.

Рабочие валки дрессировочного стана, протягивая полосу с разматывателя через очаг деформации, отрывают друг от друга приварившиеся витки рулона, при этом в местах отрыва на поверхности полос появляются следы, имеющие вид «скобок», повторяющиеся по длине, расположенных на определенном участке ширины или на всей ширине полосы (рис. 3, *а*, *б*) При сильной сварке витков в процессе их отрыва во время размотки возможен излом полосы (рис.3, *в*)

Анализ литературных источников показал, что первые упоминания об этих дефектах относятся к 1969-1979 г.г. В опубликованных за этот период шести работах главное внимание уделено влиянию режимов термической обработки в колпаковых печах на возникновение во время размотки изломов полосы. Другие дефекты, типа показанных на рисунке 3, *а*, *б*, их причины и методы устранения в этих публикациях не рассмотрены.

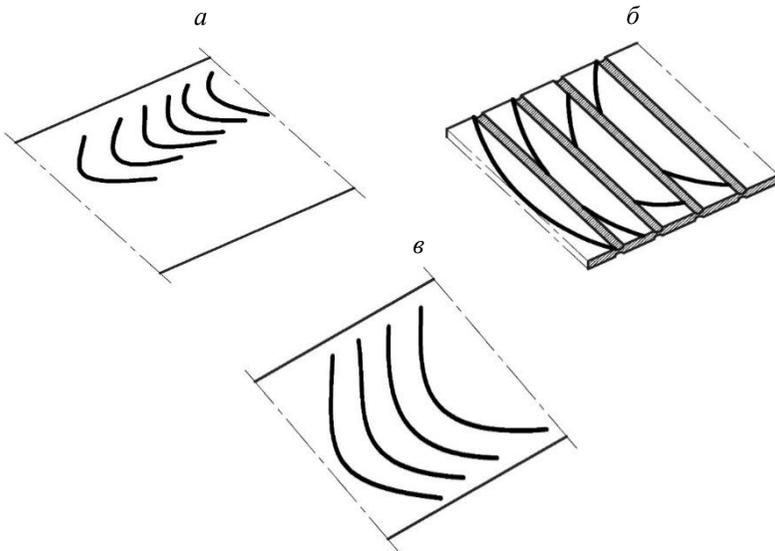


Рис. 3. Повреждения поверхности холоднокатаных листов в результате сварки витков рулона при отжиге: *а* – на части ширины листа; *б* – на всей ширине листа; *в* – с изломом листа при размотке

Факторы, которые могут повлиять на появление сварки витков рулонов в процессе колпакового отжига, впервые систематизированы в «Атласе дефектов стали», опубликованном в 1972 г. Однако в этом атласе не изложено физическое обоснование сущности влияния этих факторов на склонность металла к сварке витков, а также отсутствуют градиция факторов по степени их значимости и мероприятия, устраняющие дефект.

В последующие два десятилетия, вплоть до 2003 г., ни одной опубликованной работы по данной тематике не обнаружено. В начале 21 века в связи с возросшими требованиями машиностроителей к качеству поверхности холоднокатаных стальных листов, в том числе под воздействием развивающейся автомобильной промышленности, вновь увеличился интерес к исследованиям и разработкам по данной проблеме.

В общей сложности вплоть до 2017 года, проанализировано более 60 работ, посвященных вопросам качества холоднокатаных стальных полос (монографий, справочников, статей в журналах и сборниках научных конференций, учебников и учебных пособий).

В большинстве из этих публикаций упоминание о дефекте «сварка витков рулона при отжиге» отсутствует.

За указанный период выявлено всего 12 публикаций, в которых рассматриваются те или иные аспекты обнаружения, исследования и минимизация появления межвитковой сварки рулонов.

Ни в одной из этих публикаций не рассмотрена совокупность всех факторов, оказывающих влияние на указанный дефект, не выполнена их градуировка по степени значимости этого влияния, не описана математическая модель взаимосвязи значимых факторов с дефектом "сварка витков рулона.

На основании результатов аналитического обзора сформулированы задачи диссертации (они указаны в общей характеристике работы).

Во второй главе изложены методика и результаты усовершенствования профилировки «CVC плюс» станов холодной прокатки.

Необходимо было выяснить, возможно ли так усовершенствовать профилировки валковой системы «CVC плюс», чтобы добиться выполнения требования (2) и тем самым обеспечить мировой уровень качества готовых полос по показателю $\delta h_{\text{ном}}$.

Для решения этой задачи впервые для этой системы профилировок выполнено моделирование напряжений и упругих деформаций валковой системы рабочей клетки 4-клетевого стана 2100 с применением метода конечных элементов, ранее использованный только для моделирования валковых систем с обычной (симметричной) профилировкой и реализованного в программном комплексе SIMULIA Aباus.

В силу симметрии задачи выполнено моделирование одного валкового полукомплекта: верхних рабочего и опорного валков с CVC профилировками. В модели опорного валка учтены скосы по краям бочки. На рис. 4 представлена конечно-элементная модель этой валковой системы. Для расчета ее напряженно-деформированного состояния приняты следующие граничные условия:

- запрещены перемещения наружных поверхностей цапф под подшипниками опорного валка в направлениях осей Y и Z ;

- запрещены перемещения наружных поверхностей цапф под подшипниками рабочего валка в направлении оси Z ;

– на рабочий валок со стороны металла действует сила прокатки, распределенная по площади очага деформации, а также учтено действие сил гидравлического изгиба рабочих валков: противоизгиба – в направлении силы прокатки (от полосы к валку), дополнительного изгиба – в противоположном направлении.



Рис.4. Конечно-элементная модель валковой системы 4-клетевого стана

На рис. 5 в качестве примера представлены результаты расчета распределения эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ по длине бочки рабочего валка в контакте с полосой и с опорным валком в клети № 2 при прокатке полосы из стали 08пс шириной $b = 1250$ мм с усилием $P = 10$ МН.

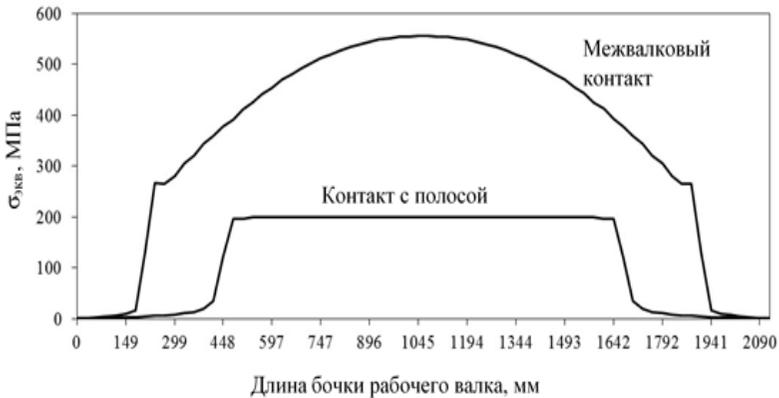


Рис. 5. Распределение эквивалентных контактных напряжений по длине бочки рабочего валка

Диаметры бочек валков: рабочего $D_p = 455$ мм, опорного $D_{\text{оп}} = 1220$ мм. Анализ полученных распределений показывает, что напряжения, возникающие в зоне контакта рабочего и опорного валков, более чем в 2 раза больше, чем в очаге

деформации, что объясняется меньшей шириной площадки упругого контакта между валками по сравнению с длиной очага пластической деформации. Отличается и характер распределения напряжений: в межвалковом контакте они существенно неравномерны, с максимумом в середине бочек, что объясняется конструктивными особенностями опорного валка 4-клетевого стана. Опорный валок имеет цилиндрические шейки, подшипниковые узлы которых из-за контакта с нажимными устройствами лишены возможности поворачиваться под действием силы прокатки. Это приводит к увеличению прогиба его бочки и росту напряжений в середине межвалкового контакта.

Для проверки адекватности модели был взят поперечный профиль холоднокатаной полосы, измеренный в результате промышленного эксперимента на 10 образцах после прокатки на 4-клетевом стане. По фактическим режимам прокатки каждого образца, зафиксированным автоматической системой измерения и контроля данных, была определена расчетная поперечная разнотолщинность полос $\delta l_{\text{пол}}$ в клети № 4 ($D_p = 480$ мм) путем суперпозиции кривой упругих деформаций рабочего валка в контакте с прокатываемой полосой, полученной по трехмерной модели валкового узла, и кривой теплового профиля, построенной по известной методике, разработанной ранее в работах череповецкой научной школой прокатчиков.

Подробные результаты сравнения расчетных и измеренных поперечных разнотолщинностей приведены в диссертации. Они показали, что погрешности расчета находятся в диапазоне 2 - 15% (среднее значение 8,5%). Это значит, что модель с достаточной точностью определяет поперечную разнотолщинность полос, поэтому она была использована для совершенствования профилировок «СВС плюс».

С этой целью было выполнено многовариантное моделирование выпукло-вогнутых профилировок рабочих валков, включающее расчеты упругих деформаций, распределений межвалковых давлений по длине бочки и построение поперечного профиля прокатываемой полосы на выходе из очага деформации. Для того, чтобы не расширять эксплуатационный парк валков, а также затраты средств и времени на их перешлифовки, было решено в системе «СВС плюс» усовершенствовать профилировки только рабочих валков без изменения исходной выпукло-вогнутой профилировки опорных.

Во всех вариантах профиль рабочих валков сохранял S-образную форму, варьировали значения выпуклости и вогнутости, а также величину разности максимального и минимального диаметров бочки и оценивали, как это влияет на поперечную разнотолщинность полосы.

На рис. 6 представлен выбранный в результате моделирования окончательный вариант профиля рабочего валка для прокатки указанного выше сортамента. Полиномиальные коэффициенты в выражении (3) для этого профиля равны: $a_1 = 0,178211 \cdot 10^{-2}$; $a_2 = -0,169989 \cdot 10^{-5}$; $a_3 = 0,482081 \cdot 10^{-9}$.

Максимальный радиус выпуклой части R_{max} и минимальный радиус вогнутой части R_{min} бочки валка были уменьшены в окончательном профиле соответственно на 0,017 мм и 0,024 мм, диаметры со стороны обслуживания и со стороны привода также уменьшились, но одинаково, их разность осталась прежней. Современные вальцешлифовальные станки оснащены такими системами контроля автоматизации процесса обработки валков, которые обеспечивают точность выполнения профиля $\pm 0,001$ мм.

Преимущество новой профилировки видно из рис. 7: разность упругих деформаций бочки рабочего вала на ширине полосы уменьшилась с 0,08 мм до 0,05 мм, то есть на 38 %, что обеспечивает уменьшение поперечной разнотолщинности

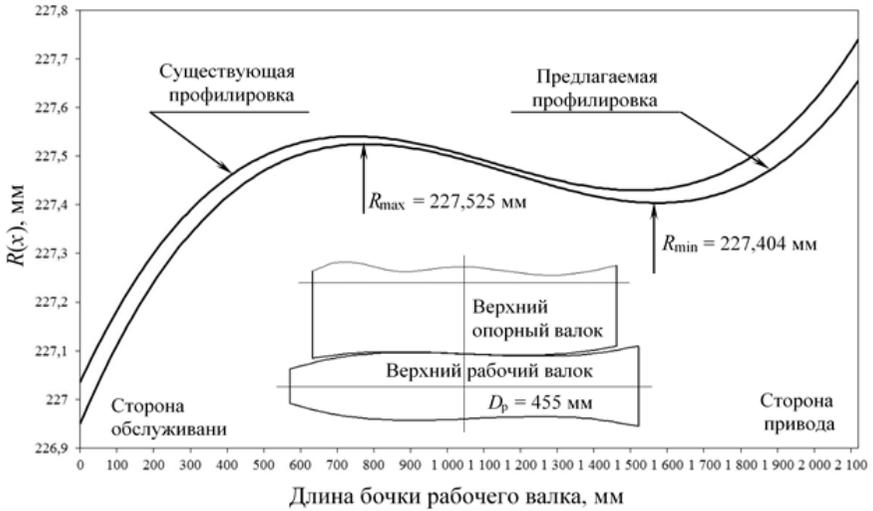


Рис. 6. Существующая и измененная профилировки CVC рабочих валков

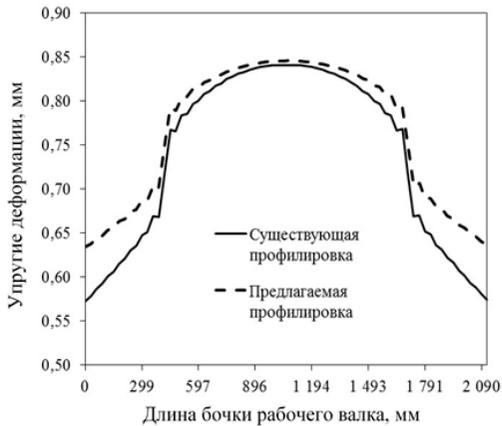


Рис. 7. Кривые распределения упругих деформаций верхнего рабочего вала в вертикальной плоскости в контакте с полосой при существующей и предлагаемой новой профилировке рабочих валков ($D_p = 455$ мм; $D_{оп} = 1220$ мм; $b = 1250$ мм; $P = 10$ МН)

полосы и выполнение условия (2). При этом, как показали расчеты, напряжения в контакте с полосой и опорным валком практически не изменились.

В третьей главе изложены методика и результаты формирования статистически значимой базы данных о фактических параметрах технологии и показателях свариваемости витков рулонов при отжиге, а также разработанная модель для определения значимости влияния факторов технологии на вероятность возникновения указанного дефекта.

Задача состояла в том, чтобы рассмотреть и проанализировать **в совокупности все факторы технологии**, которые могут повлиять в ту или иную сторону – увеличить или уменьшить вероятность появления дефекта «сварка витков рулона при отжиге».

Анализ этих факторов был направлен на то, чтобы, объяснить физическую сущность возможного влияния каждого фактора на появление указанного дефекта и проградировать все факторы по значимости этого влияния.

Для решения этой задачи впервые разработана математическая модель, основанная на методах регрессионного анализа. Искомой величиной в модели принят показатель « X », равный проценту длины, имеющей дефект «сварка витков рулона», от общей длины полосы в рулоне.

Для реализации указанной модели сформирована представительная база фактических данных цеха прокатки и отжига производства плоского листа (ЦПиО ППП) ПАО «Северсталь», в которую включили полосы широкого спектра сортамента. Для каждой полосы определяли по данным цеха фактические величины X и всех технологических параметров, рассматриваемых как факторы, влияющие на данный дефект

Изучение опыта работы технологического персонала и анализ физических процессов, протекающих во время прокатки, нагрева, выдержки и охлаждения рулонов в колпаковых печах, позволили предварительно установить следующие факторы технологии, которые могут способствовать или препятствовать появлению дефекта «сварка витков рулона при отжиге».

а) Толщина полосы.

О значимости этого фактора свидетельствует тот факт, что отсортировка по сварке витков на практике имеет место при толщине полосы 0,9 мм и менее. Вероятная причина: при уменьшении толщины полосы уменьшается жесткость витков в рулоне, в результате чего при нагреве и охлаждении в колпаковых печах витки более подвижны и в местах повышенных межвитковых давлений легче привариваются друг к другу.

б) Неравномерность коэффициентов вытяжки по ширине полосы при холодной прокатке на непрерывном стане.

Этот показатель характеризует потенциальные отклонения от плоскостности в процессе прокатки, в смотанном рулоне они незаметны из-за натяжения полосы. При нагреве в печах участки витков, получившие большую вытяжку, «освобождаются» из-за уменьшения натяжения, что может привести к росту на этих участках межвитковых сил.

в) Ширина полосы.

Обычно диапазоны колебаний толщины и вытяжек по ширине полосы для более широких полос больше, чем для узких: чем шире полоса, тем труднее при прокатке минимизировать разность обжатий и вытяжек по ее ширине.

г) Загрязненность поверхности полос, вызванная наличием в эмульсии, подаваемой на валки и полосы, механических примесей.

Механические примеси уменьшают плотность контакта витков рулона между собой, тем самым препятствуя их сварке при отжиге.

д) *Сила натяжения полосы на непрерывном стане между последней клетью и моталкой и её колебания при прокатке каждого рулона.*

Чем больше сила натяжения, создаваемая моталкой, тем с большей силой прижимаются витки в рулоне друг к другу. Кроме того, опыт показал, что в области сварных швов силу натяжения при прокатке увеличивают. Таким образом, данный фактор способствует сварке витков при отжиге.

е) *Другие возможные факторы.*

На сварку витков могут также влиять: сила прокатки в последней клетке; заданная температура окончания отжига; жировая загрязненность поверхности полосы, зависящая от концентрации эмульсора в подаваемой эмульсии; расход эмульсии в клетях и между клетями для охлаждения и смазки валков и полосы.

Для того, чтобы установить со статистической достоверностью значимость и характер влияния на дефект «сварка витков» каждого из указанных выше факторов, для каждой полосы был рассчитан по данным цеха показатель свариваемости «X», сущность которого объяснена выше. Из общего количества 2120 отобранных полос дефект «сварка витков» имели 196 полос.

Количество учитываемых параметров, включая профиларазмеры полос, частные обжатия и скорости по клетям, межклетевые натяжения, энергосиловые параметры, характеристики качества (неплоскостность, разнотолщинность, качество поверхности), режимы отжига составило более 200.

Поскольку такие параметры, как обжатия, натяжения, скорости и др., в процессе прокатки не являются постоянными, в статистическом анализе использовались их средние значения.

Для статистической обработки был использован метод регрессионного анализа, реализованный в программе Excel. В качестве характеристик значимости каждого фактора технологии в этом методе служат два взаимозависимых показателя: доверительная вероятность p и уровень значимости α , причем $p + \alpha = 100\%$.

Фактор считается значимым, если $p > 94-95\%$; $\alpha \leq 5-6\%$.

Используя указанный метод и введя все данные в программу регрессионного анализа, установили значимые факторы технологии (их оказалось 9, они приведены в табл. 1) и получили регрессионное уравнение, выражающее зависимость показателя X от этих факторов:

$$X = -91,63 - 81,73 \frac{h}{h_{\text{баз}}} + 100 \frac{b}{b_{\text{баз}}} - 4 \frac{Q}{Q_{\text{баз}}} + 90,9 \frac{T}{T_{\text{баз}}} + 222 \frac{t_k}{t_{k\text{баз}}} + 8 \frac{P_5}{P_{5\text{баз}}} - 4,95 \frac{\Delta_{\text{м}}}{\Delta_{\text{мбаз}}} - 0,75 \frac{\Delta_{\text{ж}}}{\Delta_{\text{жбаз}}} + 1,73 \frac{A}{A_{\text{баз}}}. \quad (4)$$

Наименования и размерности величин, входящих в уравнение (4), приведены в табл. 1.

Выражения, входящие в уравнение (4) с индексом «баз» – базовые значения соответствующих параметров (минимальные или наиболее характерные).

Таблица 1 – Значимые факторы технологии, входящие в уравнение (1), влияющие на появление дефекта «сварка витков рулона при отжиге»

№	Наименование фактора	Обозначение	Размерность	Показатели значимости p ; α , %
1.	Ширина полосы	b	мм	$p > 99,99$; $\alpha < 0,01$
2.	Толщина полосы	h	мм	$p > 99,9$; $\alpha < 0,1$
3.	Разность коэффициентов вытяжки по ширине полосы	A	б/р	$p = 99,6$; $\alpha = 0,4$
4.	Загрязненность поверхности полосы механическими примесями	Δ_m	мг/м ²	$p = 98,9$; $\alpha = 1,1$
5.	Натяжение полосы на моталке	T	кН	$p = 96,5$; $\alpha = 3,5$
6.	Усилие прокатки в 5-й клетки	P_5	МН	$p = 95,7$; $\alpha = 4,3$
7.	Заданная температура окончания нагрева при отжиге	t_k	°С	$p = 94,9$; $\alpha = 5,1$
8.	Суммарный расход эмульсии на стане	Q	м ³ /ч	$p = 94,3$; $\alpha = 5,7$
9.	Жировая загрязненность поверхности полос	$\Delta_{ж}$	мг/м ²	$p = 94,2$; $\alpha = 5,8$

Оценку достоверности регрессионного уравнения (4) осуществили, рассчитав коэффициент детерминации: $R^2=0,87$. Сравнительно высокое значение R^2 указывает на достаточную достоверность этого уравнения для проведения 1-ой серии испытаний.

Анализ уравнения (4) и собранной базы данных позволил сделать следующие практические выводы:

1. Появление дефекта «сварка витков» гарантировано при расчетном значении $X > 12 \div 14$.

Это объясняется тем, что регрессионное уравнение (4) получено при усредненных значениях технологических параметров, которые на практике колеблются даже в пределах каждой полосы.

2. Показатели α трех последних факторов технологии, приведенных в табл. 1 под номерами 7; 8; 9, находятся в диапазоне пороговых значений, поэтому степень их влияния на дефект «сварка витков» минимальна.

3. Параметры технологии, при увеличении которых растет вероятность дефекта «сварка витков» (они входят в уравнение (4) со знаком «плюс»): разность коэффициентов вытяжки по ширине полосы (наиболее значимый фактор, имеющий показатель α , в 2,5-14 раз меньший, чем остальные факторы); ширина полосы; натяжение на моталке; усилие прокатки в 5-й клетки; температура окончания нагрева при отжиге.

4. Параметры технологии, при уменьшении которых растет вероятность дефекта «сварка витков» (они входят в уравнение (1) со знаком «минус»): толщина полосы; суммарный расход эмульсии; механические и жировые загрязнения поверхности.

Для того чтобы убедиться, что уравнение (4) может быть использовано для разработки усовершенствованной технологии, произвольно отобрали из базы данных 31 полосу, 20 из которых не имели отсортировки по сварке витков, а у остальных 11-ти часть длины полосы была отсортирована по данному дефекту. Результаты расчета совпали с фактическими данными для всех полос, на основании этого уравнение (4) было признано достоверным и пригодным для разработки усовершенствованных технологических режимов.

В четвертой главе изложены методика и результаты углубленной проверки регрессионного уравнения (4) путем его промышленной апробации в ППП ПАО «Северсталь» с технологией, типичной для современных процессов производства стальных широких полос.

Для первой промышленной апробации выбрали сортамент, при производстве которого отсортировка по сварке витков рулона чаще всего имела место: толщина полос 0,4 - 0,65 мм, ширины 1100 - 1200 мм.

Для данного сортамента с помощью уравнения (4) подобрали два варианта сочетания параметров: *первый* – обеспечивающий появление указанного дефекта на готовом прокате, *второй* – исключающий его появление.

В процессе первой апробации выяснились некоторые особенности технологического процесса, которые не в полной мере учитывались при выводе регрессионного уравнения (4).

Во-первых, загрязненность поверхности полосы механическими примесями (фактор Δ_m в уравнении (4) и таблице 1) зависит от содержания этих примесей в эмульсии, подаваемой на полосу, а точнее – в эмульсолое, используемом для приготовления эмульсии.

Во-вторых, содержание эмульсолоа в эмульсии (т.е. его концентрация) регламентируется цеховыми нормативными документами. Чем выше концентрация эмульсолоа в эмульсии, тем больше механических примесей попадает на полосу.

В-третьих, на непрерывный стан эмульсия подается через 2-3 эмульсионных системы: например, на 5-ти клетевой стан 1700 ППП ПАО «Северсталь» через 1-ю систему эмульсия попадает на 1-ю, 2-ю, 3-ю клетки, через 2-ю систему – на 4-ю клетку и через 3-ю систему – на 5-ю клетку. При этом нормативное значение концентрации $E_{\text{норм}}=1 - 1,13$ мг/л.

Таким образом, чем выше концентрация эмульсолоа в эмульсии, тем толще слой жира между витками сматываемого холоднокатаного рулона, и тем больше между ними механических загрязнений.

Следовательно, выяснилось, что уравнение (4) нуждается в уточнении: в составе значимых факторов факторы Δ_m , Q (суммарный расход эмульсии на стане) и Δ_j (жировая загрязненность поверхности полос) следует заменить фактором концентрации эмульсолоа E_3 , т.к. наибольшее влияние на склонность к межвитковой сварке оказывает концентрация эмульсолоа во 3-ей системе.

Кроме того, углубленное изучение работы стана показало, что плотность прижатия витков друг к другу при смотке холоднокатаных полос на непрерывном стане зависит не от силы натяжения полосы в МН (фактор T в уравнении (4)), а от удельного натяжения σ_m в МПа.

Далее оказалось, что разность коэффициентов вытяжки по ширине полосы (фактор A в уравнении 4) учитывать при стационарной работе автоматики стана невозможно и нецелесообразно, т.к. современные станы оборудованы системами

автоматического регулирования профиля м формы полос (САПРФ), сводящими разность коэффициентов вытяжки к нулю.

Вместо этой разности необходимо учесть среднее значение выпуклости поперечного профиля по ширине полосы, т.е. поперечную разнотолщинность: чем она больше, тем больше объем и площадь свободного пространства между витками; туда больше попадает эмульсии, что препятствует межвитковой сварке.

Дополнительно учли то обстоятельство, что вероятность межвитковой сварки при отжиге зависит не только от заданной температуры окончания нагрева при отжиге (фактор t_k в уравнении (4) и таблице 1), сколько от максимальной температуры нагрева T_n и от температуры защитного газа при снятии нагревательного колпака T_k (после окончания нагрева его снимают не сразу; чем выше T_k , тем вероятнее сварка витков).

Учли также ту особенность проблемного сортамента, что, в отличие от диапазона толщин, которые изменяются от минимальной до максимальной на 60% (т.е. более, чем в 1,5 раза), изменения ширин составляют менее 10%. В связи с этим было решено исключить фактор ширины из регрессионного уравнения, имея в виду, что при использовании большего диапазона ширин его следует учитывать.

Таким образом, 1-ая апробация дала практические данные для составления уточненного регрессионного уравнения, прогнозирующего вероятность сварки витков рулона при отжиге с большей достоверностью.

Для составления уточненной зависимости из базы данных ППП отобрали 59 полос проблемного сортамента. В результате, применив тот же метод, что и при выводе уравнения (4), получили новое регрессионное уравнение:

$$X = 0,00125 + 252,8 \frac{\sigma_m}{\sigma_{m\text{баз}}} - 0,062 \frac{P_5}{P_{5\text{баз}}} + 10,01 \frac{T_k}{T_{k\text{баз}}} + 19,16 \frac{T_n}{T_{n\text{баз}}} - 8,00 \frac{h}{h_{\text{баз}}} - 32,77 \frac{\mathcal{E}_3}{\mathcal{E}_{3\text{баз}}} - 1,76 \frac{\Delta}{\Delta_{\text{баз}}}, \quad (5)$$

где σ_m – удельное натяжение на моталке непрерывного стана; P_5 – усилие прокатки в его 5-й клетки; T_k – температура защитного газа при снятии нагревательного колпака; T_n – максимальная температура нагрева; h – толщина полосы; \mathcal{E}_3 – концентрация эмульсола в системе №3; Δ – среднее значение выпуклости поперечного профиля полосы.

Параметры $\sigma_{m\text{баз}}$, $P_{5\text{баз}}$, $T_{k\text{баз}}$, $T_{n\text{баз}}$, $h_{\text{баз}}$, $\mathcal{E}_{3\text{баз}}$, $\Delta_{\text{баз}}$ – базовые значения соответствующих факторов. Их величины соответственно равны: 40 МПа, 5МН, 600 °С, 720 °С, 1мм, 2 мг/л, 0,02 мм.

Так же, как в уравнение (4), в уравнение (5) значения параметров σ_m , P , Δ подставляются усредненными, поэтому в качестве оптимального значения X , свидетельствующего об отсутствии дефекта, приняли $X < 12\%$.

Значимые факторы уравнения (5) сведены в табл. 2.

Оценку достоверности регрессионного уравнения (5) осуществили, рассчитав коэффициент детерминации: $R^2=0,87$. Сравнительно высокое значение R^2 указывает на достаточную достоверность этого уравнения.

Таблица 2 – Значимые факторы технологии, входящие в уравнение (5), влияющие на появление дефекта «сварка витков рулона при отжиге» (для проблемного сортамента: $h = 0,4-0,65$ мм, $b = 1100-1200$ мм).

№	Наименование фактора	Обозначение	Размерность	Показатели значимости p ; α , %
1.	Толщина полосы	h	мм	$p > 99,9$; $\alpha < 0,1$
2.	Удельное натяжение полосы на моталке	σ_m	МПа	$p = 96,5$; $\alpha = 3,5$
3.	Усилие прокатки в 5-й клетки	P_5	МН	$p = 95,7$; $\alpha = 4,3$
4.	Температура защитного газа при снятии нагревательного колпака	T_k	°С	$p = 94,9$; $\alpha = 5,1$
5.	Максимальная температура нагрева при отжиге	T_n	°С	$p = 92,2$; $\alpha = 5,2$
6.	Концентрация эмульсола в системе №3	Ξ_3	мг/л	$p = 94,3$; $\alpha = 5,7$
7.	Выпуклость поперечного профиля полосы	Δ	мм	$p = 95,7$; $\alpha = 4,3$

Также оценили адекватность полученного уравнения с помощью критерия Фишера, его расчетное значение оказалось равным 41,2 при базовом (или критическом) значении в 31,947, т.е. критерий Фишера также позволяет сделать вывод о достоверности полученного уравнения.

Анализ уравнения (5) и собранной базы данных позволил сделать следующие практические выводы:

1. Параметры технологии, при увеличении которых растет вероятность дефекта «сварка витков» (они входят в уравнение (5) со знаком «плюс»):

- удельное натяжение на моталке;
- температура окончания нагрева при отжиге;
- максимальная температура нагрева при отжиге.

2. Параметры технологии, при уменьшении которых растет вероятность дефекта «сварка витков» (они входят в уравнение (5) со знаком «минус»):

- толщина полосы;
- концентрация эмульсии;
- сила прокатки в последней клетки непрерывного стана;
- выпуклость поперечного профиля полосы.

Следует отметить, что знак силы прокатки P_5 в уравнении (5) изменился по сравнению с уравнением (4) с плюса на минус. Углубленный анализ показал, что знак «минус» более правильно отражает влияние силы прокатки в последней клетки. Рабочие валки в последней клетки подвергают насечке, они имеют высокую твердость и шероховатость, которая передается на полосу. Витки с поверхностной микронеровностью при смотке менее плотно прилегают друг к другу, что препятствует их сварке.

Чтобы разработать с использованием уравнения (5) усовершенствованную технологию, сводящую вероятность сварки витков рулонов к минимуму, мы разделили значимые факторы на **управляющие** (величину которых можно варьировать без ущерба для качества металла и производительности стана) и **возмущающие** (величину которых на практике изменить трудно).

К **управляющим** факторам отнесли:

- силу натяжения полосы на моталке, от которой зависит удельное натяжение

σ_m ;

- силу прокатки в последней клетке P_5 ;

- температуру защитного газа при снятии нагревательного колпака T_k ;

- концентрацию эмульсола в эмульсии.

Возмущающие факторы – толщина полосы (она определяется заказом и сменным заданием) и выпуклость поперечного профиля холоднокатаной полосы (она не подлежит изменению из-за требования «наследственности» поперечной разнотолщинности по отношению к горячекатаному прокату, обеспечивающей сохранение плоскостности).

При подготовке ко второй промышленной апробации мы учли требования заказчика – решить задачу при пониженной концентрации эмульсола во второй и третьих системах стана.

С учетом выводов, изложенных выше, с помощью уравнения (5) были определены следующие значения управляющих факторов технологии, обеспечивающие исключение или минимальную вероятность появления дефекта «сварка витков рулона при отжиге»:

- удельное натяжение полосы при смотке: не более 30 - 31,5 МПа;

- усилие прокатки в 5-й клетке – увеличенное за счет обжатия до предельно допустимого значения (например, для толщин 0,4 - 0,5 мм, шириной 1000 - 1200 мм: 12 - 15 МН);

- температура защитного газа при снятии нагревательного колпака: не более 590°C.

Все параметры производства 59 опытных полос – управляющие и возмущающие факторы, толщины, ширины, а также результаты расчета параметра X и фактические данные о наличии или отсутствии сварки витков в рулоне – приведены в таблице 3.2 диссертации.

Совпадение прогноза и фактических результатов имело место для 50 полос (84,7 %), причем для 5-ти из 9-ти полос, для которых прогноз был недостоверным, межвитковая сварка была выражена очень слабо.

В пятой главе изложены причины и содержание окончательной корректировки нормативно – технологической документации ППП ПАО «Северсталь», обеспечившей внедрение усовершенствованной технологии в производство холоднокатаных широких стальных полос, а также результаты этого внедрения.

Проанализировав результаты 1-й и 2-й промышленных апробаций усовершенствованной технологии, изложенные в главе 4, технологи ППП ПАО «Северсталь» выдвинули следующие предложения, направленные на снижение затрат при ее постоянном использовании в производстве и на дополнительное уменьшение отсортировки по дефекту «сварка витков рулона при отжиге».

Первое: определить такие технологические режимы производства, чтобы добиться максимального уменьшения межвитковой сварки рулонов при концентрации

эмульсола, сниженной до уровня 0,81-0,91 мг/л, т.к. это позволит уменьшить себестоимость продукции за счет экономии дорогостоящего эмульсола.

Второе: проанализировать влияние на склонность к межвитковой сварке шероховатости поверхности, неравномерно распределенной по длине бочки валков и по ширине полосы и уменьшающейся в процессе прокатки из-за износа.

Поскольку распределение шероховатости по поверхности проката во многом носит случайный характер и изменяется в процессе «естественного» износа валков при перешлифовках, учет его в регрессионной модели затруднителен. Более целесообразно внести корректировки в технологические инструкции, добившись этим более стабильного характера распределения шероховатости по поверхности проката.

Анализ показал, что сварка витков происходит главным образом в середине ширины полосы, где шероховатость изнашивается более интенсивно, в результате чего витки плотнее прижимаются друг к другу.

Кроме того, технологи обнаружили, что на склонность к межвитковой сварке влияет скорость дрессировки отожженной полосы: при малых скоростях (2-3 м/с) этот дефект наблюдается чаще, а при рабочей скорости (8-10 м/с) дефектная часть длины полосы уменьшилась.

Учтя результаты апробаций, изложенные в гл.4, и дополнительные соображения, изложенные выше, внесен ряд корректировок в нормативно – технологическую документацию ППП ПАО «Северсталь», относящихся к сортаменту полос, проблемных по дефекту «сварка витков рулона при отжиге» (толщины 0,4 - 0,65 мм, ширины 1100 - 1200 мм):

- 1) Регламентирована пониженная концентрация эмульсола эмульсии в 3-ей системе: $\Xi_3 = 0,81 - 0,91$ мг/л;
- 2) Установлены оптимальные значения технологических параметров:
 - температура защитного газа при снятии нагревательного колпака: $T_k \leq 590^\circ\text{C}$;
 - удельные натяжения между последней клетью и моталкой стана холодной прокатки: $\sigma_m \leq 30 - 31,5$ МПа;
 - сила прокатки в 5-й клетки: $P_5 = 12 - 15$ МН;
 - рабочая скорость дрессировки: 8 - 10 м/с.
- 3) Повышены требования к обеспечению и контролю шероховатости валков:
 - строгое соблюдение межперевалочных периодов рабочих валков;
 - тщательный контроль шероховатости их поверхности перед завалками в рабочие клетки.

Выполнив все указанные мероприятия, начиная с января 2018 г., усовершенствованную технологию стали использовать в ППП ПАО «Северсталь», а в августе 2018 г. оформили акт внедрения в производство.

Отсортировка в 2018 г. по сравнению с 2017 г. уменьшилась с 963 до 713 т, т.е. на 250 т или на 26%. Учитывая, что объем производства в 2018 г. был несколько больше, чем в 2017 г., процент отсортированного металла уменьшился с 0,048% до 0,034%, или на 29,2%.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На основе конечно-элементного моделирования разработано новое математическое описание нагружения и деформирования валковой системы «кварто», отличающееся от известных учетом выпукло-вогнутых профилировок «CVC плюс» и осевой сдвижки рабочих валков.

2. Усовершенствован метод моделирования профилировок валков с возможностью учета выпукло-вогнутых CVC профилировок и осевой сдвижки рабочих валков, позволивший предложить профилировку валковой системы «CVC-плюс» для уменьшения поперечной разнотолщинности холоднокатаных полос до значения 2% от номинальной толщины, соответствующего мировому уровню качества. Достоверность усовершенствованной профилировки валков «CVC плюс» и метода ее разработки подтверждена на действующем стане путем сравнения рассчитанных и измеренных поперечных разнотолщинностей холоднокатаных полос.

3. Впервые разработана регрессионная модель взаимосвязи факторов технологии с количественной характеристикой дефекта «сварка витков рулона при отжиге». Достоверность регрессионной модели, вычисляющей показатель X , характеризующий процент от общей длины рулона той ее части, на которой произошла межвитковая сварка, подтверждена расчетом коэффициента детерминации R^2 , критерием Фишера и обработкой данных технологии производства стальных холоднокатаных полос на ПАО «Северсталь».

4. С использованием модели п. 3 впервые установлены параметры технологии, увеличение которых оказывает наибольшее влияние на вероятность возникновения и увеличения межвитковой сварки (в порядке убывания значимости):

- удельное натяжение полосы на моталке стана холодной прокатки;
- температура защитного газа при снятии нагревательного колпака;
- максимальная температура нагрева при отжиге.

С использованием той же модели впервые установлены параметры технологии, увеличение которых оказывает наибольшее влияние на вероятность уменьшения и предотвращения межвитковой сварки (также в порядке убывания значимости):

- сила прокатки в последней клетки стана холодной прокатки;
- толщина полосы;
- концентрация эмульсола в эмульсии, подающейся на валки последней клетки стана холодной прокатки;
- выпуклость поперечного профиля холоднокатаной полосы.

На основе выполненного исследования предложены обоснованные параметры производства стальных холоднокатаных полос, минимизирующие отсортировку продукции по дефекту «сварка витков рулона при отжиге».

5. Результаты диссертационной работы реализованы в практической деятельности ПАО «Северсталь» и состоят в следующем:

- испытана и внедрена в производство профилировка валковой системы «CVC плюс», устраняющая сверхнормативную поперечную разнотолщинность холоднокатаных полос, обеспечивая значение этого показателя не более 2 % от номинальной толщины;
- разработаны и внедрены в производство усовершенствования в технологии прокатки, отжига и дрессировки холоднокатаных полос, обеспечивающие снижение отсортировки продукции по дефекту «сварка витков рулона при отжиге» на 29 %

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Garber E.A., Antonov P.V., Shalaevskii D.L. Application of statistical methods to reveal and remove the causes of coil laps upon annealing of cold-rolled steel strips [Текст] // Russian Metallurgy (Metally). – 2017. – № 9. – P.771–774.
2. Гарбер Э.А., Дилигенский Е.В., Антонов П.В., Шалаевский Д.Л., Дятлов И.А. Исследование факторов, влияющих на свариваемость витков холоднокатаных рулонов при отжиге, разработка усовершенствованной технологии для минимизации этого дефекта [Текст] // Производство проката. – 2017. – № 3. – С. 8–11.
3. Гарбер Э.А., Антонов П.В., Шалаевский Д.Л. Применение статистических методов для выявления и устранения причин сварки витков рулонов при отжиге холоднокатаных стальных полос [Текст] // Металлы. – 2017. – № 9. – С. 71–74.
4. Гарбер Э.А., Антонов П.В., Шалаевский Д.Л. Анализ причин дефекта холоднокатаных полос «сварка витков рулона при отжиге» и разработка методов его устранения [Текст] // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2017. – № 1. – С. 60–63.
5. Антонов П.В., Болобанова Н., Гарбер Э.А. Совершенствование профилировок валков стана холодной прокатки для повышения точности формирования поперечного профиля прокатываемых полос [Текст] // Производство проката. – 2019. – № 6. – С. 7–13.
6. Антонов П.В., Болобанова Н.Л., Гарбер Э.А. Усовершенствование метода моделирования профилировок валков стана холодной прокатки для повышения точности формирования поперечного профиля прокатываемых полос [Текст] // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2019. – № 6 (75). – С. 718–724.
7. Антонов П.В., Болобанова Н.Л., Кожевникова И.А. Моделирование напряжений и деформаций валковой системы широкополосного стана холодной прокатки на основе метода конечных элементов [Текст] // Сталь. – 2019. – № 5. – С. 28–32.
8. Antonov P.V., Bolobanova N.L., Kozhevnikova I.A. Roller Stress and Strain in a Broad-Strip Cold-Rolling Mill [Текст] // Steel in Translation. – 2019. № 5(49). – P. 339–344.
9. Гарбер Э.А., Шалаевский Д.Л., Антонов П.В. Исследование причин появления дефекта «сварка витков рулона при отжиге» и разработка усовершенствованной технологии для исключения этого дефекта [Текст] // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Череповецкие научные чтения – 2017»: В 3 ч. Ч. 3. Естественные, экономические, технические науки и математика. – Череповец: Череповецкий государственный университет, 2018. – С. 47–49.
10. Гарбер Э.А., Антонов П.В. Устранение дефекта «сварка витков» рулонов холоднокатаной полосовой стали при отжиге в колпаковых печах цеха прокатки и отжига Череповецкого металлургического комбината ПАО «Северсталь» [Текст] // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Череповецкие научные чтения – 2017»: В 3 ч. Ч. 3. Естественные, экономические, технические науки и математика. – Череповец: Череповецкий государственный университет, 2018. – С. 49–51.
11. Гарбер Э.А., Антонов П.В., Шалаевский Д.Л. Исследование причин возникновения дефекта «сварка витков» в холоднокатаных рулонах ЦПиО ЧерМК ПАО «Северсталь» [Текст] // Материалы III Международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии – 2017». – Череповец: Череповецкий государственный университет, 2017. – С. 73–75.