

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Череповецкий государственный университет»

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

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки и техники РФ
Гарбер Э.А.

Череповец – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Глава 1. Аналитический обзор публикаций, посвященных проблемам повышения точности формирования поперечного профиля прокатываемых полос и исследования дефекта «сварка витков рулонов при колпаковом отжиге»	10
1.1. Обзор публикаций по проблеме повышения точности формирования поперечного профиля прокатываемых полос	11
1.2. Обзор публикаций, посвященных дефекту холоднокатаных полос «сварка витков рулонов при колпаковом отжиге».....	24
1.3. Задачи диссертационной работы, вытекающие из обзоров публикаций, изложенных в п.1.1 и п.1.2.....	35
Выводы по главе 1	36
Глава 2. Усовершенствование профилировки «СВС плюс» стана холодной прокатки для устранения дефекта «сверхнормативная поперечная разнотолщинность холоднокатаных полос»	38
Выводы по главе 2	51
Глава 3 Формирование статистически значимой базы данных о фактических режимах прокатки, профилировках валков, их тепловом профиле и износе, энергосиловых параметрах прокатки, дефектах боковых кромок полос и показателях свариваемости витков рулона при отжиге. Разработка модели для определения значимости влияния факторов технологии на свариваемость витков	53
3.1. Методика формирования статистически значимой базы данных	53
3.2. Результаты формирования базы данных	54
Выводы по главе 3	59

Глава 4 Моделирование взаимосвязи факторов технологии и свариваемости витков рулонов. Разработка первого и второго вариантов усовершенствованной технологии производства холоднокатаного проката, минимизирующей вероятность сварки витков рулона при отжиге	62
4.1. Методика моделирования и разработки первого варианта усовершенствованной технологии	62
4.2. Первая серия промышленных испытаний и ее результаты	62
4.3. Составление уточненной регрессионной зависимости от значимых факторов технологии показателей X (той части длины рулона, которая с доверительной вероятностью $p > 95\%$ будет иметь дефект «сварка витков при отжиге»)	64
4.4. Разработка и апробация второго варианта усовершенствованной технологии	67
Выводы по главе 4	70
Глава 5 Окончательная корректировка и внедрение технологии производства отожженных стальных полос, обеспечивающей минимальную вероятность появления дефекта «сварка витков рулона при отжиге»	72
5.1. Причина дополнительной корректировки технологии	72
5.2. Окончательная корректировка и внедрение усовершенствованной технологии в производство	73
Выводы по главе 5	75
Заключение	77
Библиографический список	79
Приложение 1	92
Приложение 2	94
Приложение 3	100

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Возросшая 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 клетке 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.

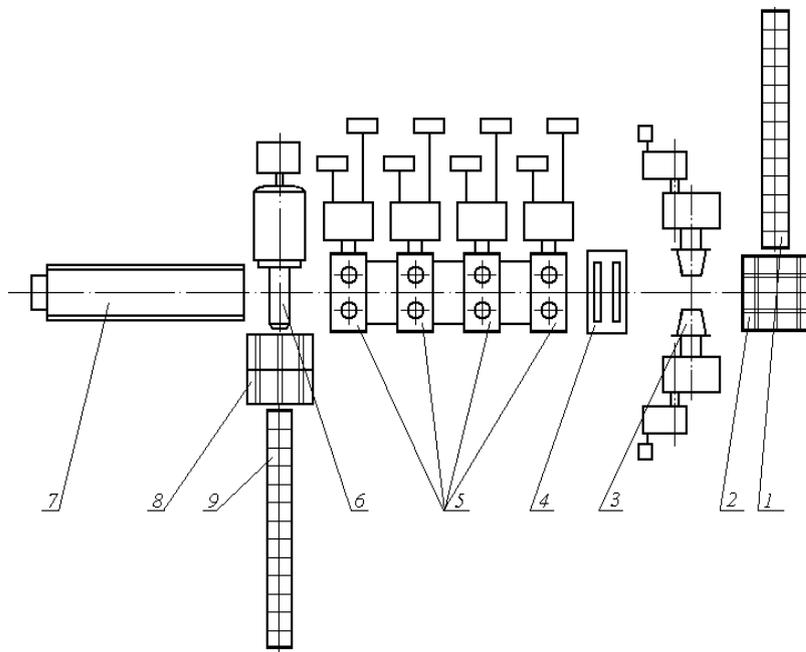
Основные положения диссертации изложены в 11 печатных работах, из которых 6 статей опубликованы в рецензируемых журналах и изданиях из перечня ВАК, 2 статьи – в научных журналах, индексируемых в базе данных Scopus.

Структура диссертации.

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

**ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПУБЛИКАЦИЙ,
ПОСВЯЩЕННЫХ ПРОБЛЕМАМ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ
ФОРМИРОВАНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО ПРОФИЛЯ ПРОКАТЫВАЕМЫХ
ПОЛОС И ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФЕКТА «СВАРКА ВИТКОВ
РУЛОНОВ ПРИ КОЛПАКОВОМ ОТЖИГЕ»**

Сверхнормативная поперечная разнотолщинность холоднокатаных стальных полос и «сварка витков рулонов при колпаковом отжиге» возникают по разным причинам и, как правило, не наблюдаются одновременно на одном и том же стане. Например, в производстве плоского проката (ППП) ПАО «Северсталь» имеются два непрерывных стана холодной прокатки: 4-клетевой стан 2100 (рисунок 1.1), недавно прошедший коренную реконструкцию из стана 1700, и 5-клетевой стан 1700 (рисунок 1.2). Сверхнормативная поперечная разнотолщинность отмечается на первом из них, а дефект «сварка витков рулонов при колпаковом отжиге» возникает после холодной прокатки на 5-клетевом стане.



1 – цепной транспортер перед станом; 2 – приемный стол; 3 – разматыватель;
4 – подающие и натяжные ролики; 5 – рабочие клетки; 6 – моталка; 7 – автоматический захлестыватель; 8 – сниматель рулонов; 9 – цепной транспортер за станом

Рисунок 1.1 – Схема 4-клетевого стана холодной прокатки

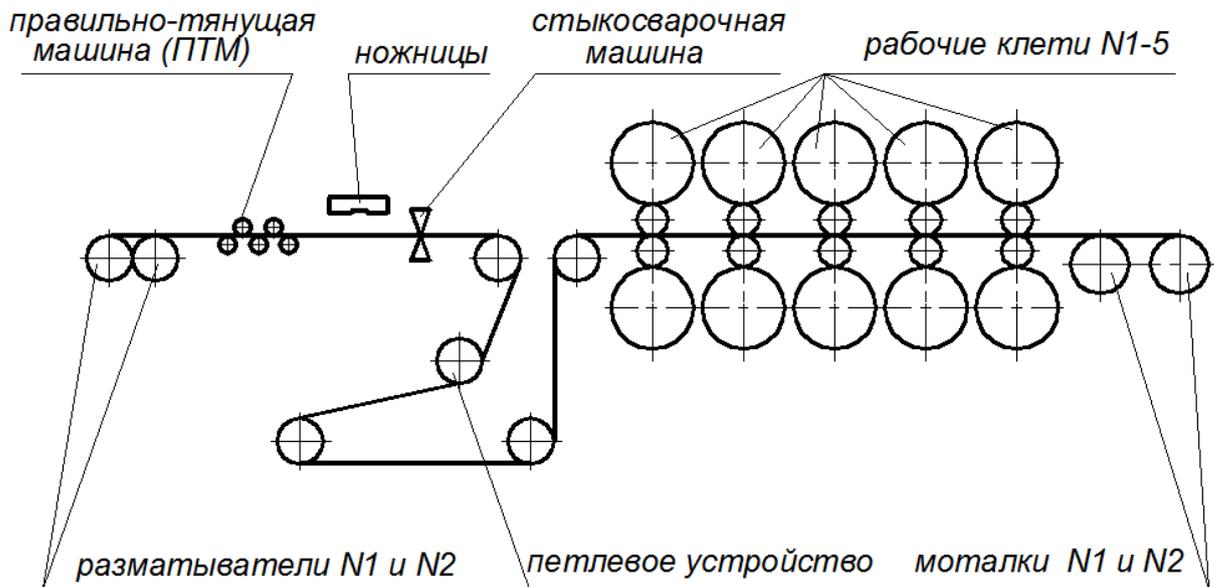


Рисунок 1.2 – Схема 5-клетового стана холодной прокатки

Технологический персонал ППП ПАО «Северсталь» вынужден заниматься одновременно минимизацией вероятности появления обоих указанных дефектов, поэтому им и посвящена данная диссертация.

Учитывая вышеизложенное, ниже отдельно проанализированы публикации, посвященные каждому из этих дефектов.

1.1 Обзор публикаций по проблеме повышения точности формирования поперечного профиля прокатываемых полос

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

$$\delta h_{\text{поп}} = h_{\text{с}} - \frac{h_{\text{лев}} + h_{\text{пр}}}{2}, \quad (1.1)$$

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

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

$$\delta h_{\text{поп}} \leq 0,02h_{\text{ном}}. \quad (1.2)$$

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) [1, 2]. Принцип действия этой системы показан на рисунке 1.3 [3].

При встречном осевом перемещении по схеме рисунка 1.3 б (верхний валок – вправо, нижний – влево относительно исходного положения рис. 1.3, 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 рисунок 1.3, 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.

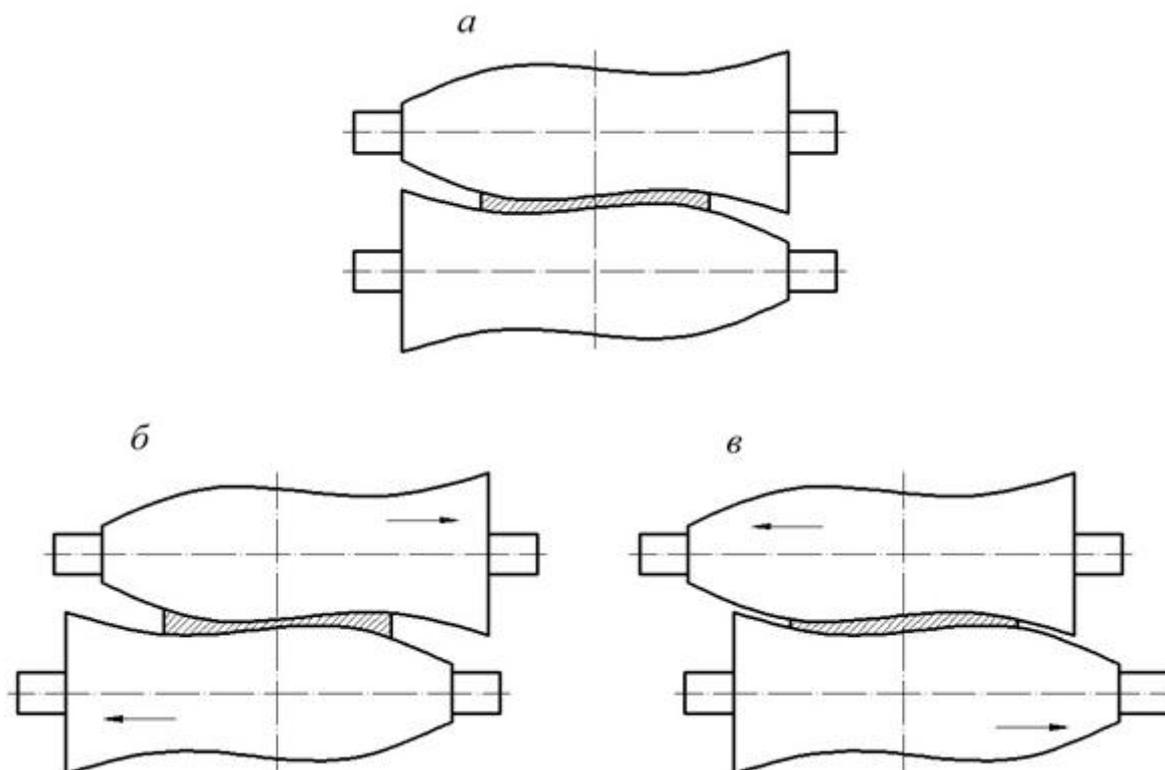


Рисунок 1.3 – Принцип действия системы CVC

Системы CVC представлены в двух вариантах исполнения, отличающихся профилем бочки опорных валков [2, 4]. В первом варианте профиль бочки опорных валков цилиндрический, во втором варианте, называемом «CVC плюс» (рисунок 1.4), бочки опорных валков выполняют, как у рабочих – выпукло-вогнутыми.

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

$$R(x) = R_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3, \quad (1.3)$$

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.

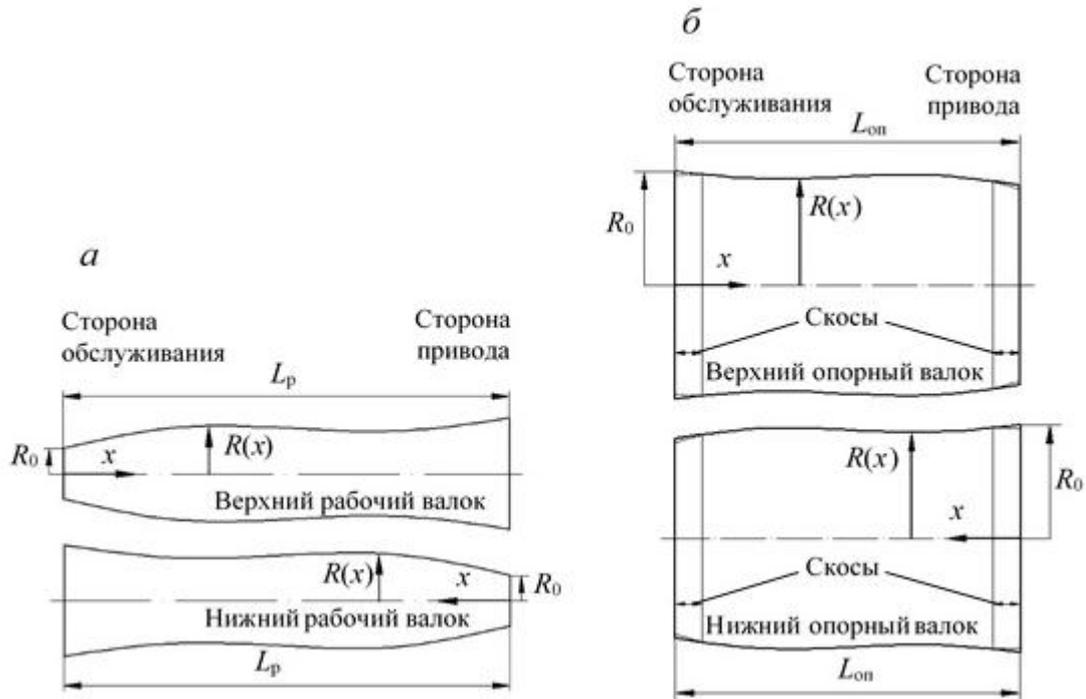


Рисунок 1.4 – Профили бочек валков в системе «CVC-плюс»:

a – рабочих; b – опорных (L_p и L_{on} – длины бочек рабочего и опорного валков)

Например, на 4-клетевом стане 2100 ПАО «Северсталь» полиномиальные коэффициенты профилировки «CVC плюс» имеют значения:

– для рабочих валков: $a_1 = 0,162828 \cdot 10^{-2}$; $a_2 = -0,163314 \cdot 10^{-5}$; $a_3 = 0,482081 \cdot 10^{-9}$;

– для опорных валков: $a_1 = -0,920352 \cdot 10^{-3}$; $a_2 = 0,127934 \cdot 10^{-5}$; $a_3 = -0,482081 \cdot 10^{-9}$.

Помимо профилировки, величина поперечной разнотолщинности полосы зависит от точности работы исполнительных механизмов систем регулирования процесса прокатки – осевой сдвижки, гидравлического изгиба, многозонного охлаждения бочек валков, а также системы автоматического регулирования толщины и натяжений полосы.

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 (1.2) не всегда выполнялось: на значительной части длины полос шириной 900 – 1300 мм величина $\delta h_{\text{поп}}$ превышала $0,02h_{\text{ном}}$.

Анализ технологических, конструктивных параметров стана и систем регулирования процесса прокатки показал, что одним из действенных направлений повышения точности формирования поперечного профиля прокатываемых полос является усовершенствование профилировок валков.

Вопросам моделирования профилировок валков посвящено значительное число работ, в которых рассматривается либо определение шлифовочной выпуклости (вогнутости) валков в середине бочки [5 – 9], либо определение шлифовочного профиля, симметричного относительно середины, в виде непрерывной кривой по длине бочки [10, 11].

В работе [5] было предложено определять шлифовочную выпуклость или вогнутость каждого рабочего валка в середине бочки, используя следующее выражение:

$$\Delta D_{\text{шл.р}} = (2y_{\text{р+оп}} + y_{\text{изн.оп}} + \delta_{\text{спл}}) - \left[2\Delta_{\text{Тр}}^{0-L} + \Delta_{\text{Топ}}^{0-L} - \delta_{\text{п}} \frac{h_1}{h_0} \left(\frac{L}{b} \right)^2 \right], \quad (1.4)$$

где $y_{\text{р+оп}}$ – полный прогиб одного рабочего валка (включая прогиб опорного валка и «собственный прогиб» рабочего валка относительно опорного); $y_{\text{изн.оп}}$ – максимальная величина износа в середине бочки одного опорного валка (на диаметр) в момент установки вновь отшлифованного рабочего валка; $\delta_{\text{спл}}$ – величина неравномерности сплющивания одного рабочего валка в контакте с полосой (разность сплющивания) в середине и у края бочки); $\Delta_{\text{Тр}}^{0-L}$, $\Delta_{\text{Топ}}^{0-L}$ – средние значения тепловых выпуклостей рабочего и опорного валков на длине бочки при прокатке; $\delta_{\text{п}}$ – требуемая поперечная

разнотолщинность подката; h_0, h_1 – толщина полосы на входе и выходе из клетки; L – длина бочки рабочего вала; b – ширина прокатываемой полосы.

Сомножитель $(L/b)^2$ учитывает, что $\Delta D_{\text{шл.р}}$ задают для всей длины бочки, а $\delta_{\text{п}}$ относится только к ширине полосы.

На основе метода, предложенного в [5], в работах [3, 6] была получена уточненная формула расчета профилировки валков:

$$\Delta D_{\text{шл.р.сум}} = (L_{\text{р}} / L_{\text{оп}})^2 (2y_{\text{оп}} - \Delta D_{\text{шл.оп}} + \Delta D_{\text{изн.оп}} - \Delta D_{\text{т.оп}} + 2\Delta_{\text{спл.оп}}) + (L_{\text{р}} / b)^2 (2\Delta_{\text{спл.р}} - \delta_{j-1}(h_j / h_{j-1})) - 2\Delta D_{\text{т.р}}, \quad (1.5)$$

где $\Delta D_{\text{шл.р.сум}}$ – суммарная шлифовочная выпуклость пары рабочих валков в середине бочки; $L_{\text{р}}$ и $L_{\text{оп}}$ длины бочек рабочего опорного валков; $y_{\text{оп}}$ – прогиб оси опорного вала на длине $L_{\text{оп}}$; $\Delta D_{\text{шл.оп}}$ – шлифовочная выпуклость опорного вала (разность диаметров в середине и у края бочки); $\Delta D_{\text{изн.оп}}$ – уменьшение выпуклости за счет износа бочки опорного вала на момент установки в клеть вновь отшлифованных рабочих валков (разность износов в середине и у краев бочки опорного вала); $\Delta D_{\text{т.оп}}$ – тепловая выпуклость опорного вала на длине бочки без учета скосов; $\Delta D_{\text{т.р}}$ – тепловая выпуклость рабочего вала на длине бочки; $\Delta_{\text{спл.р}}$ – неравномерность сплющивания рабочего вала в контакте с полосой на её ширине b ; $\Delta_{\text{спл.оп}}$ – неравномерность межвалкового сплющивания на длине $L_{\text{оп}}$; $\delta_{j-1} = h_{(j-1)\text{с}} - h_{(j-1)\text{к}}$ – поперечная разнотолщинность полосы на входе в j -ю клеть; $h_{(j-1)\text{с}}, h_{(j-1)\text{к}}$ – толщины полосы в середине и у боковой кромки на входе в j -ю клеть; h_{j-1}, h_j – номинальные (согласно заданному режиму прокатки) толщины полосы на входе и выходе из j -й клетки.

В работе [7] предлагается при расчете шлифовочных профилировок исходить из условия, что профилировка должна полностью компенсировать прогиб и обеспечивать тем самым равенство вытяжек по ширине полосы:

$$\Delta D_{\text{шл.р}} = f_L^P - \frac{a}{b} h, \quad (1.6)$$

где $\Delta D_{\text{шл.р}}$ – суммарная шлифовочная выпуклость пары рабочих валков в середине бочки; f_L^P – стрела прогиба пары рабочих валков; $a = \frac{\delta H_0}{H_0}$, δH_0 – поперечная разнотолщинность полосы на входе в клеть, H_0 – номинальная (согласно заданному режиму прокатки) толщина полосы на входе в клеть; $b = (B/L)^2$, B – ширина полосы; h – толщина полосы на выходе из клетки; L – длина бочки валка.

Авторами работы [8] предложено величину суммарной выпуклости или вогнутости в середине бочки рабочих валков определять по формуле

$$\Delta D_{\text{шл.р}} = k_{\text{в}} \delta_{\text{н}} (L/B)^2 + R_t^{\text{в}} + R_t^{\text{н}} - y_L^{\text{в}} - y_L^{\text{н}}, \quad (1.7)$$

$R_t^{\text{в}}$, $R_t^{\text{н}}$ – тепловая выпуклость (на радиус) верхнего и нижнего рабочих валков; $y_L^{\text{в}}$, $y_L^{\text{н}}$ – прогиб верхнего и нижнего рабочих валков. Методика определения y_L должна учитывать значения фактического профиля валка. Коэффициент $k_{\text{в}}$, характеризующий удерживающую способность клетки, определяют экспериментальным путем, $k_{\text{в}} = 0 - 0,2$ для непрерывных станов горячей и холодной прокатки; B – ширина полосы; L – длина бочки валка; значение технологически необходимой вогнутости валков $\delta_{\text{н}}$ принимается равным 0,1 - 0,15 мм.

В работе [9] предлагается определять размер профиля бочки по ширине полосы по формуле:

$$f_b = \Delta y_b - \delta R_b - \frac{\Delta h_{\text{поп}}}{2}, \quad (1.8)$$

где Δy_b – прогиб оси рабочего вала на ширине полосы; δR_b – изменение радиуса рабочего вала от изгибающего момента на ширине полосы; $\Delta h_{\text{поп}}$ – поперечная разнотолщинность полосы. Применение для определения Δy_b и δR_b сложного математического аппарата в сочетании с рядом допущений привело к громоздким конечным выражениям, которые затруднительно использовать на практике.

Обобщая анализ работ [5 – 9], следует отметить основной недостаток изложенных в них методов расчета профилировок валков, связанный с невозможностью учета асимметрии SVC профиля относительно середины бочки, а значит следует констатировать их непригодность для решения задачи усовершенствования профилировки валковой системы «СVC-плюс».

Предложенная в [10, 11] методика моделирования шлифовочных профилировок валков листовых станов, основанная на построении активных образующих рабочих валков геометрическим суммированием кривых шлифовочного, теплового профиля и профиля износа с кривыми упругих деформаций, определяемых методом конечных элементов, имеет оценку точности получаемых результатов, но при этом также отсутствует возможность учета выпукло-вогнутых SVC профилировок валков и осевой сдвижки рабочих валков, используемых на современных листовых станах.

Метод поиска профилировки опорных валков SVC, изложенный в [12, 13], включает анализ распределений нагрузок и прогибов валков клетки «кварто» и синтез новой профилировки SVC с уже выравненным распределением межвалковых нагрузок по длине бочек. Математическое описание кососимметричного случая нагружения и деформирования валковой системы использует описание SVC профилировки только в виде синусоиды. Кроме того, метод поиска SVC профилировки не учитывает тепловую выпуклость вала.

На основании изложенного, развитие метода моделирования профилировок валков, представленного ранее в [10, 11], и разработка усовершенствованной профилировки валковой системы стана 2100 для

обеспечения мирового уровня качества по показателю $\delta h_{\text{поп}}$ является весьма актуальной задачей.

Эта задача может быть решена на основе математического описания нагружения и деформирования валковой системы «кварто», отличающегося учетом выпукло-вогнутых CVC профилировок валков и осевой сдвижки рабочих валков.

Многочисленные аналитические подходы к расчету валковой системы «кварто», разработанные А.И. Целиковым [14], П.И. Грудевым [15], С.С. Чепуркиным [16], П.И. Полухиным [17, 18], О. Эмике, К. Лукасом [19], В.М. Салгаником [20] и др. различаются принятыми допущениями, числом и методом учета факторов, определяющих составляющие деформации валков, включая прогиб осей рабочих и опорных валков, упругое сжатие опорных и рабочих валков: взаимное упругое сжатие в межвалковом контакте и упругое сжатие рабочих валков в контакте с прокатываемой полосой. Характерной особенностью всех без исключения разработанных аналитических моделей упругих деформаций валков широкополосных станов [14 – 20] является то, что принятая в них форма кривой упругой деформации подчиняется параболическому закону по всей длине бочки каждого валка. Однако на практике в контакте рабочего валка с полосой параболическая форма имеет место только в средней части бочки, на ширине, примерно равной 90 % ширины полосы, остальные участки бочки имеют иную форму, существенно отличающуюся от параболической.

В ряде работ [21 – 23] обосновывается возможность применения программ, основанных на конечно-элементном моделировании, с различными расчетными схемами. В работе [21] рассмотрена трехмерная конечно-элементная модель валкового узла (рисунок 1.5), включающая не только подшипниковые опоры, но и подушки и контактирующие с ними поверхности узла станин, при этом условия контактного взаимодействия подушек со станинами максимально приближены к реальным.

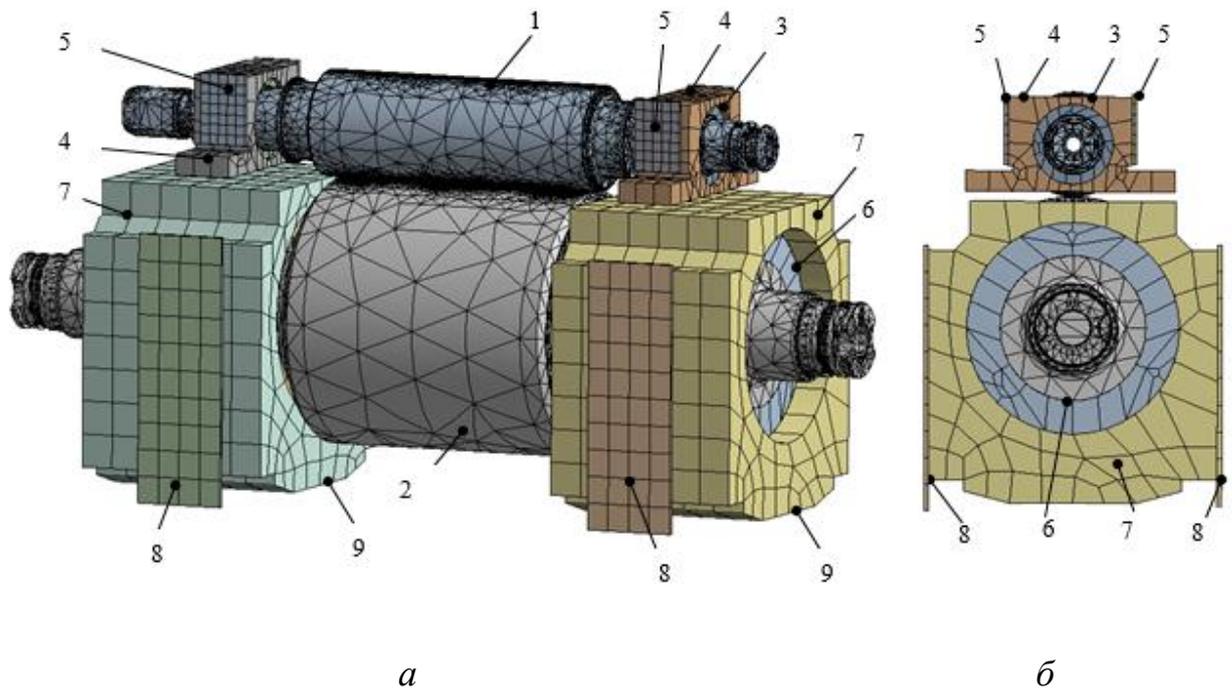


Рисунок 1.5 – Конечно-элементная модель нижней пары валков клетки «кварто»: *а* – общий вид; *б* – вид с неприводной стороны: 1 – рабочий валок; 2 – опорный валок; 3 – подшипники рабочего валка; 4 – подушки рабочего валка; 5 – планки, закрепляемые на опорных плоскостях корпусов, установленных в окна станин; 6 – подшипники опорного валка; 7 – подушки опорного валка; 8 – планки, закрепляемые в вертикальных плоскостях окон станин; 9 – грани подушек опорных валков, находящиеся в контакте с нажимными устройствами

В модели нижней пары валков (рисунок 1.5) нижние грани подушек опорного валка 9 жестко закреплены, так как в реальной клетке они опираются на плоские поверхности клиновых нажимных устройств, установленных на нижних поперечинах станин. Также жестко закреплены грани планок 5 и 8, неподвижно соединенные с вертикальными плоскостями окон станин. Такая схема закреплений, как и в реальной клетке «кварто», дает возможность шейкам рабочих валков с подшипниками и подушками

перемещаться по вертикали и поворачиваться относительно неподвижных вертикальных опорных поверхностей узла станин, преодолевая только силы трения скольжения, а подушки опорных валков ограничены в вертикальных перемещениях контактом с нажимными устройствами.

К модели рабочего валка со стороны полосы была приложена сила, распределенная по площади очага деформации, ширина которого определяется шириной прокатываемой полосы. Длина очага деформации рассчиталась заранее по наиболее точной из известных методик [6]. На поверхности контакта модели рабочего валка с прокатываемым металлом был настроен размер конечных элементов и создана упорядоченная сетка.

Кроме того, в работе [21] была выполнена оценка точности получаемых результатов. Несмотря на достаточно высокую точность метода [21], он обладает рядом недостатков – высокой трудоемкостью расчетов, отсутствием возможности учета выпукло-вогнутых CVC профилировок валков и осевой сдвижки рабочих валков, используемых на современных листовых станах.

Авторы [22, 23] рассматривали упрощенные схемы фиксации шеек валков и не учитывали профилировки валков.

Контактное взаимодействие рабочего валка с полосой в работе [22] приближено к реальному: сила прокатки распределена по всей площади очага деформации, однако сеточные модели валков приняты цилиндрическими, без учета реальных профилировок. Схемы фиксации шеек валков в работе [22], показанные на рисунке 1.6, являются упрощенными: подшипники опорного валка заменены неподвижными кольцевыми сегментами 1 с углом охвата 90° , а подшипники рабочего валка представлены неподвижными кольцевыми сегментами 2, с целью ограничения перемещения в горизонтальном направлении, без учета того, что указанная фиксация препятствует также перемещению шеек по вертикали и повороту их поперечных сечений, имеющим место в реальной клетке «кварто».

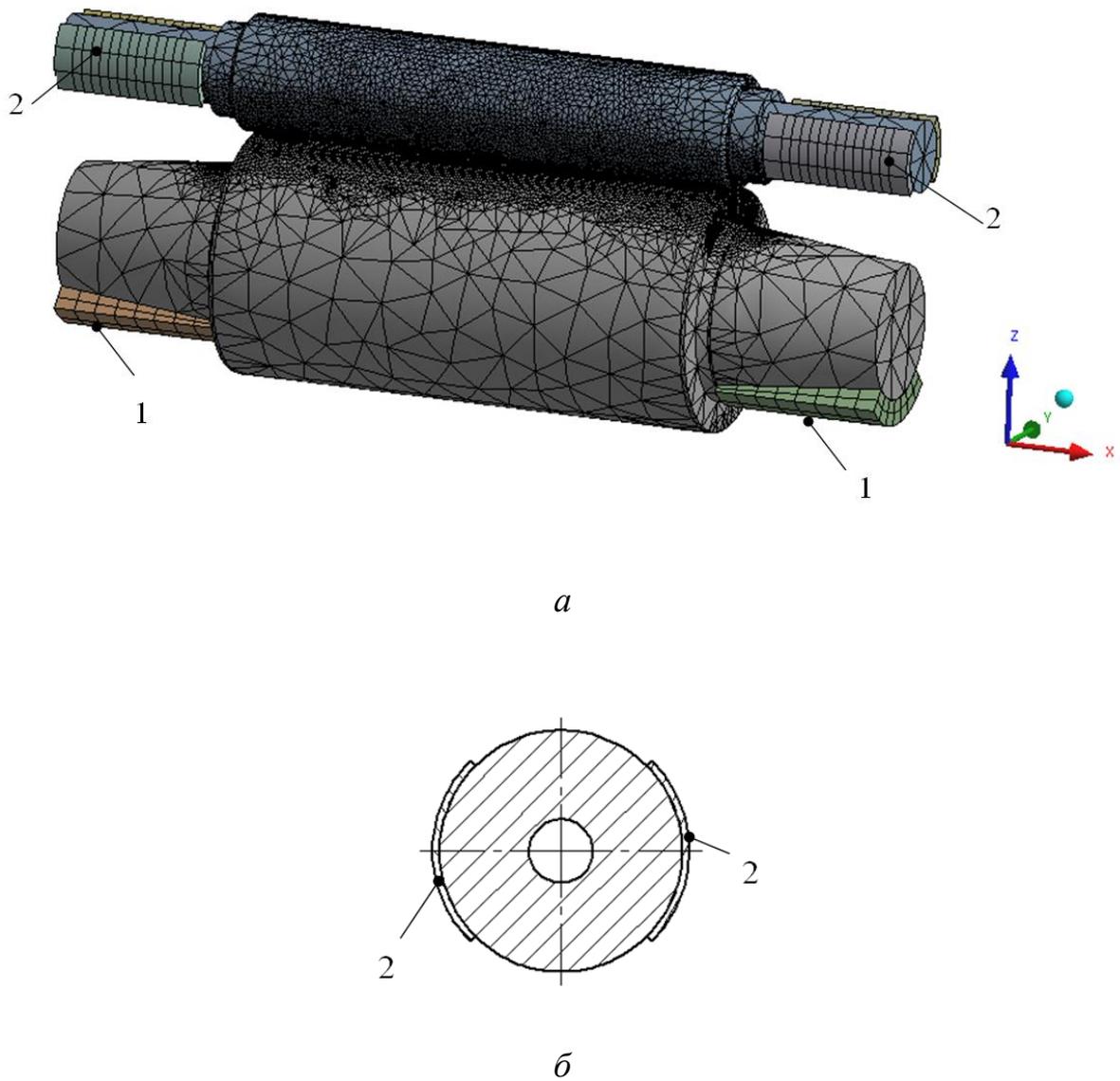


Рисунок 1.6 – Конечно-элементная модель валкового узла клетки «кварто»,
предложенная в работе [22]:

a – общий вид; *б* – сечение шейки рабочего валка

В условии контактного взаимодействия бочек рабочего и опорного валков учитывается возможность взаимного относительного смещения контактных участков бочек рабочего и опорного валков в осевом направлении путем задания коэффициента трения скольжения, равного 0,1.

В работе [23] была разработана конечно-элементная модель валков клетки «кварто» (рисунок 1.7) для определения прогиба валков под действием усилия противоизгиба рабочих валков и оценки влияния усилий противоизгиба на поперечную разнотолщинность прокатываемой полосы. При создании модели принималось допущение о постоянстве прогиба рабочего валка от действия усилия прокатки и учтены плоскости симметрии относительно прокатываемой полосы, продольного сечения и срединной плоскости.

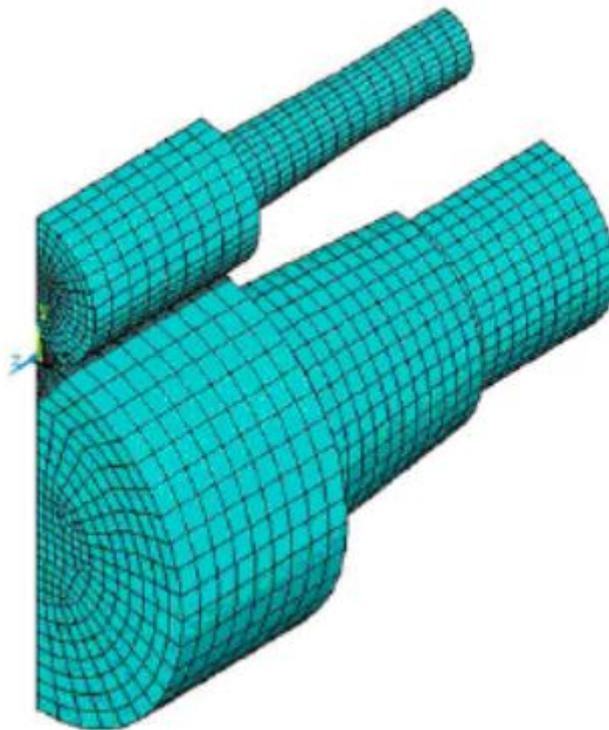


Рисунок 1.7 – Конечно-элементная модель валков, клетки «кварто», предложенная в работе [23]

Кроме перечисленных недостатков, авторами работ [22] и [23] не была выполнена оценка влияния принятых схем валковых узлов на точность результатов расчета.

Приведенный анализ публикаций показал, что требуется разработка математического описания нагружения и деформирования валковой системы «кварто», отличающегося учетом выпукло-вогнутых CVC профилировок

валков и осевой сдвижки рабочих валков, на основе применения вычислительной среды конечно-элементного анализа, а также усовершенствование метода моделирования профилировок валков для повышения точности формирования поперечного профиля прокатываемых полос.

1.2 Обзор публикаций, посвященных дефекту холоднокатаных полос «сварка витков рулонов при колпаковом отжиге»

Дефект стальных полос «сварка витков рулонов при отжиге» возникает в крупных цехах холодной прокатки после отжига в колпаковых печах, приводя к отсортировке части готовых листов из-за повреждений их поверхности, возникающих во время размотки отоженных рулонов перед 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», повторяющихся по длине, расположенных на определенном участке ширины или на всей ширине полосы (рисунке 1.8, *а, б*). При сильной сварке витков в процессе их отрыва во время размотки возможен излом полосы (рисунке 1.8, *в*)

Анализ литературных источников показал, что первые упоминания об этих дефектах относятся к 1969 – 1979 гг.

Факторы, которые могут повлиять на появление сварки витков рулонов в процессе колпакового отжига, впервые систематизированы в работе [24]. Это слишком большая сила натяжения между последней клетью стана холодной прокатки и моталкой, неровная по кромкам смотка полосы, наличие механических загрязнений на поверхности холоднокатаных полос, неблагоприятная геометрия их поперечного профиля, состав эмульсии, подаваемой на валки и полосу для охлаждения и смазки, химический состав стали, неправильный температурный режим отжига и выдержки рулонов в

печи после нагрева. Однако в работе [24] не изложено физическое обоснование сущности влияния указанных факторов на склонность металла к сварке витков, а также отсутствуют градации факторов по степени их значимости и мероприятия, устраняющие дефект.

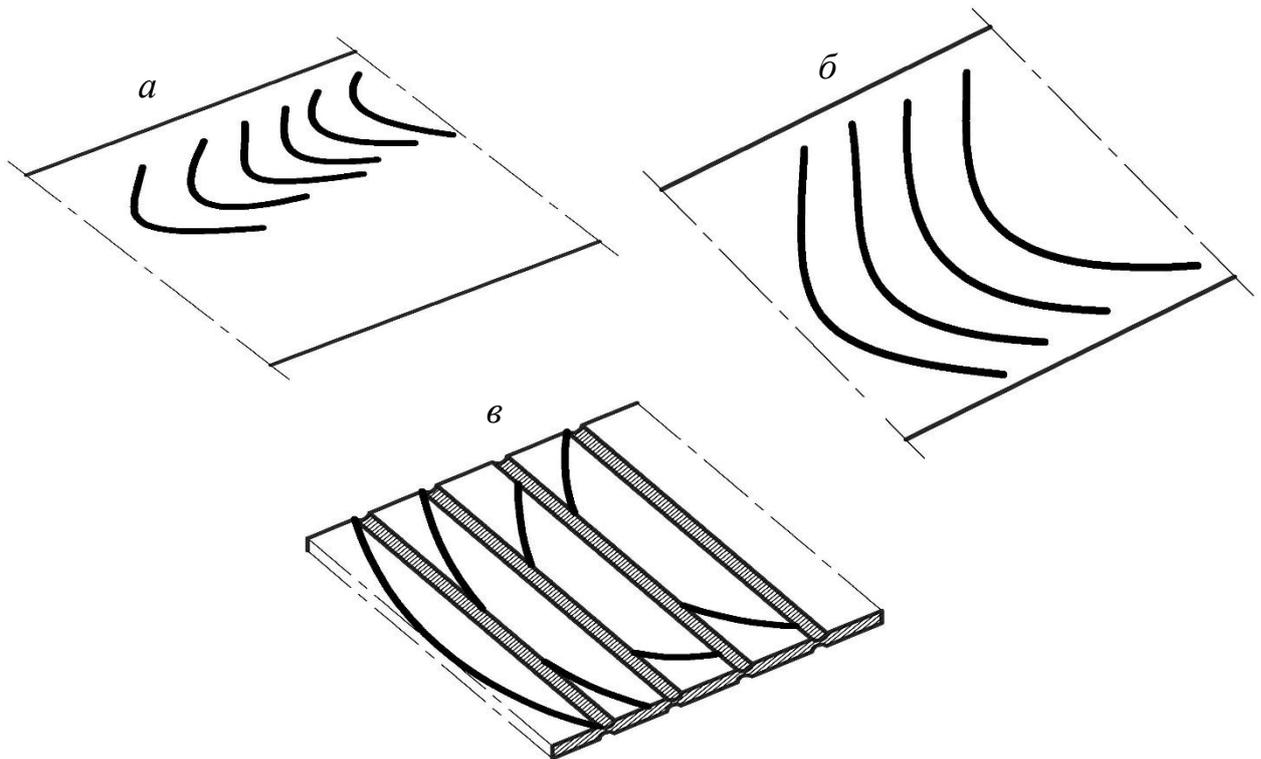


Рисунок 1.8 – Повреждения поверхности холоднокатаных листов в результате сварки витков рулона при отжиге: *а* – на части ширины листа; *б* – на всей ширине листа; *в* – с изломом листа при размотке

В других публикациях того же периода [25 – 29] главное внимание уделено влиянию режимов термической обработки в колпаковых печах на возникновение во время размотки изломов полосы. Другие дефекты, типа показанных на рисунке 1.8, *а*, *б*, их причины и методы устранения в этих публикациях не рассмотрены.

В работе [30] отмечается, что увеличению интенсивности сварки витков при отжиге способствуют такие факторы, как увеличение массы

отжигаемых рулонов, малая шероховатость поверхности холоднокатаных полос, телескопичность и выступающие витки рулонов, повреждение рулонов грузозахватными приспособлениями, увеличение степени суммарной деформации при холодной прокатке и др.

Проведенными лабораторными экспериментами [31] установлено, что интенсивность сварки резко возрастает, начиная с температур 700 – 720 °С. В производственной практике полосы из малоуглеродистой стали отжигают обычно при температурах 650 – 700 °С, но поскольку температурное поле в подмуфельном пространстве печи неравномерно, температура металла в отдельных местах рулонов (чаще всего наружных витков) может достигать 750 °С и более. Неравномерность температуры металла при отжиге в пределах садки существенно возрастает с увеличением массы отжигаемых рулонов, кроме того требует особенно точного регламентирования температурно-временного режима отжига холоднокатаных полос в рулонах большой массы.

В работах [32, 33] рекомендуется устанавливать натяжение смотки полос в рулоны на уровне 30 – 50 МПа, тем самым уменьшая контактные давления между витками и снижая вероятность их сварки. Также отмечается, что такие режимы оказываются весьма эффективными с точки зрения предотвращения сварки витков при производстве холоднокатаных полос в рулонах сравнительно небольшой массы (до 15 – 20 т) и не всегда удовлетворяют требованиям производства холоднокатаных полос в крупногабаритных рулонах (массой более 35 т). Режимы смотки полос в рулоны большой массы должны обеспечивать, кроме предотвращения сварки витков при отжиге, необходимую устойчивость рулонов к различного вида искажениям формы при переработке, например телескопичность рулона [34]. Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные авторами [35, 36], показали, что одновременного обеспечения этих требований можно достигнуть при использовании режимов смотки, предусматривающих

изменение величины натяжения в функции радиуса наматываемого витка рулона, эффективность таких режимов отмечается при производстве жести.

По данным работы [30], увеличение шероховатости сматываемой полосы, уменьшает сваривание витков полос при отжиге. Однако большая шероховатость холоднокатаного металла приводит к повышенной загрязненности поверхности, отрицательно влияет на штампуемость дрессированной малоуглеродистой стали, приводит к возрастанию энергосиловых параметров процесса прокатки. Учитывая это, для поверхности холоднокатаной стали (после непрерывного стана) в качестве оптимальной в работе [30] рекомендована шероховатость, равная примерно $R_a = 1,5$ мкм при высокой плотности микровыступов (45 – 50 на 1 см длины микропрофиля поверхности). Для получения этой шероховатости на полосе валки последней клетки стана холодной прокатки необходимо насекать до шероховатости $R_a = 3,0 – 3,5$ мкм.

Также в работе [30] отмечено, что искажения формы холоднокатаной полосы, обусловленные неудовлетворительным профилем поперечного сечения подката, приводят к более сильной сварке витков по сравнению с искажениями формы из-за нарушения технологии холодной прокатки, например местного перегрева валков. Наиболее неблагоприятным с точки зрения локальной сварки является вогнутый профиль поперечного сечения подката. В этом случае рассматриваемые дефекты образуются на кромках, что существенно увеличивает опасность порывов полос при дрессировке. Наилучшим для производства тонких холоднокатаных полос и жести является горячекатаный подкат, имеющий выпуклый профиль поперечного сечения с поперечной разнотолщинностью в пределах 0,02 – 0,05 мм. Локальные искажения профиля поперечного сечения подката не должны превышать 0,02 мм, а разнотолщинность кромок должна быть не более 0,03 мм.

В последующие два десятилетия не было обнаружено, вплоть до 2003 г., ни одной опубликованной работы по данной тематике. 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, направленным на предотвращение сварки витков холоднокатаных рулонов в процессе колпакового отжига.

В работе [37], опубликованной в 2004 г., изложены результаты исследования влияния режимов смотки и отжига полос на склонность к свариваемости витков рулона, упомянута разработанная авторами компьютерная модель температурного и напряженного состояния рулонов в ходе прокатки и смотки полос, на участке между станом холодной прокатки и колпаковыми печами и последующего отжига. Модель позволяет спрогнозировать вероятность сварки (слипания) витков по всей площади полосы с учетом шероховатости ее поверхности, неравномерности коэффициентов вытяжки по ее ширине и межвитковых давлений. Однако сущность модели, ее алгоритмы не раскрыты, конкретные результаты ее апробации не приводятся.

В статье [38], опубликованной в 2007 г., факторы, которые могут повлиять на появление сварки витков, разделены на три группы:

1. **До отжига:** химический состав и механические свойства стали; поперечный профиль подката; натяжение при смотке, чистота поверхности полосы, ее толщина, ширина и диаметр рулона.

2. **Во время отжига:** положение рулона в садке, скорости нагрева и охлаждения.

3. **После отжига:** сила натяжения и скорость полосы при размотке рулона.

Авторы статьи [38] впервые отметили, что на склонность к сварке витков влияет пластичность стали: малоуглеродистые нелегированные стали, обладая большей пластичностью, чем легированные, высокоуглеродистые, наиболее склонны к появлению указанного дефекта.

Кроме того, они установили, что при малой выпуклости поперечного профиля полосы (меньше 0,04 – 0,09 мм) склонность к сварке витков увеличивается. По их мнению, одним из ключевых факторов, способствующих или препятствующих сварке витков, является сила натяжения между последней клетью стана холодной прокатки и моталкой. Уменьшение силы натяжения уменьшает склонность к сварке, однако, если при смотке растягивающее натяжение не превышает 22 МПа, рулон при транспортировке к колпаковым печам теряет жесткость: его торцы становятся неровными, и во время установки под колпак боковые кромки могут деформироваться, что способствует их сварке при отжиге.

В статье [38] также указано, что склонность к сварке витков зависит от толщины полосы: полосы толщиной менее 7 мм особенно чувствительны к появлению этого дефекта.

Градация указанных факторов по степени значимости влияния на сварку витков, а также данные о разработке и промышленных испытаниях технологии, сводящей к минимуму отсортировку по сварке витков рулонов при отжиге, в работе [38] не приводятся.

Исследования, результаты которых опубликованы в 2014 г. в работе [38], были посвящены частному вопросу: влиянию на дефект «излом» (рисунок 1.8, в) режимов отжига в колпаковых печах с водородной атмосферой. С применением программной среды Deform-3D авторы разработали новые режимы отжига, снизившие отсортировку по данному дефекту в условиях листопрокатного цеха №5 Магнитогорского металлургического комбината с 4,7% до 2,83%. Этот результат был достигнут за счет снижения межвитковых контактных напряжений в рулонах путем уменьшения скорости нагрева и охлаждения, а также дифференциации продолжительности выдержки под нагревательным колпаком в зависимости от толщины полосы.

В статье [40], опубликованной также в 2014 г., описаны топографические особенности поверхности полос, поврежденной из-за

слипания витков в рулоне при отжиге, приведены ее макро- и микротопографические изображения. Вопросы технологии производства полос, факторы, влияющие на склонность к данному дефекту, в этой статье не рассматриваются. Кроме того, применив термин «слипание», авторы исказили сущность дефекта, т.к. витки между собой не слипаются, а свариваются. Согласно принятой в русском языке терминологии, слипание (синоним слова «склеивание») означает соединение двух поверхностей с помощью клея. Эту же ошибку допустили авторы работ [37, 39].

За период 1991 – 2010 г.г. в России и за рубежом опубликовано 13 книг (монографий, справочников, учебных пособий), посвященных технологии производства холоднокатаного листового проката, включающих вопросы обеспечения высокого качества его поверхности [3, 6, 41 – 49]. Так, в справочнике [41] рассматриваются методы получения заданной шероховатости поверхности, в том числе – за счет подготовки поверхности рабочих валков (насечки, полировки, шлифовки).

В монографии [42] в разделе «Стабилизация шероховатости поверхности полосы» отмечено, что при отжиге в колпаковых печах холоднокатаных рулонов может происходить «схватывание» витков рулонов друг с другом. Физический смысл понятия «схватывание» в книге не раскрыт, причины его появления не рассмотрены, указано только, что схватывание может приводить при размотке полосы на дрессировочном стане к дефекту типа «излом». Для борьбы с этим дефектом предложено лишь управлять шероховатостью рабочих валков стана холодной прокатки.

В монографии [43] представлены результаты исследований и разработок в области теории и технологии тонколистовой прокатки, в том числе обобщены идеи, направленные на повышение эффективности производства и улучшение качества тонколистовой продукции. В ней обобщены вопросы, связанные со свариванием витков полосы в рулонах при отжиге металла и рассмотренные в работах [30, 33, 35, 36].

В монографиях [44, 45] рассматриваются методы улучшения таких показателей качества холоднокатаных листов, как продольная и поперечная разнотолщинность, неплоскостность, штампуемость, механические свойства. Дефект «сварка витков рулона при отжиге» в этих работах не упоминается.

В монографии [3] и справочнике [6] обобщены результаты теоретических и экспериментальных исследований, выполненных автором и его учениками в период 1990 – 2007 гг., направленных на повышение энергоэффективности станов холодной прокатки, улучшение микрогеометрии поверхности холоднокатаных полос, устранение ребристости на их поверхности путем исключения вибрации рабочих клеток, совершенствование теплового режима и профилировок валков, повышение их стойкости и уменьшение расхода. Влияние технологических факторов на склонность к межвитковой сварке отожженных рулонов в этих работах не рассмотрено, упоминание о данном дефекте отсутствует.

В монографии [46] изложены технология производства автомобильных листов, вопросы их качества и виды дефектов. В числе дефектов упомянуто «схватывание» между витками, которое определено как возникновение между ними металлических связей под влиянием межвиткового давления и высокой температуры во время отжига. По смыслу это определение совпадает с определением «межвитковая сварка». В качестве причин схватывания указаны параметры температурного режима отжига и шероховатости поверхности полосы. Остальные факторы и методы устранения этого дефекта подробно не рассмотрены.

В учебном пособии [47], авторы – ученые Санкт-Петербургского государственного политехнического университета – подробно излагают технологию производства холоднокатаных стальных листов, включая обеспечение заданной микрогеометрии заданной поверхности, но вопросы межвитковой сварки (схватывания, слипания) не рассматривают.

Монография [48] посвящена современным методам повышения качества листовой стали. В ней приведена классификация поверхности и

внутренних дефектов листов, большое внимание уделено условиям формирования оптимальной структуры и текстуры металла, механических и пластических свойств. Вопросы межвитковой сварки при отжиге холоднокатаных рулонов в колпаковых печах в этой монографии не затрагиваются, какие – либо упоминания об этом дефекте отсутствуют.

Монография [49], изданная в 2009 г. на английском языке, написанная международным коллективом авторов из Японии, США, Италии, Канады, Германии, Великобритании, России, Китая и Австрии, посвящена передовым технологиям в листопрокатном производстве, новым концепциям в модернизации листовых станов, в моделировании их параметров, автоматизации, контроля их технологических режимов и показателей качества. Проблема межвитковой сварки при отжиге в ней не упоминается.

В справочнике [50] детально описаны конструкции и технологические процессы производства холоднокатаных листов и полос, в том числе – варианты конструкций колпаковых печей, режимов отжига в них рулонов, поступающих со стана холодной прокатки, и установок для контроля качества готовой продукции. Так же, как в монографии [49] и в справочнике [50], дефект «сварка витков рулона при отжиге» не упоминается.

Помимо монографий, справочников, учебников и учебных пособий, вопросы качества холоднокатаных стальных листов рассматривались в указанный период во многих статьях, опубликованных в российских журналах и сборниках материалов международных конференций. Так как дефект «сварка витков рулона при отжиге» проявляется на дрессировочном стане, были проанализированы в первую очередь публикации, посвященные различным аспектам процесса дрессировки [51 – 71]. В них много внимания уделено моделированию энергосиловых параметров дрессировочных станов и методам экономии энергии, повышению точности расчета параметров межвалкового трения и трения в очаге деформации, усилия и мощности процесса дрессировки, влиянию режима дрессировки на качество поверхности и штампуемость холоднокатаных, отожженных и

продрессированных листов, совершенствованию технологии и оборудования дрессировочных станов.

Каких-либо упоминаний о появлении в процессе дрессировки дефекта межвитковой сварки и методах его минимизации за счет корректировки режима дрессировочного стана мы в этих публикациях не обнаружили. В 2017 г. указанные публикации были обобщены в монографии [71], в которой также отсутствует упоминание о межвитковой сварке.

Далее был выполнен анализ статей, посвященных качеству холоднокатаных листов и методам его улучшения. Поскольку качество холоднокатаных листов во многом зависит от качества горячекатаного проката, в этом анализе мы рассматривали публикации, посвященные совершенствованию технологии и оборудования станов как холодной, так и горячей прокатки, в том числе прокатных валков, микрогеометрии поверхности и профилировки которых влияют на качество поверхности, поперечный профиль и плоскостность полос [72 – 90].

Часть этих публикаций посвящена исследованию и устранению на поверхности холоднокатаных автомобильных листов дефектов «поперечная ребристость» и «полосы нагартовки» [77, 78, 86], однако связи с дефектом «сварка витков рулонов» эти дефекты не имеют.

Публикации [76, 85, 90] посвящены методам улучшения плоскостности листов; в статьях [73, 74, 79 – 82, 83, 86, 87] изложены исследования различных аспектов микрогеометрии поверхности валков и полосы, в том числе методы устранения таких дефектов, как «сверхнормативная прикромочная шероховатость». Статьи [83, 89] рассматривают методы уменьшения продольной и поперечной разнотолщинности горячекатаных и холоднокатаных полос.

Подводя итог анализу статей, посвященных улучшению качества холоднокатаных листов, можно сделать вывод, что дефект «сварка витков рулона при отжиге» в них не рассматривается.

В последней по времени публикации, посвященной этому дефекту (2017 г.) [91], изложено влияние технологии загрузки колпаковой печи на возможность появления межвитковой сварки.

Одновременно в ней затрагивается и влияние некоторых других факторов: режима смотки, размеров рулона, сортамента продукции и технологии отжига. По данным авторов, после теоретических и экспериментальных исследований усовершенствованная технология была успешно внедрена в производство. Факторы, относящиеся к технологии прокатки, в этой статье не затрагиваются.

Обобщая результаты аналитического обзора, можно сделать следующие выводы.

1. В последние десятилетия 20 века, когда дефект «сварка витков рулона при отжиге» стал известен технологам листопрокатного производства, а борьба с ним приобрела актуальность, в подавляющем большинстве монографий, статей, справочников, учебников и учебных пособий, относящихся к листовой прокатке, этот дефект даже не упоминается.

2. За весь указанный период обнаружено только 12 публикаций (из более 60-ти, использованных в обзоре), относящихся к межвитковой сварке рулонов, причем их авторы уделили внимание лишь одному или нескольким факторам технологии, которые могут повлиять на появление этого дефекта.

Ни в одной из этих публикаций не рассмотрены все факторы в совокупности, не выполнено их ранжирование по степени значимости влияния на данный дефект, не разработана методика прогнозирования вероятности его появления, учитывающая значимость каждого фактора и достоверно объясняющая физическую сущность его влияния на сварку витков рулона.

1.3 Задачи диссертационной работы, вытекающие из обзоров публикаций, изложенных в п. 1.1 и 1.2

1.3.1 Выяснение причин появления сверхнормативной поперечной разнотолщинности холоднокатаных полос, прокатанных в валках имеющих профилировку «CVC-плюс», разработка методов устранения этих причин, испытания их и внедрение в производство.

1.3.2. Формирование статистически значимой базы данных о фактических параметрах холодной прокатки, отжига рулонов в колпаковых печах, дрессировки и показателях свариваемости витков рулонов при отжиге.

1.3.3. Разработка математической модели для градуировки факторов технологии по значимости их влияния на сварку витков рулона.

1.3.4. Моделирование взаимосвязи факторов технологии и свариваемости витков в рулоне. Выявление наиболее значимых факторов, объяснение физической сущности влияния на сварку витков каждого значимого фактора.

1.3.5. Разработка усовершенствованных технологических режимов производства холоднокатаных стальных полос, минимизирующих вероятность появления дефекта "сварка витков рулона при отжиге".

1.3.6. Промышленные испытания, корректировка и внедрение в производство усовершенствованных технологических режимов.

Выводы по главе 1

1. Выполнен аналитический обзор публикаций, посвященных сверхнормативной поперечной разнотолщинности полос, прокатанных в валках, имеющих профилировки «CVC плюс»

2. Установлено, что причины появления сверхнормативной поперечной разнотолщинности и методы ее устранения не нашли достаточного освещения в известных публикациях.

3. Анализ известных методов моделирования профилировок валков показал, что в них отсутствует возможность учета выпукло-вогнутых CVC профилировок валков.

4. Установлено, что отсутствует математическое описание нагружения и деформирования валковой системы «кварто» с учетом выпукло-вогнутых CVC профилировок валков и осевой сдвижки рабочих валков на основе применения вычислительной среды конечно-элементного анализа.

5. Выполнен аналитический обзор публикаций, посвященных дефекту «сварка витков рулона при колпаковом отжиге».

6. Установлено, что в последнее десятилетие 20 века и в первые два десятилетия 21 века, когда борьба с дефектом «сварка витков рулона при колпаковом отжиге» приобрела актуальность, в подавляющем большинстве монографий, статей, справочников, учебников и учебных пособий (из более 60-ти, использованных в обзоре) этот дефект не упоминался.

7. Обнаружено 12 публикаций, относящихся к межвитковой сварке рулонов. Ни в одной из них не рассмотрены все факторы в совокупности, влияющих на этот дефект, не выполнено их ранжирование по степени значимости этого влияния, не изложена методика прогнозирования вероятности его появления, учитывающая значимость каждого фактора.

8. На основании результатов аналитических обзоров, изложенных п.п.1 – 5, сформулированы задачи данной диссертационной работы,

закрывающиеся в уточнении причин появления сверхнормативной поперечной разнотолщинности и дефекта «сварка витков рулона», в разработке методов устранения этих причин, их промышленной проверке и внедрение в производство.

ГЛАВА 2. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОФИЛИРОВОК «CVC ПЛЮС» СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ДЕФЕКТА «СВЕРХНОРМАТИВНАЯ ПОПЕРЕЧНАЯ РАЗНОТОЛЩИННОСТЬ ХОЛОДНОКАТАНЫХ СТАЛЬНЫХ ПОЛОС»

Исходя из результатов аналитического обзора, изложенных в главе 1 (п. 1.1), в диссертации была поставлена задача выяснить, возможно ли так усовершенствовать профилировки валковой системы «CVC плюс», чтобы добиться выполнения требования (1.2) и тем самым обеспечить мировой уровень качества готовых полос по показателю $\delta h_{\text{пол}}$.

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 [11, 21] и реализованного в программном комплексе SIMULIA Abaqus [92, 93].

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 рисунке 2.1 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.

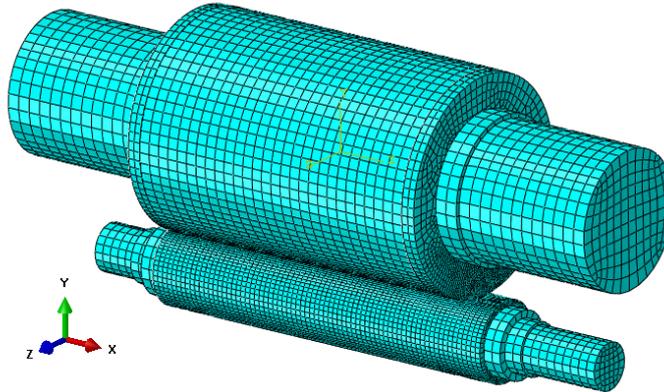
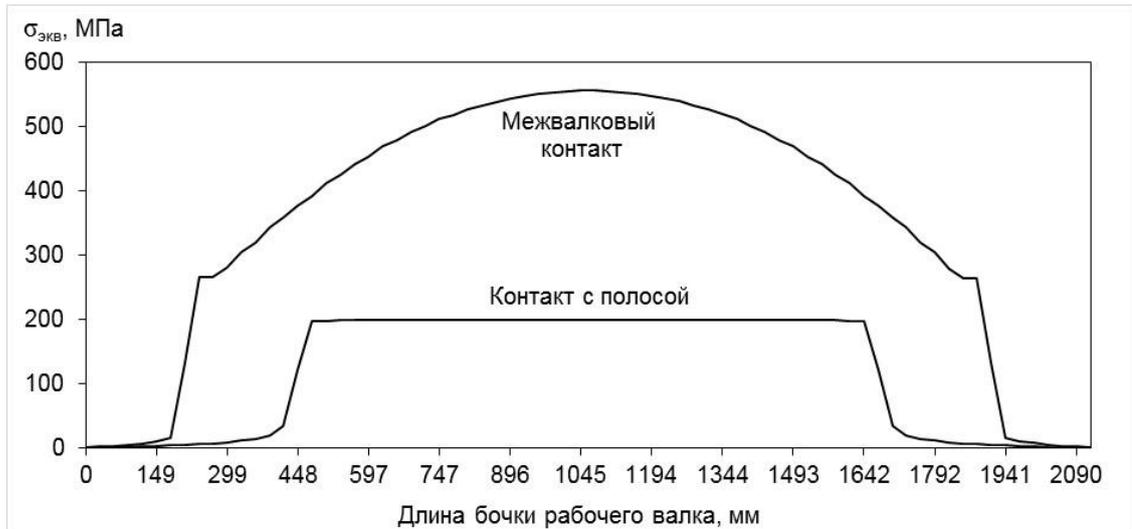


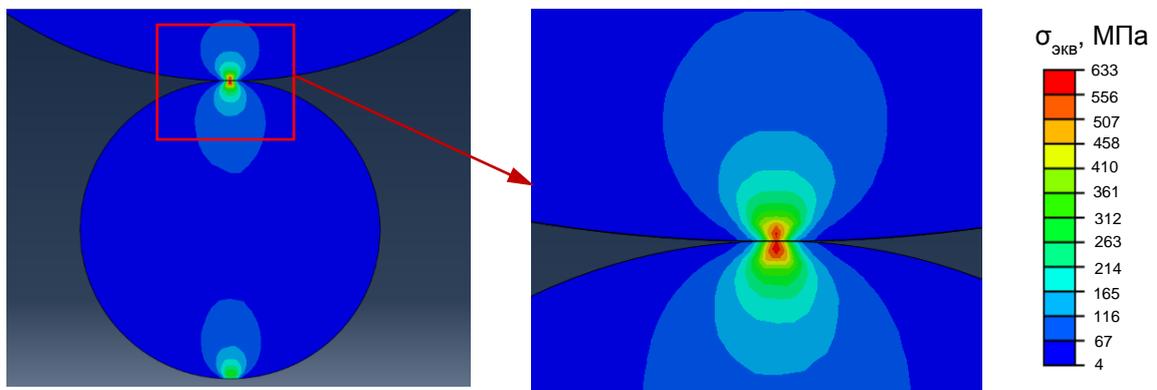
Рисунок 2.1 – Конечно-элементная модель валковой системы
4-клетевого стана

В расчете принято, что модуль упругости материала валков равен $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона материала валков – $\mu = 0,3$; коэффициент трения в паре «рабочий валок – опорный валок» – $f = 0,2$. В контакте рабочего и опорного валков и на бочке рабочего валка в контакте с полосой выполнено измельчение сетки, при этом плотность сетки была выбрана таким образом, чтобы дальнейшее ее увеличение не приводило к росту значений анализируемых параметров.

На рисунке 2.2 в качестве примера представлены результаты расчета напряжений валковой системы в клетке № 2 при прокатке полосы из стали 08пс шириной $b = 1250$ мм с усилием $P = 10$ МН. Диаметры бочек валков: рабочего $D_p = 455$ мм, опорного $D_{оп} = 1220$ мм. Анализ полученных распределений (рисунок 2.2, а) 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. Усилие прокатки P распределяется в межвалковом контакте на



а



б

в

Рисунок 2.2 – Распределение эквивалентных напряжений по длине бочки рабочего вала (а), по сечению рабочего вала (б) и в контакте валков (в)

существенно меньшей площади, чем в очаге деформации и вызывает в межвалковом контакте более высокие напряжения. Также отличается характер распределения напряжений по длине межвалкового контакта по сравнению с контактом по ширине полосы: в межвалковом контакте они существенно неравномерны, с максимумом в середине бочек, что объясняется конструктивными особенностями опорного вала 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.

Наиболее нагруженный участок по радиусу рабочего вала (рисунок 2.2, б и в) находится внутри на глубине примерно 3 мм от поверхности и составляет 633 МПа, тогда как на поверхности эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв}}$ равно 556 МПа. При дальнейшем удалении от поверхности напряжения быстро уменьшаются и на глубине 20 мм составляют 224 МПа, на глубине 40 мм – 128 МПа, далее становятся незначительными.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными, приведенными в работах [3, 5, 6].

На основе разработанной конечно-элементной модели валковой системы 4-клетевого стана был выполнен анализ влияния осевой сдвижки и гидроизгиба рабочих валков, а также износа валков на их напряженно-деформированное состояние.

Влияние осевого перемещения рабочих валков. Исследование выполнено при разных значениях смещения верхнего рабочего вала C : при смещении в сторону привода значения положительные, в сторону обслуживания – отрицательные. Из распределений напряжений по длине бочки рабочего вала (рисунок 2.3, а) видно, что при $C = +70$ мм напряжения в межвалковом контакте валков незначительно возрастают (на 6 МПа), а при $C = -70$ мм, наоборот уменьшаются на 20 МПа. Также был сделан вывод о незначительном влиянии осевой сдвижки на изменения напряжений в контакте с полосой и по радиусу вала.

Кривые упругих деформаций рабочего вала в вертикальной плоскости в контакте с полосой (рисунок 2.3, б) показывают, что при смещении рабочего вала в сторону привода $C > 0$ уменьшается обжатие полосы в середине, приводя к росту разности прогибов рабочего вала в середине и по кромке полосы, а при $C < 0$ – обжатие полосы в середине увеличивается, вызывая уменьшение разности прогибов. Так, смещение рабочего вала с $C = +70$ мм до $C = -70$ мм позволит снизить разность упругих деформаций

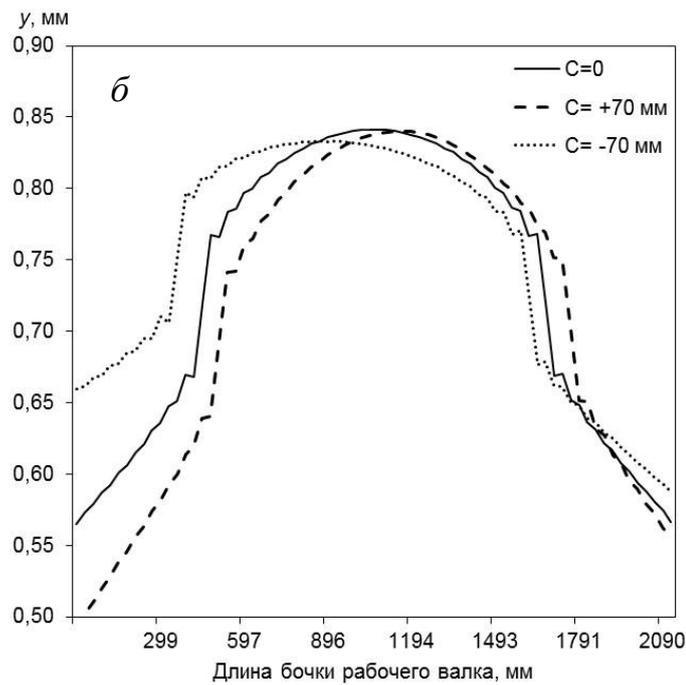
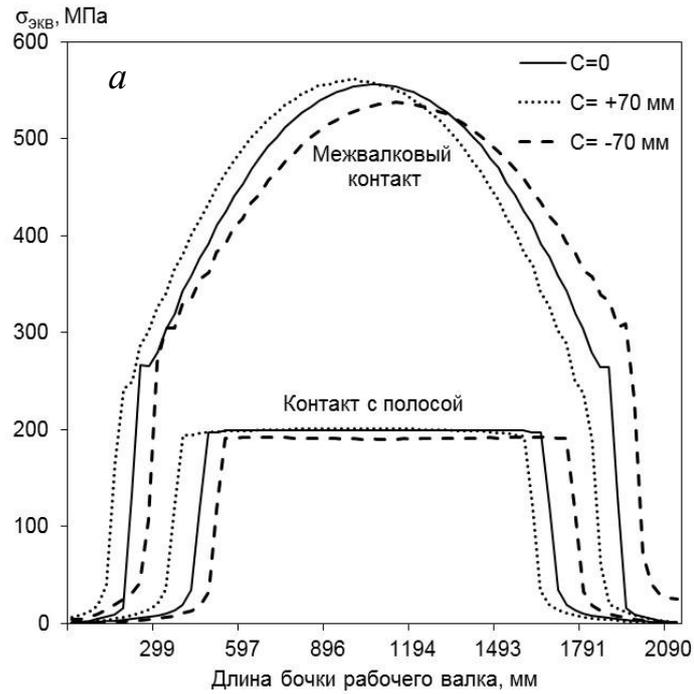


Рисунок 2.3 – Распределение по длине бочки верхнего рабочего валка напряжений (а) и упругих деформаций в контакте с полосой (б) в зависимости от значения C осевой сдвижки ($D_p = 455$ мм; $D_{\text{оп}} = 1220$ мм; $b = 1250$ мм; $P = 10$ МН)

бочки рабочего вала на ширине полосы, равной 1250 мм, с 0,09 мм до 0,06 мм, то есть на 33 %, обеспечивая уменьшение ее поперечной разнотолщинности.

Влияние гидравлического изгиба рабочих валков. Построение кривых распределения напряжений по длине бочки рабочего вала в межвалковом контакте (рисунок 2.4, а) и упругих деформаций верхнего рабочего вала в вертикальной плоскости в контакте с полосой (рисунок 2.4, б) было выполнено при значениях сил противоизгиба, равных 85 кН и 250 кН, и дополнительного изгиба – 85 кН в клетки № 4 с параметрами $D_p = 480$ мм; $D_{оп} = 1220$ мм; $P = 7,6$ МН; $C = 16$ мм; $b = 1250$ мм.

При работе противоизгиба напряжения в межвалковом контакте уменьшаются, при дополнительном изгибе – возрастают. Разность упругих деформаций бочки рабочего вала на ширине полосы изменяется от 0,01 мм при максимальном значении противоизгиба до 0,04 мм при дополнительном изгибе, а значит в клетях 4-клетевого стана гидравлическим изгибом обеспечивается широкий диапазон регулирования (до 75 %) поперечной разнотолщинности полосы.

Моделирование влияния износа профиля валков. Анализ профилограмм износа валков стана 2100 в количестве 34 штук (14 опорных и 20 рабочих) показал, что с ростом наработки износ увеличивается и наблюдается в средней части бочек валков. У рабочих валков в среднем на радиус износ составляет 0,006 мм, у опорных – 0,035 мм. На рисунке 2.5, а в качестве примера приведен исходный профиль и профиль износа верхнего опорного вала при наработке 24500 т, максимальное значение износа на радиус составило 0,022 мм.

По результатам моделирования установлено, что износ бочек рабочих и опорных валков не приводит к существенному увеличению напряжений в рабочих валках, но отмечается рост упругих деформаций в середине бочки в контакте с полосой (рисунке 2.5, б). Если сравнить разность прогибов рабочего вала по ширине полосы без износа и с износом опорного вала, то

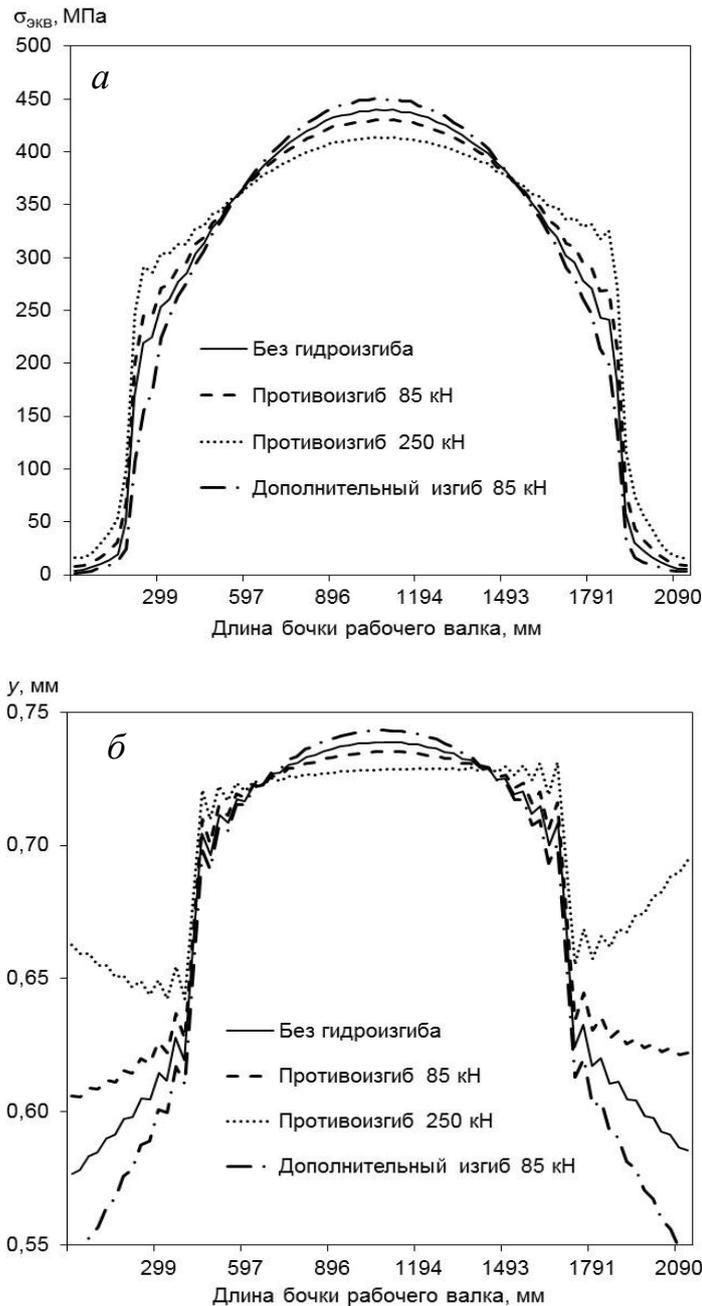


Рисунок 2.4 – Кривые распределения напряжений по длине бочки рабочего валка в межвалковом контакте (а) и упругих деформаций верхнего рабочего валка в вертикальной плоскости в контакте с полосой (б) при разных значениях сил гидравлического изгиба

в последнем случае она возрастает на 25 %. Износ рабочего валка, в силу его меньшей наработки, не так значительно влияет на разность прогибов рабочего валка в середине и по кромке полосы.

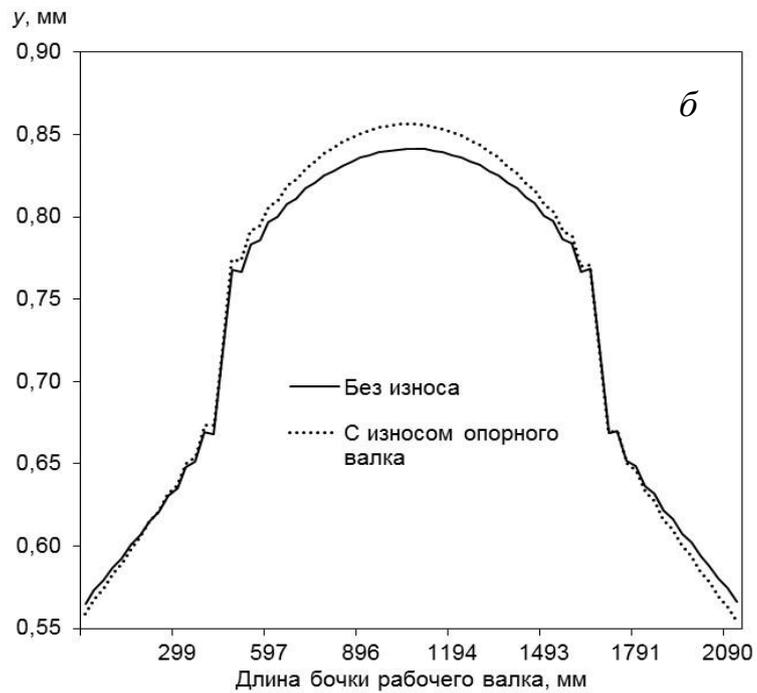
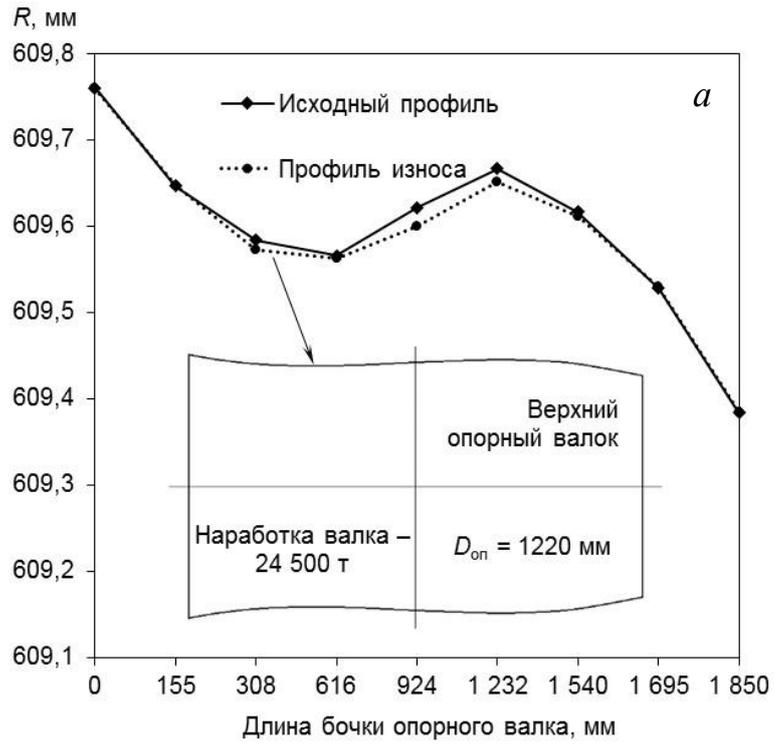


Рисунок 2.5 – Исходный профиль и профиль износа опорного валка (а), кривые распределения деформаций по длине бочки рабочего валка (б) ($D_p = 455$ мм; $D_{оп} = 1220$ мм; $C = 0$; $b = 1250$ мм; $P = 10$ МН)

Выполненное исследование влияния осевой сдвижки и гидроизгиба рабочих валков на напряженно-деформированное состояние рабочих валков при холодной прокатке показало, что средства регулирования, используемые на 4-клетевом широкополосном стане холодной прокатки 2100 ПАО «Северсталь», обеспечивают широкий диапазон регулирования поперечной разнотолщинности полосы при прокатке без существенного роста напряжений в рабочих валках. Также моделированием установлено, что износ бочек рабочих и опорных валков на стане 2100 не приводит к существенному увеличению напряжений в рабочих валках, но отмечается рост упругих деформаций в середине бочки в контакте с полосой.

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 $\delta h_{\text{поп}}$ в клетки № 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 методике, предложенной в работе [3].

В качестве примера на рисунке 2.6 приведены суперпозиции кривых упругих деформаций 1 и теплового профиля 2 верхнего рабочего валка для двух образцов № 3 и № 2, а также получаемые поперечные профили полос. Сравнение результатов расчета поперечной разнотолщинности и измерения ее на образцах представлено на рисунке 2.7, из которого видно, что погрешности расчета находятся в диапазоне 2 – 15 %, а среднее ее значение составляет 8,5 %. А значит, конечно-элементная модель с достаточной точностью определяет упругие деформации валковой системы при прокатке, необходимые для расчета поперечного профиля полосы, и может быть использована для совершенствования CVC профилировки валков.

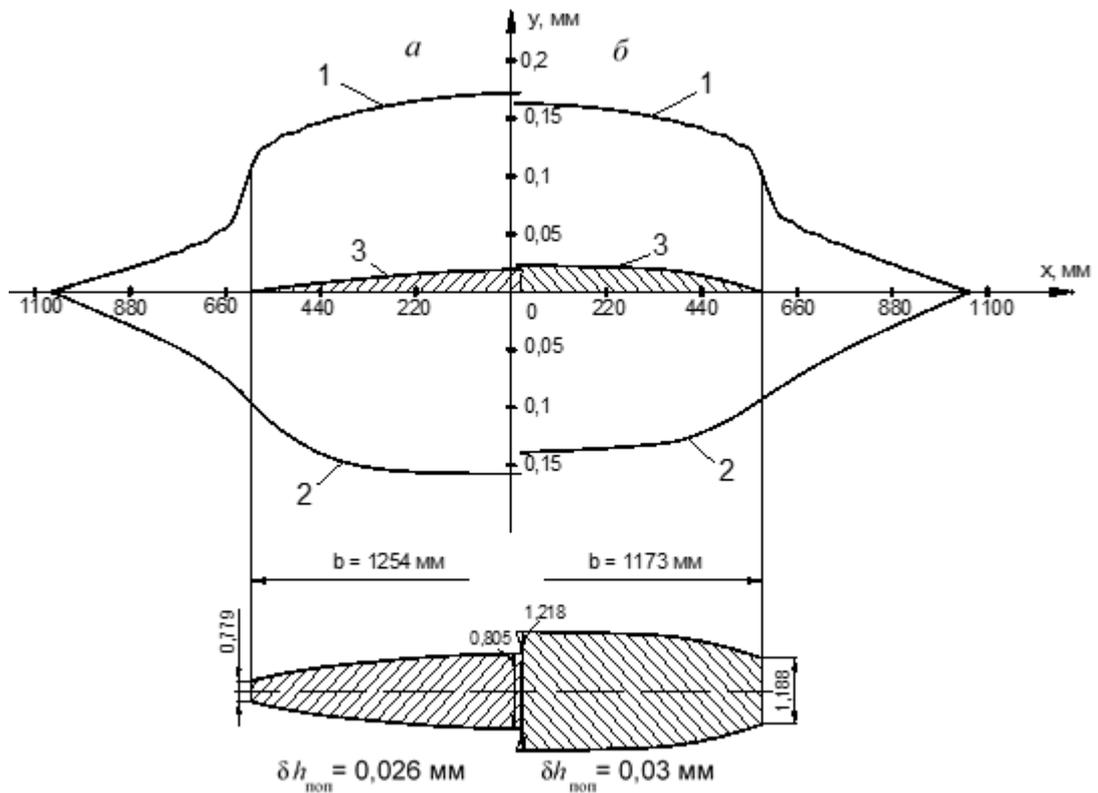


Рисунок 2.6 – Определение поперечного профиля полосы методом суперпозиции кривых упругих деформаций профилированного вала 1 и его теплового профиля 2: *a* – образца № 3; *б* – образца № 2

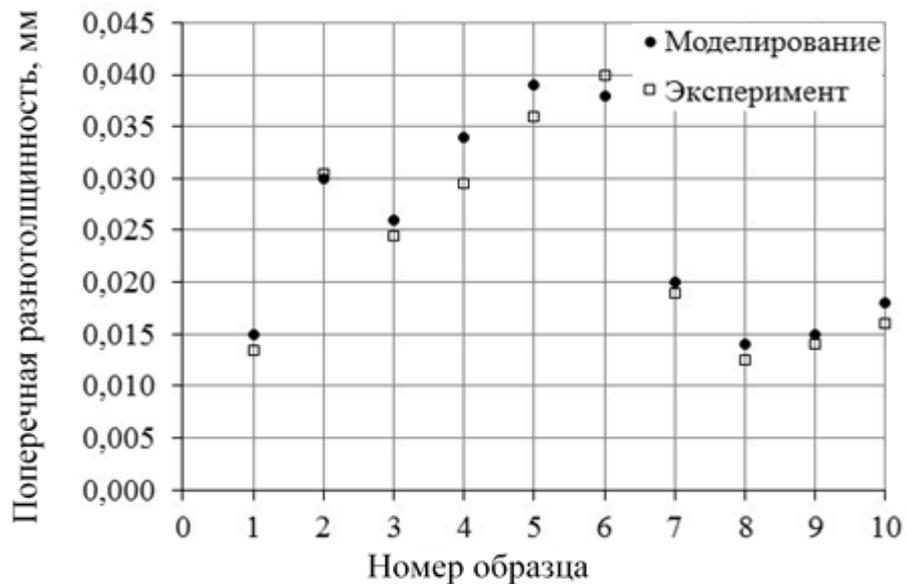


Рисунок 2.7 – Сравнение результатов расчета поперечной разнотолщинности и измерения ее на образцах

С этой целью было выполнено многовариантное моделирование выпукло-вогнутых профилировок рабочих валков [94, 95], 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 «CVC 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 рисунке 2.8 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.

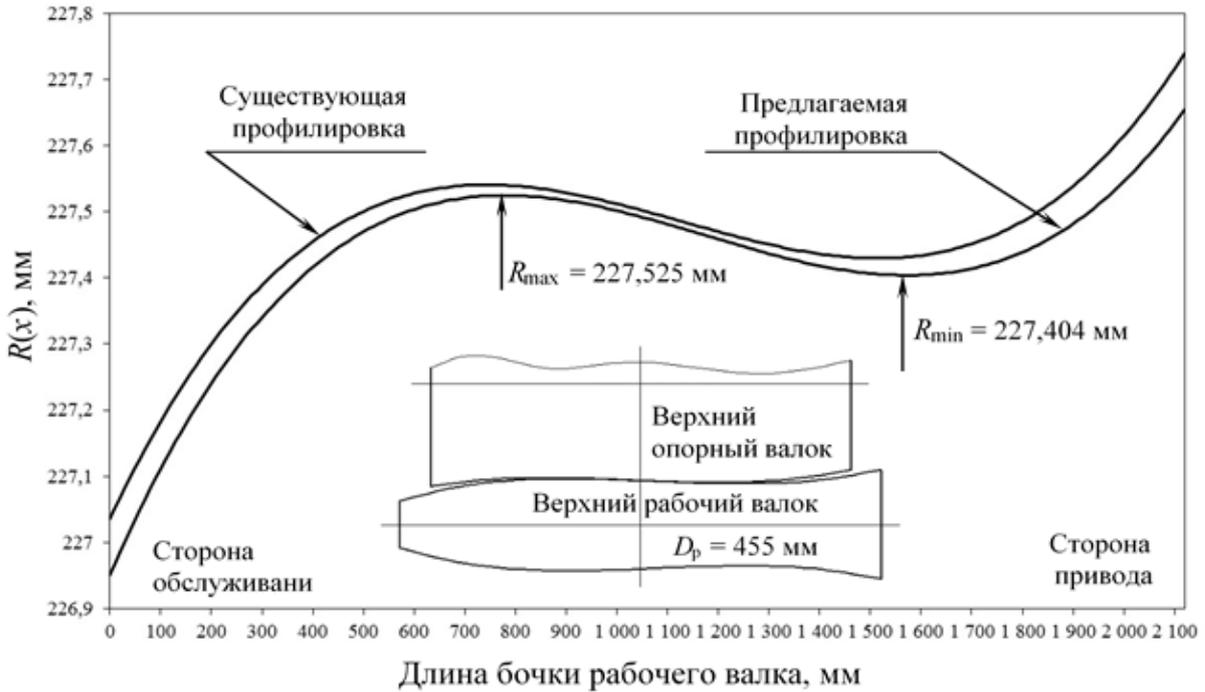


Рисунок 2.8 – Существующая и измененная профилировки CVC рабочих валков

Преимущество новой профилировки видно из схемы "б" рисунке 2.9: разность упругих деформаций бочки рабочего вала на ширине полосы уменьшилась с 0,08 мм до 0,05 мм, то есть на 38%, что обеспечило уменьшение поперечной разнотолщинности полосы и выполнение условия (1.2). При этом, как видно из схемы "а" того же рисунка, напряжения в контакте с полосой и опорным валком практически не изменились.

Новая профилировка рабочих валков внедрена на 4-клетевом стане 2100, ее использование повысило эффективность работы осевой сдвижки и гидроизгиба рабочих валков при прокатке полос шириной от 900 мм до 1300 мм, составляющих наибольшую долю в объеме прокатываемого металла на стане и гарантированно обеспечило получение поперечной разнотолщинности полосы, не превышающей 2 % от номинальной толщины (акт о внедрении – см. приложение 3).

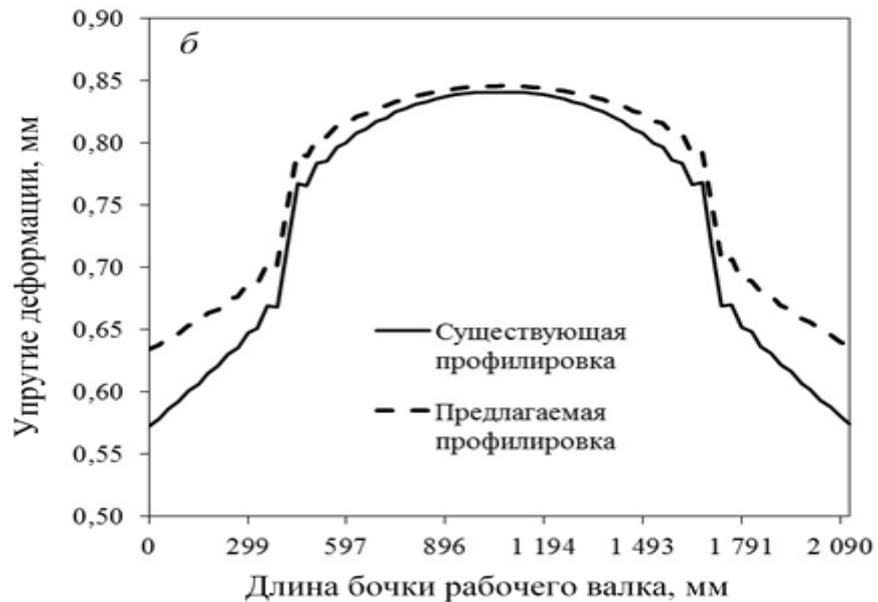
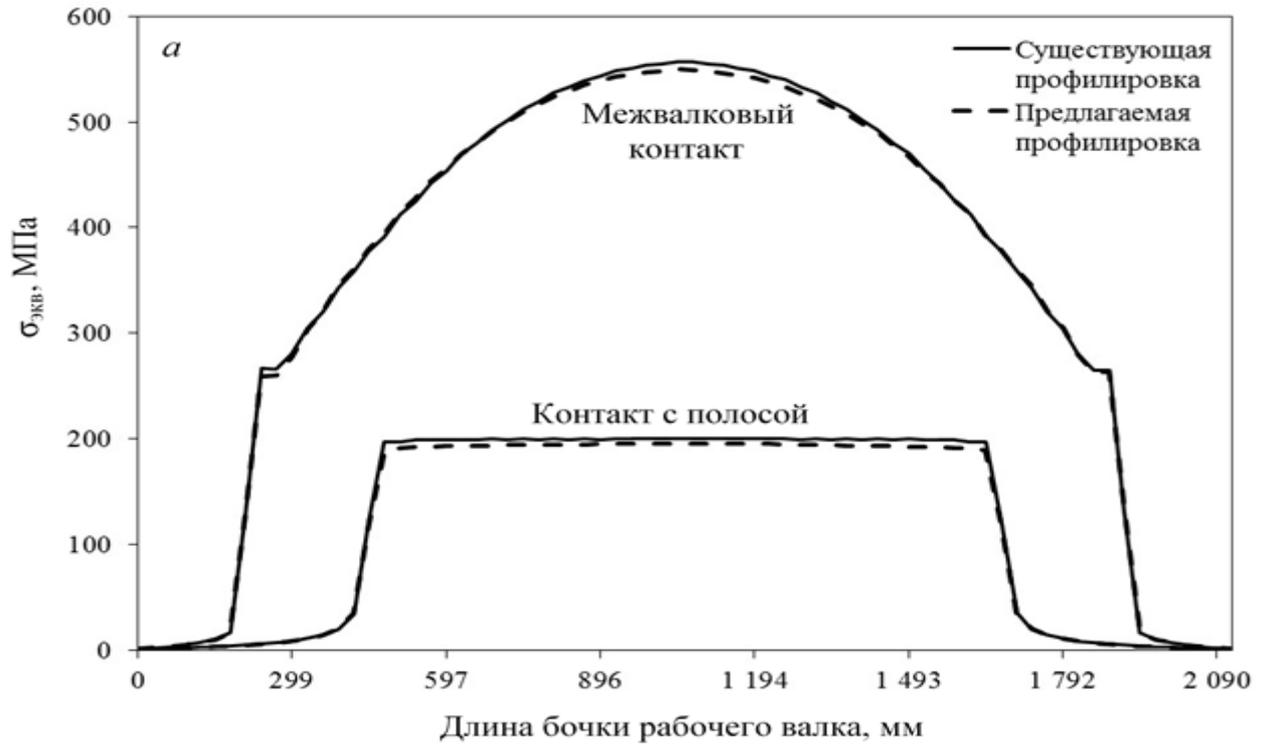


Рисунок 2.9 – Кривые распределения напряжений по длине бочки рабочего валка (а) и упругих деформаций верхнего рабочего валка в вертикальной плоскости в контакте с полосой (б) при существующей и предлагаемой новой профилировке рабочих валков

$$(D_p = 455 \text{ мм}; D_{\text{от}} = 1220 \text{ мм}; b = 1250 \text{ мм}; P = 10 \text{ МН})$$

Выводы по главе 2

1. Исходя из результатов аналитического обзора, изложенных в гл. 1 (п.1.1), поставлена и решена новая задача – усовершенствование профилировки валковой системы «CVC плюс» для устранения сверхнормативной поперечной разнотолщинности холоднокатаных полос и уменьшения ее до значения, не превышающего 2% от номинальной толщины, соответствующего мировому уровню качества.

2. Для решения указанной задачи применен метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе SIMULIA Abagus, ранее использованный только для моделирования валковых систем с обычной (симметричной) профилировкой.

3. Адекватность принятого метода проверена и подтверждена на действующем стане путем сравнения расчетной и измеренной поперечных разнотолщинностей, на образцах, взятых из прокатанной полосы.

4. На основе разработанной конечно-элементной модели валковой системы 4-клетевого стана выполнен анализ влияния осевой сдвижки и гидроизгиба рабочих валков, а также износа валков на их напряженно-деформированное состояние. Показано, что средства регулирования, используемые на 4-клетевом широкополосном стане холодной прокатки 2100 ПАО «Северсталь», обеспечивают широкий диапазон регулирования поперечной разнотолщинности полосы при прокатке без существенного роста напряжений в рабочих валках. Износ бочек рабочих и опорных валков на стане 2100 не приводит к существенному увеличению напряжений в рабочих валках, но отмечается рост упругих деформаций в середине бочки в контакте с полосой.

5. Определение усовершенствованной профилировки валков выполнено путем многовариантного моделирования выпукло-вогнутых профилировок рабочих валков, включающего расчетных упругих деформаций и распределение межвалковых давлений по длине бочки.

6. В окончательном варианте профиля бочки максимальный радиус выпуклой части бочки и минимальный радиус вогнутой части бочки были уменьшены соответственно на 0,017 мм и на 0,029 мм, что и обеспечило уменьшение поперечной разнотолщинности полос до требований мирового уровня качества.

7. Новая профилировка валков внедрена на 4-клетевом стане 2100.

ГЛАВА 3. ФОРМИРОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИ ЗНАЧИМОЙ БАЗЫ ДАННЫХ О ФАКТИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ ПРОКАТКИ, ПРОФИЛИРОВКАХ ВАЛКОВ, ИХ ТЕПЛОВОМ ПРОФИЛЕ И ИЗНОСЕ, ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРАХ ПРОКАТКИ, ДЕФЕКТАХ БОКОВЫХ КРОМОК ПОЛОС И ПОКАЗАТЕЛЯХ СВАРИВАЕМОСТИ ВИТКОВ РУЛОНА ПРИ ОТЖИГЕ. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧИМОСТИ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ ТЕХНОЛОГИИ НА СВАРИВАЕМОСТЬ ВИТКОВ

3.1. Методика формирования статистически значимой базы данных

Исходя из выводов, сделанных в результате аналитического обзора (глава 1, п.1.2), методика дальнейшей работы 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, **во-первых**, объяснить физическую сущность возможного влияния каждого фактора на появление указанного дефекта; **во-вторых**, промоделировать взаимосвязь факторов технологии и свариваемости витков в рулоне, и, **в-третьих**, проградировать все факторы по значимости их влияния на сварку витков рулона.

Чтобы реализовать эти методические задачи, 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 включены полосы

широкого спектра сортамента. Для каждой полосы определены по данным цеха фактические величины X и всех технологических параметров, рассматриваемых как факторы, влияющие на данный дефект (см. Приложение 2).

3.2. Результаты формирования базы данных

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 «свариваемость витков».

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 бóльшую 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 полосу, 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 клетки; с её ростом увеличивается коэффициент передачи шероховатости бочки на поверхность полосы; характер влияния её на дефект «сварка витков» подлежал уточнению в процессе исследований;

- заданная температура окончания отжига; чем выше эта температура, тем при меньшей силе прижатия витков происходит их сварка;

- жировая загрязненность поверхности полосы, зависящая от концентрации эмульсола в подаваемой эмульсии (чем она больше, тем толще слой жира между витками, что может препятствовать сварке витков);

- расход эмульсии в клетях и между клетями для охлаждения и смазки валков и полосы; чем он больше, тем больше на полосу попадает механических и жировых загрязнений.

ж) *Параметры технологии, от которых зависят перечисленные факторы:*

- форма поперечного профиля полосы;
- режим обжатий и натяжений на 5-ти клетевом стане;

- износ бочки рабочих валков;
- давление и температура подаваемой эмульсии;
- форма шлифовочных профилировок валков;
- положение рулона в садке колпаковой печи;
- наружный диаметр рулона.

Для того, чтобы установить со статистической достоверностью значимость и характер влияния на дефект «сварка витков» каждого из указанных выше факторов, была сформирована база данных, включающая информацию обо всех перечисленных факторах и параметрах технологии для 2120 полос толщиной от 0,35 мм до 1,01 мм, шириной 800-1600 мм, прокатанных на 5-ти клетевом стане 1700 с января 2015 г. по февраль 2016 г., отожженных в колпаковых печах и продрессированных.

Для каждой полосы был рассчитан по данным цеха показатель свариваемости «X», сущность которого указана в п. 3.1. Из общего количества отобранных полос дефект «сварка витков» имели 196 полос.

Количество учитываемых параметров, включая профилиразмеры 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, были установлены реально значимые факторы технологии (их оказалось 9, они приведены в таблице 3.1) и получено регрессионное уравнение, выражающее зависимость показателя X от этих факторов:

$$X = -91,63 - 81,73 \frac{h}{h_{\text{баз}}} + 100 \frac{b}{b_{\text{баз}}} - 4 \frac{Q}{Q_{\text{баз}}} + 90,9 \frac{T}{T_{\text{баз}}} + 222 \frac{t_k}{t_{k\text{баз}}} + 8 \frac{P_5}{P_{5\text{баз}}} - 4,95 \frac{\Delta_{\text{м}}}{\Delta_{\text{мбаз}}} - 0,75 \frac{\Delta_{\text{ж}}}{\Delta_{\text{жбаз}}} + 1,73 \frac{A}{A_{\text{баз}}}. \quad (3.1)$$

Наименования и размерности величин, входящих в уравнение (3.1), приведены в таблице 3.1. Выражения, входящие в это уравнение с индексом «баз» – базовые значения соответствующих параметров (минимальные или наиболее характерные).

Оценку достоверности регрессионного уравнения (3.1) 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 (3.1) 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 (3.1) 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. 3.1 под номерами 7; 8; 9, находятся в диапазоне пороговых значений, поэтому степень их влияния на дефект «сварка витков» минимальна.

Таблица 3.1 – Значимые факторы технологии, входящие в уравнение (3.1), влияющие на появление дефекта «сварка витков рулона при отжиге»

№	Наименование фактора	Обозначение	Размерность	Показатели значимости $p; \alpha, \%$
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	$p = 94,2; \alpha = 5,8$

3. Параметры технологии, при увеличении которых растет вероятность дефекта «сварка витков» (они входят в уравнение (3.1) 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 (3.1) со знаком «минус»):

- толщина полосы;
- суммарный расход эмульсии;
- механические и жировые загрязнения поверхности.

Для того чтобы убедиться, что уравнение (3.1) может быть использовано для разработки усовершенствованной технологии, уменьшающей отсортировку холоднокатаных полос по дефекту «сварка витков рулона при отжиге», - произвольно отобрана из базы данных 31 полоса, 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 (3.1) было признано достоверным и пригодным для разработки усовершенствованных технологических режимов, сводящих к минимуму вероятность сварки витков рулонов при отжиге.

Выводы по главе 3

1. Разработана методика формирования статистически значимой базы данных о фактических режимах прокатки и их энергосиловых параметрах, профилировках валков, их тепловом профиле и износе, дефектах

боковых кромок полос и показателях свариваемости витков рулона при отжиге.

2. Для разработки указанной методики были выявлены и проанализированы в совокупности все факторы технологии, которые могут увеличить или уменьшить вероятность появления дефекта «сварка витков рулона при отжиге».

3. Реализация указанной методики дала возможность:

а) разработать математическую модель, основанную на методах регрессионного анализа, в которой показатель сварки витков « X » - процент от общей длины рулона той её части, на которой произошла межвитковая сварка, - вычисляется в функции значимых факторов технологии.

б) сформировать статистически достоверную базу данных, используя информацию действующего цеха холодной прокатки о фактических технологических параметрах и показателях сварки витков X для 2120 полос реального сортамента.

4. После выполнения п. 3 и ввода всех полученных данных в стандартную программу регрессионного анализа получена математическая модель в виде регрессионного уравнения, выражающего зависимость показателя сварки витков « X » от девяти значимых факторов технологии.

5. Достоверность полученного регрессионного уравнения подтверждена расчетом коэффициента детерминации: $R^2 = 0,87$. Поскольку факторы технологии на практике колеблются даже в пределах одной полосы, установлено, что появление дефекта «сварка витков» гарантировано при расчетном значении $X > 12 \div 14$.

6. Согласно полученному уравнению, наибольшее влияние на вероятность возникновения сварки витков оказывает увеличение следующих четырех параметров (перечислены в порядке убывания значимости): ширина полосы, разность коэффициентов вытяжки по ширине полосы, натяжение полосы между последней клетью и моталкой стана холодной прокатки, усилие прокатки в 5-й клетки.

Наибольшее влияние на предотвращение сварки витков оказывает увеличение следующих двух технологических параметров: толщина полосы, загрязненность поверхности полосы и эмульсии механическими примесями.

Влияние следующих трех параметров минимально (находится вблизи к пороговому значению): температура окончания нагрева при отжиге, суммарный расход эмульсии на стане, жировая загрязненность поверхности полосы, вызванная увеличением концентрации эмульсола в эмульсии.

**ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ФАКТОРОВ
ТЕХНОЛОГИИ И СВАРИВАЕМОСТИ ВИТКОВ РУЛОНОВ.
РАЗРАБОТКА ПЕРВОГО И ВТОРОГО ВАРИАНТОВ
УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
ХОЛОДНОКАТАНОГО ПРОКАТА, МИНИМИЗИРУЮЩЕЙ
ВЕРОЯТНОСТЬ СВАРКИ ВИТКОВ РУЛОНА ПРИ ОТЖИГЕ**

**4.1. Методика моделирования и разработки первого варианта
усовершенствованной технологии**

Используя изложенную в главе 3 математическую модель, представленную в виде регрессионного уравнения (3.1), для проведения первой серии испытаний усовершенствованной технологии был выбран сортament, при производстве которого отсортировка по сварке витков рулона чаще всего имела место: толщины полос 0,4 – 0,65 мм, ширины 1100-1200 мм.

Для данного сортамента подобраны два варианта сочетания параметров: *первый* –обеспечивающий появление указанного дефекта на готовом прокате, *второй* –исключающий его появление.

Затем в производстве плоского проката (ППП) ПАО «Северсталь» была произведена прокатка с использованием подобранных параметров технологии, при этом учитывалось, что технология ППП ПАО «Северсталь» типична для современных процессов производства стальных полос.

4.2. Первая серия промышленных испытаний и ее результаты

В процессе испытаний выяснились некоторые особенности технологического процесса в ППП, которые не в полной мере учитывались при выводе регрессионного уравнения (3.1).

Во-первых, загрязненность поверхности полосы механическими примесями (фактор Δ_m в уравнении (3.1) и таблице 3.1) зависит от содержания этих примесей в эмульсии, подаваемой на полосу, а точнее – в эмульсоле, используемом для приготовления эмульсии.

Во – вторых, содержание эмульсола в эмульсии (т.е. концентрация) регламентируется цеховыми нормативными документами. Чем выше концентрация эмульсола 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 $\Theta_{\text{норм}}=1\div 1,13$ мг/л.

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

Следовательно, выяснилось, что уравнение (3.1) нуждается в уточнении: в составе значимых факторов факторы Δ_m , Q (суммарный расход эмульсии на стане) и $\Delta_{\text{ж}}$ (жировая загрязненность поверхности полос) следует заменить фактором концентрации эмульсола Θ_3 , т.к. наибольшее влияние на склонность к межвитковой сварке оказывает концентрация эмульсола 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 (3.1), а от удельного натяжения σ_m в МПа.

Далее оказалось, что разность коэффициентов вытяжки по ширине полосы (фактор A в уравнении 3.1) учитывать при стационарной работе автоматики стана невозможно и нецелесообразно, т.к. современные станы

оборудованы системами автоматического регулирования профиля и 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 столько от заданной температуры окончания нагрева при отжиге (фактор t_k в уравнении (3.1) и таблице 3.1), 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 серия испытаний дала практические данные для составления уточненного регрессионного уравнения, прогнозирующего вероятность сварки витков рулона при отжиге с большей достоверностью.

4.3 Составление уточненной регрессионной зависимости от значимых факторов технологии показателя X (той части длины рулона, которая с доверительной вероятностью $p > 95\%$ будет иметь дефект «сварка рулона при отжиге»)

Для составления уточненной зависимости из базы данных ППП отобраны 59 полос проблемного сортамента, указанного в п. 4.1. В

результате, применив тот же метод Excel, что и при выводе уравнения (3.1), получено новое регрессионное уравнение:

$$X = 0,00125 + 252,8 \frac{\sigma_M}{\sigma_{M\text{баз}}} - 0,062 \frac{P_5}{P_{5\text{баз}}} + 10,01 \frac{T_K}{T_{K\text{баз}}} + 19,16 \frac{T_H}{T_{H\text{баз}}} - 8,00 \frac{h}{h_{\text{баз}}} - 32,77 \frac{\mathcal{E}_3}{\mathcal{E}_{3\text{баз}}} - 1,76 \frac{\Delta}{\Delta_{\text{баз}}}, \quad (4.1)$$

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_H – максимальная температура нагрева; h – толщина полосы; \mathcal{E}_3 – концентрация эмульсола в системе № 3; Δ – среднее значение выпуклости поперечного профиля полосы.

Параметры $\sigma_{M\text{баз}}$, $P_{5\text{баз}}$, $T_{K\text{баз}}$, $T_{H\text{баз}}$, $h_{\text{баз}}$, $\mathcal{E}_{3\text{баз}}$, $\Delta_{\text{баз}}$ – 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 уравнении (3.1), в уравнении (4.1) значения параметров σ_M , P , Δ подставляются усредненными, поэтому в качестве оптимального значения X , свидетельствующего об отсутствии дефекта, приняли $X < 12\%$

Значимые факторы уравнения (4.1) сведены в таблицу 4.1.

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

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 (4.1) и собранной базы данных позволил сделать следующие практические выводы:

Таблица 4.1 – 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 $p; \alpha, \%$
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	$p = 95,7; \alpha = 4,3$

1. Параметры технологии, при увеличении которых растет вероятность дефекта «сварка витков» (они входят в уравнение (4.1) 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 (4.1) 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 (4.1) изменился по сравнению с уравнением (3.1) 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 (4.1) 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 клетки 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).

4.4. Разработка и апробирование второго варианта усовершенствованной технологии

При подготовке к новым испытаниям учтены требования заказчика – решить задачу при пониженной концентрации эмульсола во второй и третьих системах стана.

С учетом выводов, изложенных в п. 4.3, с помощью уравнения (4.1) 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 клетки – 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 градусов.

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 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты второй серии испытаний усовершенствованной технологии

№ п/п	Партия, рулон	h, мм	σ_m , МПа	P, МН	T _к , °C	T _н , °C	Э ₂ , мг/л	Э ₃ , мг/л	Δ, мм	X, %	Наличие сварки, расчет	Наличие сварки, факт	Примечания
1	328951,01	0,4	33	11	661	720	0,81	0,91	0,091	62	есть	есть, ~ 60%	Из 16 полос расчетные и фактические данные о наличии или отсутствии сварки совпали для 15 полос (94%) Для полосы №16 данные не совпали. Вероятные причины: 1) очень маленькая выпуклость поперечного профиля: Δ=0,007 мм (в 6-13 раз меньше, чем для остальных полос); 2) возможно завышены значения Э ₂ и Э ₃ (больше,
2	328951,02	0,4	33	13	661	720	0,81	0,91	0,085	42	есть	есть, ~ 40%	
3	328973,01	0,4	33	13	687	720	0,81	0,91	0,082	32	есть	есть, ~ 40%	
4	328976,01	0,4	33	11,5	662	720	0,81	0,91	0,088	58	есть	есть, ~ 90%	
5	328977,01	0,4	35	13,6	662	720	0,81	0,91	0,067	63	есть	есть, ~ 60%	
6	328978,01	0,4	35	13,6	662	720	0,81	0,91	0,084	48	есть	есть, ~ 60%	
7	328952,01	0,4	34	13,8	661	720	0,81	0,91	0,083	40	есть	есть, ~ 40%	
8	328959,01	0,4	33	13,8	588	720	0,81	0,91	0,086	19	есть	есть, ~ 10%	
9	328975,01	0,4	33	13,8	587	720	0,81	0,91	0,092	14	есть	есть, ~ 10%	
10	328960,01	0,4	33	13,8	588	720	0,81	0,91	0,085	20	есть	есть, ~ 10%	
11	328965,01	0,4	33	13,8	630	720	0,81	0,81	0,08	12	есть	нет	

№ п/п	Партия, рулон	h, мм	σ_m , МПа	P, МН	T _к , °C	T _н , °C	Э ₂ , мг/л	Э ₃ , Мг/л	Δ, мм	X, %	Наличие сварки, расчет	Наличие сварки, факт	Примечания
12	332544,01	0,4	30	15	590	720	0,91	0,91	0,068	-2	нет	нет	чем для других полос, в 1,5 раза) Из 16 полос расчетные и фактические данные о наличии или отсутствии сварки витков совпали для 12 полос (75%) Возможные причины несовпадения: 1) для полосы №18 указана нереально высока величина T _к =690°C (вероятно ошибка данных); 2) для полосы №26 на 93% длины рулона расчет и факт совпадают; 3) для полос №№31,32 – неблагоприятное сочетание: $\sigma_m > 31$ МПа (завышено на 8 МПа); P = 8,9-9,6 МН (существенно занижено относительно оптимального) Из 16 полос расчетные и фактические данные о наличии или отсутствии сварки витков совпали для 14 полос (87,5%) Для полосы №41 почти полное совпадение (сварки менее 5%. С учетом этой полосы совпадение 94% Из 16 полос
13	332544,02	0,4	30	15	590	720	0,91	0,91	0,051	-8	нет	нет	
14	3222545,01	0,4	30	15	590	720	0,91	0,91	0,047	-5	нет	нет	
15	332545,01	0,4	30	15	590	720	0,91	0,91	0,044	-2	нет	нет	
16	336167,01	0,6	36	10	658	720	1,45	1,14	0,007	-12	нет	есть	
17	337863,01	0,4	31,5	12,3	605	640	1,15	0,94	0,088	-81	нет	нет	
18	337475,01	0,6	36	9,1	690	730	1,15	0,87	0,021	76	есть	нет	
19	337593,01	0,96	33	13	630	720	1,15	0,79	0,079	-80	нет	нет	
20	337594,01	0,96	33	12,9	630	720	1,15	0,79	0,83	-82	нет	нет	
21	336524,01	1,21	38	12,5	610	670	1,03	0,87	0,104	-79	нет	нет	
22	337595,01	0,96	33,2	12,9	630	720	1,15	0,79	0,083	-82	нет	нет	
23	337608,01	0,96	33,2	13	630	720	1,15	0,79	0,079	-80	нет	нет	
24	337590,01	0,96	33,2	13	630	720	1,15	0,79	0,076	-77	нет	нет	
25	337771,01	0,65	35	9,8	620	720	1,15	0,84	0,056	12,8	есть	есть, ~ 5%	
26	337513,01	0,71	34	11,8	600	720	1,15	0,85	0,091	-48	нет	есть, ~ 7%	
27	337952,01	1,01	39	12,4	670	730	1,15	0,86	0,057	-14	нет	нет	
28	337511,01	0,6	33,5	11,4	660	720	1,15	0,85	0,088	-35	нет	нет	
29	337510,01	0,6	33,5	11,8	660	720	1,15	0,85	0,09	-41	нет	нет	
30	337509,01	0,71	34	11,4	600	720	1,15	0,85	0,087	-40	нет	нет	
31	339009,01	1,21	39	8,9	620	670	1,01	0,87	0,065	14	есть	нет	
32	339298,01	1,21	39	9,6	630	720	0,96	0,86	0,076	26	есть	нет	
33	339010,01	1,51	39	8,8	620	670	1,01	0,87	0,041	12,28	Есть, но на пределе отсутствия	нет	
34	339008,01	1,26	39	8,5	620	670	1,05	0,91	0,059	8,7	нет	нет	
35	335996,01	0,6	31,5	12,8	650	670	1,07	0,85	0,093	-67	нет	нет	
36	339628,01	0,45	32,5	9,5	617	720	0,98	0,85	0,08	36,6	есть	есть, ~ 40%	
37	339629,01	0,45	32,5	9,5	617	720	0,98	0,85	0,076	40	есть	есть, ~ 40%	
38	339629,02	0,45	32,5	9,5	617	720	0,98	0,85	0,076	40	есть	есть, ~ 40%	
39	340601,01	1,51	39	9,0	675	720	0,95	0,86	0,063	30	есть	есть, ~ 10%	
40	340788,01	0,6	32,5	11,7	634	670	0,99	0,86	0,057	1,24	нет	есть, < 40%	
41	341199,01	0,95	33	12,7	620	720	0,93	0,80	0,098	-42	нет	есть, ~ 5% (почти нет)	

№ п/п	Партия, рулон	h, мм	σ_y , МПа	R, МН	T _к , °С	T _н , °С	Э ₂ , мг/л	Э ₃ , Мг/л	Δ, мм	X, %	Наличие сварки, расчет	Наличие сварки, факт	Примечания
42	340681.01	0,93	35	11,6	611	670	1,05	0,87	0,026	0,2	нет	нет	расчетные и фактические данные о наличии или отсутствии сварки витков совпали для 11 полос (100%) Итог: Из 59 полос совпадение -50 полос: 84,7 %, причем на половине полос, где прогноз модели был недостоверным сварка выражена очень слабо.
43	340681.02	0,93	35	11,6	611	670	1,05	0,87	0,022	4	нет	нет	
44	340681.03	0,93	35	11,6	611	670	1,05	0,87	0,02	6	нет	нет	
45	340680.01	0,93	35	11,6	630	670	1,05	0,87	0,02	9	нет	нет	
46	340685.01	0,93	35	11,6	610	670	1,05	0,87	0,021	4,5	нет	нет	
47	340685.02	0,93	35	11,6	610	670	1,05	0,87	0,018	7	нет	нет	
48	3403685.03	0,93	35	11,6	610	670	1,05	0,87	0,021	4,5	нет	нет	
49	301037.01	0,78	35	11,7	610	670	1,15	0,85	0,069	0	нет	нет	
50	302020.01	0,41	34	6,4	610	670	1,05	0,87	0,076	56	есть	есть, ~40%	
51	301803.01	0,65	32,5	12,8	610	720	1,14	0,91	0,115	0	нет	нет	
52	302175.01	0,89	37	12,5	680	720	1,13	0,86	0,059	0	нет	нет	
53	300923.01	0,4	34,7	11,5	610	640	1,15	0,85	0,075	-35	нет	нет	
54	301862.01	0,4	31,5	12,6	610	640	1,14	0,91	0,11	-99,7	нет	нет	
55	301360.01	0,89	35	11,7	680	730	1,15	0,95	0,057	-22	нет	нет	
56	301460.01	0,8	35	11,7	680	730	1,15	0,87	0,074	-26	нет	нет	
57	301859.01	0,76	33,5	12,8	640	670	1,14	0,91	0,098	-93	нет	нет	
58	301859.02	0,76	33,5	12,8	640	670	1,14	0,91	0,099	-94	нет	нет	
59	302168.01	2,02	33,5	9,8	630	720	1,08	0,92	0,0970	-92	нет	нет	

Из таблицы видно, что из 59 полос 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.

Выводы по главе 4

1. В производстве плоского проката ПАО «Северсталь» с технологией, типичной для современных процессов производства стальных широких полос, во время 1-й серии испытаний выполнена углубленная проверка достоверности регрессионной модели (3.1), определяющей значимость влияния факторов технологии на свариваемость витков холоднокатаных рулонов при колпаковом отжиге.

2. В результате углубленной проверки, выполненной на сортаменте (ширинах и толщинах полос), при производстве которого чаще всего имела место отсортировка по сварке витков, уточнен набор значимых факторов технологии, влияющих на межвитковую сварку, и получена уточненная регрессионная зависимость (4.1), определяющая вероятность сварки витков при отжиге в функции нового набора значимых факторов, что подтверждено критерием Фишера и коэффициентов детерминации.

3. С использованием уточненной регрессионной зависимости на представительном сортаменте ППП ПАО «Северсталь» в количестве 59 полос рассчитаны диапазоны значений управляющих факторов технологии, сводящие к минимуму вероятность межвитковой сварки витков, и выполнена апробация усовершенствованной технологии путем проведения второй серии испытаний.

4. Вторая серия испытаний показала, что совпадение прогноза и фактических результатов имело место для 84,7 % полос (50 из 59), причем для 5-ти полос из оставшихся 9-ти межвитковая сварка была выражена очень слабо.

ГЛАВА 5. ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ КОРРЕКТИРОВКА И ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ОТОЖЖЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ПОЛОС, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ МИНИМАЛЬНУЮ ВЕРОЯТНОСТЬ ПОЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТА «СВАРКА ВИТКОВ РУЛОНА ПРИ ОТЖИГЕ»

5.1. Причины дополнительной корректировки технологии

Проанализировав результаты 1-й и 2-й серии испытаний усовершенствованной технологии, изложенные в главах 3,4, 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 (4.1) 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.

5.2 Окончательная корректировка и внедрение усовершенствованной технологии в производство

С учетом результатов испытаний, изложенных в главе 4, и дополнительных соображений, изложенные в п. 5.1, 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 3-й системы:

$$\text{Э}_3=0,81 - 0,91 \text{ мг/л};$$

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: $\sigma_m \leq 30 - 31,5 \text{ МПа};$

- сила прокатки в 5-й клетки: $P_5 = 12 - 15 \text{ МН};$

- 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 (см. приложение 3).

Сравнительные данные об отсортировке металла по дефекту «сварка витков рулона при отжиге» за 9 месяцев 2017 г. и 9 месяцев 2018 г. приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Отсортировка по сварке витков рулонов в ППП ПАО «Северсталь» за 9 месяцев 2017 и 2018 гг. (сравнительные данные)

Месяц	2017 г.			2018 г.		
	Производство тонн	Отсортировка		Производство тонн	Отсортировка	
		Тонн	%		Тонн	%
Всего за 9 месяцев	1997480	963	0,048	2102212	713	0,034
Январь	224062	117,5	0,052	241384	25,5	0,011
Февраль	210157	188,7	0,09	222050	168,5	0,076
Март	182990	392	0,214	243241	70	0,029
Апрель	223261	164	0,073	229203	174,8	0,076
Май	234592	18	0,008	230531	111,6	0,048
Июнь	216550	21,6	0,01	228230	20,8	0,009

Месяц	2017 г.			2018 г.		
	Производство тонн	Отсортировка		Производство тонн	Отсортировка	
		Тонн	%		Тонн	%
Июль	239838	1,85	0,0008	233600	30,6	0,013
Август	235906	20,3	0,009	236403	74,1	0,031
Сентябрь	231124	39,4	0,017	237568	37,1	0,016

Из таблицы видно, что 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%.

Материалы исследований, разработок, испытаний и внедрения результатов усовершенствования в технологии прокатки, отжига и дрессировки холоднокатаных полос опубликованы в журналах, входящих в список ВАК РФ, и в сборниках материалов Всероссийской и международной конференций [96 – 102]. Из этих публикаций [96] индексируется в базе данных Scopus.

Выводы по главе 5

1. Для внедрения в ПАО «Северсталь» усовершенствованной технологии производства отожженных стальных холоднокатаных полос, обеспечивающей при экономии эмульсола минимальную вероятность появления дефекта «сварка витков рулона при отжиге», выполнена окончательная корректировка нормативно-технологической документации, включающая следующие мероприятия:

- удельные натяжения в полосе между последней клетью и моталкой ограничены величиной 30 – 31,5 МПа;

- сила холодной прокатки в последней клети ограничена величинами 12-15 МПа;

- температура защитного газа при снятии нагревательного колпака после отжига ограничена величиной 590°С;

- минимальная величина рабочей скорости дрессировки установлена 8-10м/с;

- повышены требования к обеспечению и контролю шероховатости поверхности рабочих валков.

2. После окончательной корректировки усовершенствованная технология внедрена в производство, в результате отсортировка готовых полос по дефекту «сварка витков рулона при отжиге» уменьшилась по сравнению с периодом до начала данной работы на 29,2%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 клетке стана холодной прокатки;
- толщина полосы;
- концентрация эмульсора 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 %.

Библиографический список

1. Bald W, Beisemann G, Feldmann H, Schüttes T. CVC. Continuously variable crown rolling// Iron Street Engineer. 1987. No 3.P. 32-41.
2. Андреас Риттер, Рюдигер Хольц Патент №2367531 РФ. Оптимизация стратегии смещения в качестве функции ширины полосы / Патентообладатель «СМС ДЕМАГ АГ» // БИ.2009. №26.
3. Гарбер Э.А. Станы холодной прокатки (теория, оборудование, технология). М: Черметинформация; Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ, 2004. 416 с.
4. Салганик В.М., Виер И.В., Полецков П.П., Румянцев М.И. Развитие валковых систем CVC на основе математического моделирования для повышения качества холоднокатаного проката и стойкости валков// Труды V конгресса прокатчиков. М.:Черметинформация, 2004. С.146-151.
5. Третьяков А.В., Гарбер Э.А., Давлетбаев Г.Г. Расчет и исследование прокатных валков. М.: Металлургия, 1976. 256 с.
6. Гарбер Э.А. Производство проката: Справочное издание. Том 1. Книга 1. Производство холоднокатаных полос и листов (сортамент, теория, технология, оборудование). М.: Теплотехник, 2007.
7. Григорян Г.Г., Железнов Ю.Д., Черный В.А. и др. Настройка, стабилизация и контроль процесса тонколистовой прокатки. М.: Металлургия, 1975. 368 с.
8. Будаква А.А., Коновалов Ю.В., Ткалич К.Н. и др. Профилирование валков листовых станов. К.: Техніка, 1986. 190 с.
9. Борисов В.И., Иванов В.А. Метод определения рабочих профилей валков листопркатных станов и его анализ. // Производство проката. 2006. № 3. С. 2-14.
10. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Трайно А.И. Применение метода конечных элементов для расчета профилировок валков широкополосных станов // Металлы. 2012. № 3. С. 19-24.

11. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л. Профилирование валков широкополосных станов с применением метода конечных элементов // Производство проката. 2012. № 3. С. 6-10.

12. Виер И.В., Салганик В.М., Полецков П.П. Математическое моделирование деформаций и нагрузок валковой системы кварто с учетом асимметричных случаев процесса прокатки // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: Межрегиональный сборник научных трудов. Магнитогорск: МГТУ, 2002. С. 78-86.

13. Салганик В.М., Виер И.В., Полецков П.П. и др. Разработка профилировки валков двухклетевого реверсивного стана ОАО «ММК» с учетом размерного, марочного сортамента и стойкости валков // Вестник МГТУ. 2003. № 3. С. 19-22.

14. Целиков А.И., Смирнов В.В. Прокатные станы. М.: Металлургиздат, 1958. – 432 с.

15. Грудев П.И. Прогиб валков вследствие совместного сплющивания рабочих и опорных валков // Обработка металлов давлением. Вып. 2. М.: Металлургиздат. 1953. С. 200-223.

16. Чепуркин С.С. Уравнение прогибов листопрокатных валков // Производство и обработка стали: Сб. науч. тр. ЖдМИ. Вып. 5. Харьков: Металлургиздат. 1960. С. 346-371.

17. Полухин П.И., Железнов Ю.Д., Полухин В.П. Тонколистовая прокатка и служба валков. М.: Металлургия, 1967. 388 с.

18. Целиков А.И., Полухин П.И., Гребник В.М. и др. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. Т. 3. Машины и агрегаты прокатных цехов. Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1988. 432 с.

19. Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л., Пономарев В.И. Расчет параметров листовой прокатки. Справочник. М.: Металлургия, 1986. 430 с.

20. Салганик В.М. Математическое моделирование деформаций и нагрузок валковой системы кварто для повышения ее стойкости и качества

прокатываемых полос // Пути развития машиностроительного комплекса Магнитогорского металлургического комбината: Сб. науч. тр. Вып. 2 «Прокатные валки». Магнитогорск: ПМП «МиниТип». 1996. С. 120-128.

21. Болобанова Н.Л. Развитие метода конечных элементов для повышения точности моделирования упругих деформаций, профилировок валков и поперечного профиля полосы на широкополосных станах // Материалы I Международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии – 2013». Череповец: ЧГУ, 2013. С. 37-43.

22. Восканьянц А.А. Расчет напряженно-деформированного состояния валковой системы клетки кварто 2500 // Производство проката. 2001. № 5. С. 35-38.

23. Бочектуева Е. Б. Численное определение напряженно-деформированного состояния в валках и усилий противоизгиба в четырехвалковой клетки прокатного стана // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2010. №1. С. 45-53.

24. Бернштейн М.Л. Атлас дефектов стали. Пер. с нем. М.: Металлургия, 1979.

25. Мелешко В.И., Качайлов А.П., Кудин Д.П. Поперечные изломы на предварительно изогнутой растягиваемой полосе. М.: Металлургия. 1971. Том 35. С.70-75.

26. Чернов П.П., Сосулин В.П., Лялько Н.А. и др. Уменьшение изломов на холоднокатаном металле // Черная металлургия. Бюллетень института Черметинформация. 1979. №9. С. 34-35.

27. Мелешко В.И., Качайлов А.П., Ксензук Ф.А. и др., Уменьшение изломов полосы при рулонной дрессировке // Сталь. 1969. №6. С.537-540.

28. Файнберг Л.Б., Радюкевич Л.В., Колов М.И. и др. Уменьшение дефекта «излом» при рулонном способе производства холоднокатаного автолиста // Металлург. 1971. №4. С. 25-26.

29. Смирнов П.Н., Девятченко Л.Д., Елесин П.З. и др. Уменьшение изломов отожженной полосы при размотке рулонов // Черная металлургия: Бюл. НТИ.1978. №21. С.33-37.

30. Мазур В.Л., Добронравов А.И., Чернов П.П. Предупреждение дефектов листового проката. Киев.: Техника, 1986. 141 с.

31. Гольдфарб Э.М., Мазур В.Л., Бойков В.Г. и др. Роль шероховатости поверхности в предупреждении сваривания при отжиге и загрязненности холоднокатаного листа // Сталь. 1971. № 6. С. 532-533.

32. Беняковский М. А. Качество поверхности автомобильного листа. М.: Металлургия, 1969. 152 с.

33. Мелешко В.И., Чекмарев А.П., Мазур В.Л., Качайлов А.П. Отделка поверхности листаю. М.: Металлургия, 1975. 272 с.

34. Чернов П. П. Исследование устойчивости холоднокатаных рулонов. В кн.: Производство горячекатаной и холоднокатаной листовой стали. М., 1983. С. 34-38.

35. Мазур В. Л. Режимы намотки горячекатаных и холоднокатаных полос // Сталь. 1980. № 7. С. 591-596.

36. Чернов П.П. Мазур В.Л. Мелешко В.И. Совершенствование режимов намоточно-размоточных операций при производстве холоднокатаных полос // Сталь. 1983. № 2. С. 34-38.

37. Приходько И.Ю., Чернов П.П., Тимошенко В.И., Акишин В.В. Исследования влияния режимов смотки и отжига полос на условия слипания (сваривания) витков рулонов, Труды пятого конгресса прокатчиков, Череповец, 21-24 октября 2003 г.

38. Peter Wendt, Frank Maschler, Peizhong Wang. Quality aspect of hydrogen annealed steel strip // Metallurgical Plant and Technology. №6. 2007. P. 29-36.

39. Салганик В.М., Полецков П.П., Мухина Е.Ю., Разработка новой технологии отжига рулонов в колпаковых печах для устранения дефекта

«излом» на поверхности полосы, автоматизированные технологии и производства. 2014. №6. С.87-91.

40. Белов В.К., Дьякова М.В., Селиванов Р.Г., Михин А.А. Особенности дефекта «излом» в результате слипания металла в рулонах при отжиге // Сталь. 2014. №12. С.37-40.

41. Беняковский М.А., Богоявленский К.Н., Виткин А.И. и др. Технология прокатного производства. В 2-х книгах. Кн.2 Справочник: М: Металлургия, 1991. 423 с.

42. Белянский А.Д., Кузнецов Л.А., Франценюк И.В., Тонколистовая прокатка. Технология и оборудование. М.:Металлургия, 1994. 380 с.

43. Мазур В.Л., Ноговицын А.В. Теория и технология тонколистовой прокатки (численный анализ и технические приложения). Днепропетровск, 2010. 493 с.

44. Бочков Н.Г., Сафонова В.Н. Экономия металла в прокатном производстве. М.: Металлургия, 1997. 336 с.

45. Коцарь С.Л., Белянский А.Д., Мухин Ю.А. Технология листопрокатного производства. М.: Металлургия, 1997. 272 с.

46. Беняковский М.А., Масленников В.А., Автомобильная сталь и тонкий листа. Череповец.: Издательский дом «Череповец», 2007. 636 с.

47. Рудской А.И., Лунев В.А., Теория и технология прокатного производства: Учебное пособие. СПб.: Наука, 2008. 527 с.

48. Дурнев В.Д., Иводитов В.А., Казаков А.А. и др. Качество листов: Под общ. Ред. В.Д. Дурнева и А.И. Трайно. М.: Наука и технологии, 2008. 336 с.

49. Flat-rolled steel processes: advanced technologies/editor Vladimir Ginzburg, CRC Press; Taylor & Francis Group, London, New York, 2009. 372 p.

50. Коновалов Ю.В. Справочник прокатчика. Справочное издание в 3-х книгах. Книга 2. Производство холоднокатаных листов и полос. М.: Теплотехник, 2010. 608 с..

51. Гарбер Э.А., Тимофеева М.А., Кожевникова И.А., Кузнецов В.В. Методика расчета энергосиловых параметров процесса дрессировки// Производство проката. 2006. №5. С.15-22.

52. Гарбер Э.А., Тимофеева М.А., Трайно А.И. Кожевникова И.А. Моделирование энергосиловых параметров дрессировочных станов, Металлы. 2006. №2. С. 68-76.

53. Гарбер Э.А., Самарин С.Н., Тимофеева М.А., Ермилов В.В. Определение коэффициентов трения качения в межвалковом контакте дрессировочного стана // Вестник Череповецкого государственного университета. 2006. №2. С.52-55.

54. Гарбер Э.А., Тимофеева М.А., Трайно А.И. Кожевникова И.А. Методика расчета энергосиловых параметров процесса дрессировки для совершенствования оборудования дрессировочных станов // Вестник Череповецкого государственного университета. 2006. №2. С.74-78.

55. Гарбер Э.А., Тимофеева М.А. Проблемные вопросы теории дрессировки холоднокатаных стальных отожженных полос // Черметинформация «Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». 2016. №4 (1396). С.47-52.

56. Гарбер Э.А., Тимофеева М.А. Совершенствование методики расчета энергосиловых параметров дрессировочных станов для повышения эффективности производства холоднокатаных полос // Металлы. 2016. №6. С.111-117.

57. Гарбер Э.А., Тимофеева М.А. Новая методика моделирования параметров трения в очаге деформации дрессировочного стана // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия», 2017. №10. С.15-20.

58. Гарбер Э.А., Тимофеева М.А. Совершенствование методов расчета напряжений трения при дрессировке холоднокатаной отожженной стальной полосы // Производство проката. 2017 №10. С.15-20.

59. Garber E.A., Timofeeva M.A., Kozhevnikova I.A., Traino A.L. Simulation of the Energy – Force Parameters of Pinch-Pass Mills// Russian Metallurgy (Metally). 2006. No 2. P. 154-160.

60. Garber E.A., Timofeeva M.A., Improvement of the Technigue of Calcuating the Energy- Force Parameters of Pinch- Pass Mills for Increasing the Efficiency of Producing Cold-Rolled Strips// Russian Metallurgy (Metally), 2016, No 11. P. 1100-1105.

61. Тимофеева М.А., Гарбер Э.А., Кожевникова И.А. Расчет усилия и мощности процесса дрессировки холоднокатаных отожженных полос// Материалы четвертой Всероссийской научно-технической конференции «Вузовская наука-региону» Вологда, 21 февраля 2006 г. Изд. ВоГТУ. С.72-75.

62. Тимофеева М.А., Гарбер Э.А., Левин И.А. Усовершенствование методов расчета режимов дрессировки для повышения качества холоднокатаных листов // Материалы всероссийского научного семинара «Научно-технический прогресс в металлургии» в рамках всероссийской научно-практической конференции «Череповецкие научные чтения – 2010» (22-23 ноября 2010 г.): Сборник статей. Отв. ред. Э.А. Гарбер. Череповец: ЧГУ, 2011. С.135-143.

63. Гарбер Э.А., Тимофеева М.А., Дилигенский Е.В., Шалаевский Д.Л., Дятлов И.А., Антонов П.В. Разработка энергоэффективных режимов работы дрессировочного стана // Материалы 1-й международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии - 2013» (Череповец, 2-4 октября, 2013 г.) Отв. ред. А.Л. Кузьминов. Череповец: ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет», 2013. С.339-346.

64. Гарбер Э.А., Тимофеева М.А., Дилигенский Е.В., Дятлов И.А. Выявление резервов энергоэффективности дрессировочных станов для повышения конкурентоспособности производства холоднокатаных стальных листов/ // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и

металлургического производства, технология и надежность машин, приборов и оборудования: Материалы девятой международной научно – технической конференции (18-19 марта 2014 г.). Вологда: ВоГТУ. 2014. С.59-64.

65. Гарбер Э.А., Тимофеева М.А., Дилигенский Е.В. Анализ факторов, влияющих на расход энергии при дрессировке стальных холоднокатаных отожженных полос // Научно-технический прогресс в черной металлургии. Материалы международного научного семинара (11 декабря 2013 года). Череповец: ЧГУ. 2014. С.82-90.

66. Тимофеева М.А., Гарбер Э.А., Дилигенский Е.В., Антонов П.В. Совершенствование режимов работы дрессировочного стана на основе развития теории дрессировки стальных отожженных полос // Материалы международного научного семинара «Проблемы черной металлургии – 2014». 2015. С.97-106.

67. Математическая модель коэффициента трения при дрессировке стальной холоднокатаной отожженной полосы // Научно – технический прогресс в черной металлургии: Материалы II Международной научно-технической конференции (7-9 октября 2015 г.). Отв. ред. А.Л. Кузьминов. Череповец: ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет». 2015. С.143-145.

68. Тимофеева М.А., Гарбер Э.А. Развитие теории процесса дрессировки холоднокатаных отожженных стальных полос для совершенствования технологии и оборудования дрессировочных станов // Сборник материалов VI Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». (Москва.-10-13 ноября 2015 г.). М:ИМЕТ РАН. 2015. С.942-943.

69. Тимофеева М.А., Гарбер Э.А. и др. Новые методы расчета энергосиловых параметров дрессировочных станов // Материалы Международного научного семинара «Проблемы черной металлургии». 2014. С.97-106.

70. Антонов П.В., Тимофеева М.А., Павлов С.И. и др. Совершенствование технологических режимов дрессировочных станов на основе развития процесса дрессировки. Труды IX конгресса прокатчиков. Череповец. 2013. Том 1. С.31-34.

71. Тимофеева М.А. Гарбер Э.А. Процесс дрессировки холоднокатаных стальных полос (теория, технология, оборудование, тенденции их развития и совершенствования): Монография. Череповец: ЧГУ, 2017. 155 с.

72. Раимбеков А.М. и др. Оценка эффективности электроэрозионного текстурирования рабочих валков // Сталь. 2006. №2. С.38-40.

73. Горбунов А.В., Белов В.К., Беглецов Д.О. Сравнительный анализ способов обработки поверхности валков для производства автолиста // Сталь. 2009. №8. С.50-53.

74. Польшин А.А., Бельский С.М., Черешнев В.В., Белоусов В.А. Совершенствование технологии производства оцинкованного проката с улучшенной микрогеометрией поверхности в ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат» // Производство проката. 2014. №12. С.8-13.

75. Гарбер Э.А., Шадрунова И.А., Никитин Д.И., Дилигенский Е.В., Тимофеева М.А. Совершенствование технологических режимов холодной прокатки на основе новой модели очага деформации // Вестник Череповецкого государственного университета. Научный журнал. Череповец: ЧГУ. 2002. №1 (3). С.47-57.

76. Гарбер Э.А., Павлов С.И. Кузнецов В.В., Тимофеева М.А., Кожевников И.А., Дилигенский Е.В. Влияние нестабильных технологических факторов прокатки на плоскостность холоднокатаных полос // Производство проката. 2008. №11. С.2-13.

77. Гарбер Э.А., Павлов С.И., Кузнецов В.В., Тимофеева М.А. Исследование и устранение причин возникновения дефекта «полосы нагартовки» при холодной прокатке листовой автомобильной стали // Производство проката. 2009. №2. С.2-10.

78. Гарбер Э.А., Павлов С.И., Кузнецов В.В., Тимофеева М.А., Трайно А.И. Причины возникновения и методы устранения на поверхности холоднокатаных автомобильных листов дефектов «поперечная ребристость» и «полосы нагартовки» // Металлы. 2009. №1. С. 12-20.

79. Гарбер Э.А., Павлов С.И., Кожевникова И.А., Тимофеева М.А., Кузнецов В.В. Повышение качества поверхности листовой стали на основе новых решений в теории холодной прокатки // Вестник Череповецкого государственного университета. Научный журнал. 2010. №2. С. 116-125.

80. Гарбер Э.А., Павлов С.И., Кожевникова И.А., Тимофеева М.А., Кузнецов В.В. Устранение дефектов поверхности холоднокатаных листов, вызванных вибрациями рабочих клеток // Сталь. 2011. №4. С.36-42.

81. Гарбер Э.А., Павлов С.И., Кожевникова И.А., Тимофеева М.А., Кузнецов В.В. Устранение дефектов поверхности холоднокатаных листов, вызванных вибрациями рабочих клеток// Сталь, 2011, №4, с.36-42.

82. Гарбер Э.А., Тимофеева М.А., Павлов С.И., Болобанов Н.Л., Антонов В.Ю., Дятлов И.А. Влияние профилировок рабочих и опорных валков на шероховатость поверхности широких холоднокатаных автомобильных листов // Производство проката. 2011. №7. С. 9-13.

83. Гарбер Э.А., Тимофеева М.А., Поспелов И.Д., Павлов С.И., Мишнев П.А., Дятлов И.А. Промышленная технология производства холоднокатаных автомобильных листов с разнотолщиной по всей площади, не превышающей $\pm 2\%$ // Производство проката. 2012. №6. С.10-15.

84. Гарбер Э.А., Тимофеева М.А., Болобанова Н.Л., Антонов В.Ю., Дятлов И.А. Павлов С.И. Исследование и устранение сверхнормативной шероховатости поверхности прикромочных участков широких холоднокатаных полос // Вестник Череповецкого университета. Научный журнал. 2011. №4. Т.2. С.5-8.

85. Тимофеева М.А., Гарбер Э.А. Улучшение плоскостности холоднокатаных полос путем воздействия на нестабильные параметры

технологии горячей и холодной прокатки // Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. и эконом. информ. 2017. №. С.51-55.

86. Garber E.A., Timofeeva M.A., Pavlov S.I., Kuznetsov V.V., Traino A.I. Causes and the Methods of Correction of the Defects «Transverse Ribbing» and «Work – Hardened Bands» of the Surface of Cold-Rolled Automobile Sheets // Russian Metallurgy (Metally). 2009. №1. P.9-15.

87. Гарбер Э.А., Кузнецов В.В., Шадрунова И.А., Дилигенский Е.В., Шурыгина М.В., Тимофеева М.А. Технологические режимы непрерывного стана холодной прокатки, обеспечивающие повышение чистоты поверхности холоднокатаных полос // Материалы IV Международной научно – технической конференции, посвященной 120-летию И.П. Бардина «Прогрессивные процессы и оборудования металлургического производства» (Череповец, 8-10 декабря 2003 г.). Череповец: ЧГУ. 2003. С. 187-194.

88. Кузнецов В.В., Шадрунова И.А., Дилигенский Е.В., Шурыгина М.В., Тимофеева М.А. Повышение чистоты поверхности холоднокатаных полос воздействием на технологические режимы непрерывного стана холодной прокатки // Труды пятого конгресса прокатчиков (Череповец, 21-24 октября 2003 г.). Москва: ОАО «Черметинформация». 2004. С. 95-99.

89. Гарбер Э.А., Тимофеева М.А., Поспелов И.Д. и др. Инновационная технология производства холоднокатаных автомобильных листов с жестким допусками по толщине // Всероссийский научный семинар «Научно-технический прогресс в металлургии» в рамках всероссийской научно-практической конференции «Череповецкие научные чтения – 2011» (29 ноября 2011 г.). Череповец: ЧГУ. 2011.

90. Тимофеева М.А., Гарбер Э.А. Новый технологический метод улучшения плоскостности холоднокатаных листов // Научно – технический прогресс в черной металлургии – 2017 Материалы III Международной научной конференции. Череповец: Череповецкий гос. ун-т, 2017. С.251-258.

91. Zhen-hui Bai, Ya-ya Cui, Jun Zhang etc. Furnace Charging Comprehensive Optimization Technology of the Bell – type Annealing Process // ISIJ International. 2017. №5. P.42-48.

92. Антонов П.В., Болобанова Н.Л., Кожевникова И.А. Моделирование напряжений и деформаций валковой системы широкополосного стана холодной прокатки на основе метода конечных элементов // Сталь. 2019. № 5. С. 28-32.

93. Antonov P.V., Bolobanova N.L., Kozhevnikova I.A. Roller Stress and Strain in a Broad-Strip Cold-Rolling Mill // Steel in Translation. 2019. № 5(49). P. 339-344.

94. Антонов П.В., Болобанова Н.Л., Гарбер Э.А. Совершенствование профилировок валков стана холодной прокатки для повышения точности формирования поперечного профиля прокатываемых полос // Производство проката. 2019. № 6. С. 7-13.

95. 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 // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». 2019. № 6 (75). С. 718-724.

96. 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 // Russian Metallurgy (Metally). 2017. № 9. P.771-774.

97. 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 // Производство проката. 2017. № 3. С. 8-11.

98. 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 // *Металлы*. 2017. № 9. С. 71-74.

99. Гарбер Э.А., Антонов П.В., Шалаевский Д.Л. Анализ причин дефекта холоднокатаных полос «сварка витков рулона при отжиге» и разработка методов его устранения // *Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия»*. 2017. № 1. С. 60-63.

100. Гарбер Э.А., Антонов П.В., Шалаевский Д.Л. Исследование причин возникновения дефекта «сварка витков» в холоднокатаных рулонах ЦПиО ЧерМК ПАО «Северсталь» // *Материалы III Международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии – 2017»*. Череповец: Череповецкий государственный университет. 2017. С. 73-75.

101. 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 // *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.

102. 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.

УТВЕРЖДАЮ
 Директор по техническому развитию и
 качеству
 _____ П.А. Мишнев
 « » _____ 2019 г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ
 результатов работ**

по договору № 1051НП/ 9000081409 от 25.07.18г.

«Совершенствование технологии производства холодного проката на 4-клетевом стане
 2100 ЦПиО ППП»

Краткое описание выполненной работы:

1. Моделирование НДС валковой системы показало, что при любых условиях нагружения напряжения, возникающие в зоне контакта рабочего и опорного валков больше, чем в очаге деформации, что объясняется меньшей шириной площадки упругого контакта между валками по сравнению с длиной очага пластической деформации.
2. Установлено, что распределение напряжений по длине межвалкового контакта всегда имеет максимальное значение в средней части бочек валков. Максимум напряжений связан не с применяемыми на стане CVC профилировками валков, а с конструктивными особенностями опорного валка 4-клетевого стана – диаметром бочки и соотношением диаметра шейки $d_{ш.оп}$ к диаметру бочки $D_{оп}$: $d_{ш.оп} / D_{оп} \sim 0,6$, приводящим к прогибу бочки опорного валка под воздействием усилия прокатки и росту межвалкового давления в середине.
3. Определено, что осевые перемещения рабочих валков, усилия изгиба рабочих валков, исходный поперечный профиль полосы, дефекты проката не приводят к существенному росту межвалковых контактных напряжений, а в некоторых случаях, наоборот, их уменьшают.
4. Установлено, что применение новой профилировки SMS рабочего валка для реализации второго контура регулирования с уменьшением диаметра со стороны обслуживания и со стороны привода на 0,17 мм, выпуклости на 0,034 мм, вогнутости на 0,024 мм по сравнению с существующей не приведет к росту напряжений. К росту напряжений приводит увеличение выпуклости и вогнутости CVC-профилировки рабочего валка при неизменном профиле CVC опорного валка.
5. Анализ профилограмм износа валков показал, что с ростом наработки износ увеличивается и в среднем на радиус составляет у рабочих валков 0,0059 мм, опорных – 0,054 мм и наблюдается в средней части бочек валков. Получено, что износ валков не приводит к росту напряжений, но незначительно увеличиваются упругие деформации в середине бочки рабочего валка в контакте с полосой.
6. Показано, что для исключения роста эквивалентного напряжения под влиянием температурного следует избегать режимов охлаждений, когда температура центральных слоев больше наружных.
7. Расчет НДС валковой системы с учетом изменения характеристик материала валка по сечению, предоставленных компанией «Steinhoff», показал отсутствие увеличения контактных напряжений и напряжений по глубине валка. При этом обоснована необходимость решения вопроса выбора оптимального значения твердости бочки рабочего валка путем всестороннего анализа параметров эксплуатации валков 4-клетевого стана.
8. В результате расчетов установлено, что рабочие валки имеют достаточный запас усталостной прочности в середине бочки.
9. Выполненное исследование напряженно-деформированного состояния валковой системы 4-клетевого стана позволяет сделать основной вывод, что преждевременные выходы из строя рабочих валков никак не связаны с CVC-профилировками валков и их осевой сдвижкой, а связаны с условиями эксплуатации валков на стане: высокими

- относительными обжатиями в клетях № 1 и № 2 и недостаточным охлаждением рабочих валков с начала пуска стана.
10. 10. Для определения факторов и параметров эксплуатации валков, влияющих на появление дефектов поверхностного слоя, был выполнен статистический анализ по всем случаям отслоений валков. В результате установлено, что наиболее подвержены такому разрушению рабочие валки, установленные в верхнее положение клетей № 1 и № 2; за весь период эксплуатации зафиксировано три отслоения хромированных валков.
 11. Анализ параметров технологических режимов прокатки показал, что ввиду большого частного обжатия в клети № 1 захват металла затруднен, прокатка в указанной клети ведется с передним подпором, что приводит к возрастанию усилий прокатки и контактных напряжений и объясняет повышенный процент выхода из строя валков клети № 1.
 12. Сформулированы гипотезы по выявлению факторов, определяющих отслоения поверхностного слоя рабочих валков 4-клетевого стана холодной прокатки: многократное травмирование валков, приводящее к их преждевременному выходу из строя; хромирование рабочих валков в клетях № 1 и № 2 и значения показателя их шероховатости; несоответствие характеристик валков; условия охлаждения валков после вывалки и их влияние на изменение структуры закаленного слоя; изменения параметров процесса прокатки. Предложены пути реализации каждой из гипотез.
 13. Установлено, что при использовании хромированных валков в клетях № 1 и № 2 суммарное количество механических загрязнений, являющихся продуктами износа поверхностей рабочих валков и полосы и следствием контактного трения в очаге деформации, не превышает 150 мг/м² в 54 % исследованных рулонов.
 14. В результате аналитического моделирования технологических и энергосиловых параметров процесса прокатки полос из высокопрочных марок сталей определены возможности стана в условиях существующего привода и после его модернизации.
 15. Сформулированы гипотезы по корректировке режимов обжатий и натяжений, степень корректировок может быть определена только в процессе моделирования процесса прокатки с контролем по усилиям прокатки, мощностям электроприводов и токовым нагрузкам.

Охраноспособный результат: документы на изобретение в стадии подготовки.

Срок начала фактического внедрения: сентябрь 2018 г.

Начальник УНПТ

Старший менеджер УНПТ

Старший менеджер УНПТ

Р.Р. Адигамов

А.И. Лобашев

С.В. Жиленко

Приложение 2

Таблица данных технологии производства отожженных полос ППП ПАО «Северсталь» (фрагмент)

Толщина полосы, мм	Ширина полосы, мм	Относительное обжатие в клетке №5, %	Усилие прокатки рулона в 5-ой клетке, МН	Напряжение полосы на моталке, кН	Концентрация эмульсии в эмульсионной системе Э2, мг/дм ³	Клиновидность поперечного профиля полосы, мм	Выпуск клетки поперечного профиля полосы, мм	Выпуск клетки верхнего рабочего валка 6-ой клетки, мм	Выпуск клетки нижнего рабочего валка 6-ой клетки, мм	Нарботка рабочих валков 5 клетки, км	Температура смотки полосы на стане горячей прокатки, °С	Толщина подката, мм	Заданное значение температуры окончания отжига, °С	Заданное значение температуры включения быстрого охлаждения, °С	Положение рулона в садке	Доля проката, отсортированного по дефекту "сварка" , %
0,60	890,00	3,03	9,69	2,17	10,00	-0,03	0,05	0,00	0,15	196,44	530,00	3,50	720,00	320,00	3,00	11,57
0,76	1068,00	2,72	9,61	3,30	11,00	-0,02	0,08	0,00	0,00	189,45	530,00	3,50	720,00	320,00	1,00	50,02
0,75	1430,00	4,25	11,92	4,40	10,00	0,00	0,07	0,15	0,00	11,75	580,00	3,00	670,00	470,00	1,00	34,35
0,50	1260,00	3,56	11,43	2,25	10,00	0,00	0,08	0,00	0,15	28,45	580,00	2,50	670,00	470,00	2,00	92,47
0,48	1260,00	3,30	11,94	2,25	10,00	0,00	0,06	0,00	0,15	33,51	580,00	2,20	670,00	400,00	2,00	64,55
0,40	1260,00	3,22	12,53	2,02	10,00	0,01	0,07	0,15	0,00	282,59	580,00	2,00	670,00	400,00	2,00	91,72
0,40	1260,00	3,35	13,52	2,02	10,00	0,00	0,06	0,15	0,00	289,58	580,00	2,00	670,00	400,00	3,00	91,56
0,36	1180,00	3,02	10,38	1,74	10,00	-0,01	0,08	0,00	0,00	260,97	530,00	2,00	720,00	320,00	4,00	85,53
0,36	952,00	5,12	8,54	1,38	10,00	0,01	0,06	0,10	0,15	187,17	530,00	2,00	720,00	320,00	4,00	91,15
0,54	1270,00	3,34	12,43	2,66	10,00	-0,01	0,09	0,15	0,00	160,72	530,00	2,10	720,00	450,00	3,00	41,34
0,54	1270,00	3,33	12,45	2,64	10,00	0,00	0,09	0,15	0,00	164,76	530,00	2,10	720,00	500,00	3,00	69,52
0,45	1244,00	3,06	12,28	2,08	9,00	-0,01	0,04	0,15	0,00	27,92	580,00	2,20	670,00	450,00	3,00	45,31
0,51	1464,00	3,16	13,33	2,88	8,00	0,02	0,09	0,10	0,00	67,88	580,00	2,00	675,00	500,00	2,00	14,99

Толщина полосы, мм	Ширина полосы, мм	Относительное обжатие в клетке №2, %	Усилие прокатки рулона в 2-ой клетке, МН	Напряжение полосы на моталке, кН	Концентрация золь в эмульсионной системе Э2, мг/дм ³	Клиновидность поперечного профиля полосы, мм	Выпуклость поперечного профиля полосы, мм	Выпуклость верхнего рабочего валка 5-ой клетки, мм	Выпуклость нижнего рабочего валка 5-ой клетки, мм	Наработка рабочих валков 5 клетки, км	Температура смотки полосы на стане горячей прокатки, °С	Толщина подката, мм	Заданное значение температуры окончания отжига, °С	Заданное значение температуры включения быстрого охлаждения, °С	Положение рулона в садке	Доля проката, отсортированного по дефекту "сварка" , %
0,45	1244,00	2,94	7,08	2,10	9,00	0,02	0,08	0,15	0,00	57,57	580,00		670,00	450,00	2,00	39,72
0,40	1240,00	2,75	12,14	2,02	9,00	0,02	0,07	0,00	0,00	189,43	580,00		670,00	400,00	2,00	33,66
0,40	1147,00	3,19	11,95	1,85	9,00	0,02	0,07	-0,10	-0,05	6,36	580,00	2,00	650,00	400,00	4,00	87,43
0,76	1080,00	3,82	9,40	3,49	9,00	-0,01	0,07	0,00	0,15	183,61	530,00	3,50	720,00	400,00	4,00	63,89
0,76	1070,00	4,21	9,34	3,52	8,00	-0,02	0,08	0,15	0,00	102,34	530,00	3,50	720,00	500,00	1,00	21,69
0,76	1080,00	3,75	9,40	3,53	9,00	0,00	0,06	0,00	0,15	179,52	530,00	3,50	720,00	470,00	3,00	13,41
0,81	1080,00	4,45	9,35	3,91	8,00	-0,02	0,07	0,15	0,00	87,43	530,00	3,50	720,00	470,00	4,00	12,30
0,81	1080,00	4,07	9,32	3,74	8,00	-0,02	0,06	0,15	0,00	73,38	530,00	3,50	720,00	500,00	1,00	43,63
0,76	1080,00	4,32	9,32	3,49	8,00	-0,03	0,07	0,15	0,00	61,67	530,00	3,50	720,00	470,00	2,00	62,67
0,60	1265,00	2,29	12,17	2,90	8,00	0,01	0,05	0,00	0,15	152,23	720,00	2,75	690,00	370,00	2,00	44,61
0,75	1425,00	4,26	12,72	5,07	9,00	-0,01	0,09	0,15	0,00	113,36	530,00	3,00	720,00	500,00	1,00	68,58
0,66	1340,00	3,75	12,88	3,64	9,00	0,02	0,08	0,15	0,00	222,12	530,00	2,75	720,00	370,00	3,00	70,72
0,50	1377,00	3,78	13,26	2,80	9,00	0,02	0,08	0,15	0,00	213,32	530,00	2,00	720,00	370,00	1,00	96,01
0,75	1420,00	4,25	13,28	4,18	9,00	-0,01	0,07	0,00	0,00	83,45	530,00	3,00	720,00	370,00	2,00	52,68
0,38	1260,00	2,73	13,22	1,93	8,00	0,04	0,07	0,15	0,00	419,71	580,00		640,00	400,00	2,00	88,99
0,25	1010,00	2,99	9,47	1,01	9,00	0,01	0,07	0,15	0,15	44,15	530,00	1,80	720,00	320,00	4,00	100,00
0,80	1443,00	3,95	13,11	4,58	9,00	-0,03	0,10	0,00	0,15	30,27	530,00	3,00	720,00	470,00	1,00	48,29

Толщина полосы, мм	Шероша полосы, мм	Относительное обжатие в клетех №5, %	Условия прокатки рулона в 5-ой клетех, МН	Натяжение полосы на мотальне, кН	Концентрация эмульсии в зольно- ной системе Э2, мг/дм3	Клиновидность поперечного профиля полосы, мм	Выпуклость поперечного профиля полосы, мм	Выпуклость верхнего рабочего валка 5- ой клетех, мм	Выпуклость нижнего рабочего валка 5- ой клетех, мм	Наработка рабочих валков 5 клетех, км	Температура смотки полосы на стане горячей прокатки, °С	Толщина подката, мм	Заданное значение температуры оковачания отжига, °С	Заданное значение температуры включения быстрого охлаждения, °С	Положение рулона в садке	Доля проката, отсорти- рованного по дефекту "сварка" , %
1,01	1260,00	7,63	12,49	5,64	9,00	-0,03	0,09	0,00	0,00	206,69	530,00	5,50	720,00	470,00	1,00	67,80
0,81	1560,00	3,31	13,12	5,18	9,00	0,01	0,07	0,00	0,00	44,34	530,00	3,00	720,00	470,00	1,00	19,05
0,50	1377,00	4,62	13,26	2,60	11,00	0,01	0,07	0,00	0,00	43,33	530,00	2,00	720,00	470,00	2,00	69,55
0,70	1430,00	3,89	13,12	3,90	10,00	0,03	0,06	0,00	0,00	8,70	530,00	3,00	720,00	370,00	2,00	82,96
0,40	1128,00	4,00	12,14	1,82	12,00	0,02	0,06	0,15	0,00	50,27	530,00	2,20	720,00	320,00	3,00	82,41
0,61	1130,00	1,37	10,54	2,59	9,00	0,04	0,10	0,15	0,00	134,34	580,00		690,00	370,00	1,00	31,06
0,75	1218,00	3,74	12,02	3,63	9,00	-0,03	0,06	0,00	0,00	52,45	580,00	2,75	670,00	470,00	1,00	89,73
0,70	1229,00	4,00	11,94	3,60	10,00	0,02	0,07	0,00	0,00	47,85	530,00	3,00	720,00	470,00	1,00	47,68
0,70	1510,00	4,99	13,45	4,11	10,00	-0,01	0,10	-0,15	0,00	21,53	530,00	2,50	720,00	500,00	1,00	45,11
0,60	895,00	2,39	9,88	2,24	9,00	-0,02	0,05	0,15	0,15	89,33	720,00	2,75	720,00	400,00	1,00	87,08
0,30	1010,00	3,50	9,19	1,21	9,00	0,02	0,09	0,15	0,15	68,35	530,00	2,00	720,00	320,00	4,00	93,53
0,40	1260,00	3,95	12,33	2,03	9,00	0,02	0,10	0,00	0,00	239,39	530,00	2,20	720,00	320,00	3,00	91,69
0,51	1258,00		12,22	2,44	8,00	0,01	0,09	0,00	0,15	129,45	560,00	2,51	670,00	400,00	2,00	30,29
0,70	1525,00		13,09	4,15	8,00	0,01	0,10	-0,05	0,00	117,44	530,00	2,50	720,00	370,00	1,00	100,00
0,51	1326,00	3,76	12,91	2,50	9,00	0,02	0,10	0,15	0,00	15,15	580,00	1,90	720,00	470,00	2,00	100,00
0,54	1293,00	2,90	12,56	2,74	8,00	0,03	0,08	0,15	0,00	101,70	530,00	2,10	670,00	470,00	1,00	91,42

Толщина полосы, мм	Ширина полосы, мм	Относительное обжатие в клетке ЛсБ, %	Усилие прокатки рулона в 5-ой клетке, МН	Напряжение полосы на моталке, кН	Концентрация эмульсии в эмульсионной системе Э2, мг/дм ³	Клиновидность поперечного профиля полосы, мм	Выпуклость поперечного профиля полосы, мм	Выпуклость верхнего рабочего вала 5-ой клетки, мм	Выпуклость нижнего рабочего вала 5-ой клетки, мм	Наработка рабочих валков 5 клетки, км	Температура мотки полосы на стане горячей прокатки, °С	Толщина подката, мм	Заданное значение температуры окончания отжига, °С	Заданное значение температуры включения быстрого охлаждения, °С	Положение рулона в салке	Доля проката, отсортированного о по дефекту "сварка" , %
0,54	1293,00	2,78	12,58	2,73	8,00	0,01	0,08	0,15	0,00	117,71	530,00	2,10	720,00	470,00	2,00	90,95
0,54	1293,00	2,97	12,57	2,74	8,00	0,01	0,07	0,15	0,00	109,69	530,00	2,10	720,00	470,00	3,00	88,49
0,40	1260,00	3,52	12,96	2,10	8,00	0,01	0,09	0,00	0,15	331,09	530,00		720,00	470,00		91,50
0,40	1260,00	3,65	13,10	2,10	8,00	0,01	0,09	0,00	0,15	336,03	530,00		720,00	470,00		90,61
0,66	1390,00	3,81	12,52	3,76	11,00	0,00	0,07	0,00	0,00	125,03	530,00	2,75	720,00	370,00	3,00	100,00
0,71	1442,00	3,40	12,33	4,05	11,00	-0,01	0,06	0,00	0,00	49,56	530,00	3,00	720,00	470,00	1,00	100,00
0,60	1260,00	4,10	12,18	3,06	9,00	0,00	0,06	0,00	0,15	167,33	720,00	2,75	720,00	400,00	1,00	92,03
0,50	1260,00	3,76	12,21	2,41	9,00	0,00	0,04	0,15	0,00	143,02	720,00	2,50	690,00	450,00	3,00	48,61
0,71	1540,00	1,78	12,68	4,52	10,00	0,01	0,09	-0,15	0,00	2,54	530,00	2,50	720,00	470,00	2,00	31,67
0,51	1402,00	2,96	12,88	2,63	10,00	-0,01	0,07	0,00	0,00	215,27	580,00	2,00	640,00	500,00	2,00	51,88
0,71	1442,00	3,42	12,64	4,08	10,00	-0,02	0,07	0,00	0,00	103,59	530,00	3,00	720,00	470,00	2,00	79,45
0,50	1063,00	1,79	10,14	1,97	11,00	0,00	0,05	0,15	0,00	293,35	620,00		720,00	370,00	1,00	92,64
0,31	1010,00	4,95	9,19	1,25	11,00	0,03	0,07	0,15	0,00	214,53	580,00	2,00	670,00	400,00	4,00	46,07
0,39	1253,00	2,03	5,36	1,73	11,00	0,01	0,08	0,00	0,15	90,16	620,00	1,80	720,00	470,00	3,00	90,42
0,34	1010,00	4,84	9,20	1,38	11,00	0,02	0,05	0,15	0,00	140,62	580,00	2,00	670,00	400,00	3,00	89,58

Толщина полосы, мм	Ширина полосы, мм	Относительное обжатие в клетке №5, %	Усилие прокатки рулона в 5-ой клетке, МН	Натяжение полосы на моталке, кН	Концентрация эмульсии в эмульсионной системе Э2, мг/дм ³	Клещевидность поперечного профиля полосы, мм	Выпуск клетки поперечного профиля полосы, мм	Выпуск клетки верхнего рабочего вала 5- ой клетки, мм	Выпуск клетки нижнего рабочего вала 5- ой клетки, мм	Наработка рабочих валков 5 клетки, км	Температура мотки полосы на стане горячей прокатки, °С	Толщина подката, мм	Заданное значение температуры охлаждения, °С	Заданное значение температуры охлаждения, °С	Заданное значение температуры охлаждения, °С	Положение рулона в садке	Доля проката, отсортированного о по дефекту "сварка" , %
0,35	1230,00	2,29	12,54	1,75	11,00	0,03	0,07	0,00	0,15	258,32	530,00	2,00	720,00	720,00	370,00	3,00	91,63
0,35	1260,00	4,44	12,66	1,78	11,00	0,01	0,07	0,00	0,00	104,11	530,00	2,00	720,00	720,00	470,00	3,00	94,95
0,40	1260,00	4,38	12,68	2,02	11,00	0,02	0,07	0,00	0,00	70,44	530,00	2,20	720,00	720,00	470,00	2,00	92,15
0,60	1310,00	3,68	12,57	3,03	10,00	0,02	0,06	0,00	0,00	156,17	720,00	2,75	720,00	720,00	400,00	1,00	45,79
0,66	1385,00	4,24	13,24	3,75	10,00	0,01	0,06	0,00	0,00	88,06	530,00	2,75	720,00	720,00	370,00	2,00	33,47
0,71	940,00	4,95	9,28	2,71	11,00	0,01	0,02	0,15	0,00	236,69	530,00	3,00	720,00	720,00	470,00	1,00	13,28
0,65	1265,00	3,30	12,72	3,25	11,00	0,00	0,07	0,00	0,15	16,00	530,00	2,75	720,00	720,00	470,00	1,00	59,69
0,65	1265,00	3,70	12,77	3,26	11,00	0,01	0,08	0,00	0,15	84,03	530,00	2,75	720,00	720,00	470,00	3,00	50,14
0,71	1540,00	4,16	13,15	4,26	10,00	0,01	0,09	0,00	0,00	137,45	530,00	2,50	720,00	720,00	470,00	3,00	95,19
0,71	1540,00	4,01	13,33	3,68	10,00	0,02	0,09	0,00	0,00	116,33	530,00	2,50	720,00	720,00	470,00	2,00	55,39
0,48	1260,00	3,54	12,25	2,25	10,00	0,00	0,09	0,00	0,00	331,40	530,00	2,30	720,00	720,00	470,00	2,00	95,61
0,66	1390,00	4,39	13,11	3,79	10,00	-0,02	0,08	0,00	0,00	51,85	680,00	3,00	730,00	730,00	370,00	2,00	83,54
0,35	910,00	3,91	9,41	1,27	10,00	-0,01	0,07	0,15	0,15	204,84	530,00	2,00	720,00	720,00	470,00	4,00	72,69
0,35	920,00	3,20	9,16	1,29	11,00	0,01	0,06	0,15	0,00	240,45	530,00	2,00	720,00	720,00	320,00	1,00	91,54
0,30	1010,00	4,16	10,13	1,93	8,00	0,00	0,06	0,15	0,15	287,20	720,00	2,50	690,00	690,00	450,00	1,00	63,74
0,30	1010,00	4,16	10,04	1,93	8,00	-0,02	0,05	0,15	0,15	322,21	720,00	2,50	690,00	690,00	450,00	2,00	67,67
0,30	1010,00	4,25	10,05	1,93	8,00	-0,03	0,05	0,15	0,15	327,17	720,00	2,50	690,00	690,00	450,00	3,00	97,55
0,30	1010,00	4,10	10,02	1,95	8,00	-0,02	0,07	0,15	0,15	306,79	720,00	2,50	690,00	690,00	450,00	1,00	73,90

Толщина полосы, мм	Шерина полосы, мм	Отвес- тельное обжатие в клетке №5, %	Условие прокатки рулона в 5-ой клетке, МН	Напряжение полосы на мотальне, кН	Концен- трация эмульсии в эмульсион- ной системе Э2, мг/дм ³	Клино- видность попере- чного профиля полосы, мм	Выпу- кльсть попере- чного профиля полосы, мм	Выпу- кльсть профиля верхнего рабочего валка 5- ой клетки, мм	Выпу- кльсть профиля нижнего рабочего валка 5- ой клетки, мм	Нароботка рабочих валков 5 клетки, км	Темпера- тура смотки полосы на стане горячей прокатки, °С	Толщина подката, мм	Заданное значение темпера- туры окончания отжига, °С	Заданное значение темпера- туры включения быстрого охлаждения, °С	Положе- ние рулона в садке	Доля проката, отсорти- рованного о по дефекту "сварка"
0,56	1215,00	3,14	12,31	2,52	10,00	-0,02	0,07	0,00	0,15	34,72	530,00	2,50	720,00	320,00	1,00	73,29
0,25	910,00	5,09	9,45	0,96	10,00	0,01	0,08	0,15	0,15	297,47	530,00	1,80	720,00	320,00	3,00	100,00
0,50	1010,00	4,16	10,13	1,93	8,00	0,00	0,06	0,15	0,15	287,20	720,00	2,50	690,00	450,00	1,00	82,73
0,65	1265,00	4,27	12,67	2,87	10,00	-0,01	0,07	0,00	0,15	140,02	530,00	2,75	720,00	320,00	2,00	98,31
0,50	950,00	2,33	9,77	1,79	11,00	-0,02	0,07	0,00	0,10	94,98	530,00		720,00	320,00	3,00	46,13
0,28	1010,00	4,20	10,81	1,13	11,00	0,00	0,08	0,15	0,10	24,08	530,00	1,80	720,00	320,00	3,00	95,26
0,35	910,00	7,34	9,06	1,28	11,00	0,02	0,06	0,15	0,00	127,44	530,00	2,00	720,00	320,00	3,00	91,43
0,60	925,00	5,06	10,10	2,14	9,00	-0,01	0,05	0,15	0,15	163,53	720,00	2,75	670,00	400,00	1,00	0,00
0,79	1010,00	4,51	9,28	3,30	12,00	-0,04	0,07	0,15	0,00	13,33	530,00		720,00	370,00	1,00	0,00
0,79	965,00	4,39	9,05	3,15	12,00	0,01	0,07	0,15	0,00	19,37	530,00	3,50	720,00	370,00	4,00	0,00
0,53	1010,00	3,87	10,38	2,00	12,00	0,03	0,06	0,15	0,00	140,85	530,00		720,00	370,00	2,00	0,00
0,60	1000,00	3,96	9,44	2,27	11,00	0,00	0,06	0,15	0,15	145,39	530,00	2,75	720,00	470,00	3,00	0,00
0,60	1000,00	3,66	9,43	2,27	11,00	0,00	0,05	0,15	0,15	149,41	530,00	2,75	720,00	470,00	4,00	0,00
0,70	1010,00	3,43	9,38	2,89	11,00	0,00	0,03	0,15	0,15	152,84	580,00		670,00	400,00	1,00	0,00
0,70	1010,00	4,43	9,41	2,90	11,00	0,03	0,07	0,15	0,15	160,82	530,00		720,00	470,00	1,00	0,00
0,70	1010,00	4,24	9,40	2,89	11,00	0,02	0,06	0,15	0,15	165,06	530,00		720,00	470,00	4,00	0,00
0,70	1010,00	4,34	9,31	2,94	11,00	0,03	0,06	0,15	0,15	168,55	530,00		720,00	470,00	3,00	0,00
0,70	1010,00	4,31	9,15	2,92	11,00	0,03	0,07	0,15	0,15	172,86	530,00		720,00	470,00	2,00	0,00
0,71	900,00	2,32	8,96	2,60	10,00	0,05	0,04	0,15	0,15	47,74	580,00	3,00	690,00	400,00	1,00	0,00

Приложение 3

УТВЕРЖДАЮ
 Директор по техническому развитию и
 качеству



П.А. Мишнев
 2018 г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ
 результатов работ**

по договору № 1034НП/ ТД5572 от 27.11.15 г.

«Разработка технологии производства холоднокатаного проката, исключаящей
 свариваемость витков холоднокатаных рулонов при колпаковом отжиге»

Краткое описание выполненной работы:

1. изучено влияние технологических параметров производства стальных холоднокатаных отожженных полос на вероятность их сварки при отжиге в колпаковых печах;
2. установлены наиболее значимые факторы технологии производства, оказывающие решающее воздействие на слипание витков в холоднокатаном рулоне при отжиге;
3. получено эмпирическое уравнение, позволяющее с вероятностью 80% прогнозировать возникновение сварки между витками в рулоне.

Охраноспособный результат: на момент окончания договора отсутствует

Срок начала фактического внедрения: июль 2018 г.

Начальник УНПТ

Старший менеджер УНПТ

Старший менеджер УНПТ



Р.Р. Адигамов

А.И. Лобашев

С.В. Жиленко