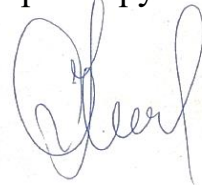


**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Череповецкий государственный университет»**

На правах рукописи



ХАРЛАМОВ Игорь Анатольевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ПЛОСКОСТНОСТЬЮ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТАЛЬНЫХ ХОЛОДНОКАТАНЫХ
ПОЛОС**

Специальность 2.6.4. Обработка металлов давлением

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

Научный руководитель:
Болобанова Наталия Леонидовна,
доктор технических наук, доцент

Череповец – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. Современное состояние, проблемы и перспективные методы обеспечения плоскостности холоднокатаных полос	15
1.1 Плоскостность как критерий качества	15
1.2 Физико-математические основы формирования плоскостности	21
1.3 Принципы контроля и регулирования плоскостности на непрерывном стане	24
1.4 Анализ существующих методов управления плоскостностью при холодной прокатке	32
1.5 Проблема обеспечения прецизионной правки холоднокатаных полос	37
1.6 Проблема комплексной оценки плоскостности холоднокатаных полос в производстве плоского проката	42
Выводы по главе 1	44
Глава 2. Оборудование, методики и материалы для проведения исследования	47
2.1 Особенности технологического процесса производства холоднокатаных полос	47
2.2 Исследуемые материалы	52
2.3 Методика сбора и обработки промышленных данных	53
2.4 Лабораторные и промышленные исследования	58
Выводы по главе 2	60
Глава 3. Разработка и апробация методов прогнозного управления плоскостностью холоднокатаных полос	62
3.1 Исследование совместного регулирования систем CVC и WRB	62
3.2 Влияние параметров горячекатаного подката на плоскостность. Разработка модели условного показателя качества подката	75

3.3 Способ предварительной настройки параметров CVC и WRB для обеспечения плоскостности полос из IF-стали	87
3.4 Перспективы развития прогнозного подхода к настройке систем CVC и WRB на основе машинного обучения	98
Выводы по главе 3	102
Глава 4. Разработка и исследование методов управления плоскостностью при правке холоднокатаных полос на основе прогнозирования механических свойств	105
4.1 Анализ влияния предела текучести на степень пластической деформации при правке холоднокатаных полос в роликовой правильной машине	105
4.2 Разработка статистической модели прогнозирования предела текучести по данным предшествующих переделов	110
4.3 Метод расчета оптимальных настроек роликовой правильной машины, промышленная апробация и анализ его эффективности ..	115
Выводы по главе 4	120
Глава 5. Промышленная апробация и внедрение методов прогнозного управления и цифровой аттестации плоскостности холоднокатаных полос	122
5.1 Апробация и внедрение способа прогнозной настройки систем CVC и WRB для обеспечения плоскостности холоднокатаных полос	122
5.2 Совершенствование алгоритма цифровой аттестации плоскостности холоднокатаных полос	125
Выводы по главе 5	135
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	137
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	140
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Справка об экономическом эффекте	156
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Акт внедрения	157

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Современное развитие автомобилестроения, машиностроения и производств прецизионных изделий предъявляет повышенные требования к качеству стального холоднокатаного листового проката, среди которых плоскостность является одним из ключевых параметров. Внедрение высокоавтоматизированных линий резки и штамповки, а также широкое использование лазерных и плазменных технологий требуют от металлургов обеспечения минимальных отклонений от плоскостности – на уровне 2–5 мм на один метр длины. Одновременно расширяется сортамент продукции за счет высокопластичных (IF – Interstitial Free) и высокопрочных сталей, для которых достижение стабильной геометрии сопряжено с повышенными технологическими рисками. В этих условиях ключевым направлением повышения конкурентоспособности является совершенствование методов управления плоскостностью на всех этапах производства холоднокатаных полос.

Несмотря на оснащение непрерывных станов холодной прокатки системами активного воздействия на профиль и плоскостность, такими как осевая сдвигка рабочих валков (CVC – Continuously Variable Crown) и гидроизгиб рабочих валков (WRB – Work Roll Bending), вопросы их совместного влияния на конечную геометрию полосы остаются недостаточно изученными. Промышленная практика выявила сложные дефекты пространственной неустойчивости – «диагональная волна», возникновение которых связано с рассогласованным динамическим взаимодействием CVC и WRB. Раскрытие физических закономерностей, лежащих в основе таких дефектов, и определение условий их предотвращения составляют важную задачу, решение которой позволит повысить эффективность использования дорогостоящего оборудования и стабильность процесса прокатки.

Существенное влияние на конечную плоскостность оказывает «технологическая наследственность» горячекатаного подката. Однако в настоящее время отсутствуют количественные критерии, позволяющие по параметрам геометрии подката и режимам горячей прокатки оценить степень ее влияния на формирование плоскостности при последующей холодной прокатке. Это делает невозможным переход от регулирования по отклонению к прогнозному назначению начальных уставок систем CVC и WRB, особенно для широких полос из IF-стали, где даже незначительная асимметрия профиля приводит к нестабильности формы холоднокатаных полос.

На завершающем этапе производства, правке на роликовых правильных машинах (РПМ), требуемая плоскостность достигается за счет знакопеременного изгиба. Однако режимы правки определяются точностью механических свойств холоднокатаных полос: без учета индивидуальных характеристик каждого рулона степень пластической проработки металла варьируется в широких пределах (50–90%), что не позволяет гарантированно устранять дефекты плоскостности. Решение этой проблемы требует разработки нового метода, обеспечивающего прогнозную настройку оборудования на основе данных о свойствах и технологической истории рулона.

Таким образом, актуальность настоящего исследования определяется необходимостью раскрытия новых физических закономерностей формирования плоскостности холоднокатаных полос на всех основных этапах производства – прокатке с применением современных средств активного воздействия (систем осевой сдвижки и гидроизгиба рабочих валков) и завершающей правке, а также разработки на их основе комплекса прогнозных методов управления, обеспечивающих стабильное высокое качество продукции и повышение эффективности металлургического производства.

Степень разработанности темы исследования.

Проблемы управления плоскостностью холоднокатаных полос являются многоплановыми и ряд аспектов остается недостаточно изученным. К наиболее существенным относятся следующие.

1. Не раскрыты закономерности совместного влияния осевой сдвижки валков CVC и гидроизгиба рабочих валков WRB на формирование профиля и плоскостности. Отсутствует описание механизма возникновения дефекта «диагональная волна» при рассогласованном динамическом взаимодействии этих систем. Не разработаны технологические правила, предотвращающие данный дефект.

2. Отсутствуют способы прогнозного назначения начальных уставок осевого смещения CVC и усилий гидроизгиба рабочих валков, учитывающие параметры горячекатаного подката. Это не позволяет компенсировать технологическую наследственность и предотвращать дефекты плоскостности до начала прокатки, особенно для высокопластичных IF-сталей.

3. Настройка роликовых правильных машин ведется по усредненным справочным данным предела текучести, без учета индивидуальной технологической истории рулона. Отсутствуют методы прогнозирования предела текучести, интегрирующие данные всех предшествующих переделов, что не позволяет обеспечить гарантированное устранение дефектов плоскостности при правке.

Актуальность решения перечисленных проблем обусловлена необходимостью обеспечения стабильного качества холоднокатаных полос, соответствующего современным требованиям автомобилестроения и других высокотехнологичных отраслей. При этом важным остается переход от регулирования по отклонению к прогнозируемому управлению плоскостностью на непрерывном стане с применением систем CVC и WRB, а также на операции завершающей правки.

Цель работы – разработка научно обоснованных технических и технологических решений по управлению плоскостностью стальных холоднокатаных полос, направленных на повышение стабильности их геометрических параметров, снижение доли несоответствующей продукции и сокращение производственных затрат при прокатке и завершающей правке.

Задачи работы.

1. Установить закономерности совместного регулирования профиля и плоскостности системами осевой сдвижки CVC и гидроизгиба рабочих валков WRB на непрерывном стане холодной прокатки, раскрыть физический механизм возникновения дефекта «диагональная волна» и обосновать технологические правила его предотвращения.

2. Выявить и количественно оценить влияние геометрических параметров горячекатаного подката и температурных режимов горячей прокатки на формирование локальных дефектов плоскостности при холодной прокатке высокопластичных IF-сталей; на этой основе обосновать интегральный показатель качества подката X , характеризующий его технологическую наследственность.

3. Обосновать принцип прогнозной компенсации технологической наследственности подката при холодной прокатке IF-сталей, заключающийся в иерархическом распределении корректирующих воздействий систем CVC и WRB по клетям непрерывного стана, и определить количественные соотношения, связывающие интегральный показатель качества подката X с рациональными уставками осевого смещения валков и усилием гидроизгиба.

4. Установить влияние параметров настройки роликовой правильной машины на устранение дефектов плоскостности при правке холоднокатаных полос и обосновать критерии для расчета рациональных режимов правки с учетом технологической истории рулона.

5. Выполнить промышленную апробацию и внедрение разработанных технических и технологических решений в условиях действующего

металлургического производства с оценкой их технико-экономической эффективности.

Объект исследования – стальная холоднокатаная полоса, в том числе из высокопластичных IF-сталей (CR2, CR3, CR4, DC05, DX54D, DX57D, 08Ю и других), и технологический процесс ее производства, включающий прокатку на непрерывном 4-клетевом стане с системами осевой сдвижки CVC и гидроизгиба рабочих валков WRB и завершающую правку на роликовых правильных машинах.

Предмет исследования – закономерности формирования плоскостности холоднокатаной стальной полосы под влиянием параметров подката и режимов обработки, в том числе для IF-сталей при прокатке и для всего сортамента при правке, методы прогнозного управления системами воздействия на форму полосы на непрерывном стане и принципы настройки роликовой правильной машины для стабильного устранения дефектов плоскостности.

Научная новизна.

1. Впервые установлена и описана причинно-следственная связь формирования дефекта «диагональная волна» при холодной прокатке. Показано, что дефект возникает вследствие несогласованного динамического взаимодействия систем осевой сдвижки CVC и гидроизгиба рабочих валков WRB. Раскрыт физический механизм, заключающийся в асимметричном диагональном перераспределении давления в очаге деформации при рассогласовании геометрического воздействия CVC и силового отклика WRB. На этой основе обоснован принцип управления плоскостностью, основанный на пространственно-временной синхронизации воздействий CVC и WRB, исключающий асимметричное нагружение очага деформации.

2. Впервые для высокопластичных IF-сталей, производимых на непрерывных станах холодной прокатки с системами CVC и WRB, установлены количественные соотношения, связывающие асимметрию

поперечного профиля горячекатаного подката (клиновидность кромок, смещение вершины профиля) и температурные режимы конца прокатки и смотки с формированием локальных дефектов плоскостности. На основе этих соотношений обоснован интегральный показатель качества подката X , количественно характеризующий технологическую наследственность и позволяющий оценивать склонность подката к образованию неплоскостности до начала прокатки рулона.

3. Обоснован новый принцип прогнозной компенсации технологической наследственности подката при холодной прокатке IF-сталей, заключающийся в иерархическом распределении корректирующих воздействий между системами CVC и WRB по клетям непрерывного стана: в первых двух клетях осевая сдвижка ограничена для сохранения унаследованной геометрии подката, в предпоследней клетке выполняется предварительная коррекция профиля, в последней клетке с минимальным обжатием – окончательная коррекция распределения напряжений по ширине полосы. Установлены количественные соотношения, связывающие интегральный показатель качества подката X с рациональными уставками осевого смещения валков в предпоследней и последней клетях и усилием гидроизгиба в последней клетке.

4. Установлена линейная зависимость кривизны изгиба холоднокатаной полосы от ее толщины и величины входного перекрытия роликовой правильной машины, справедливая для всего сортаментного диапазона толщин 1,2–3,0 мм, что в совокупности с прогнозированием предела текучести по данным химического состава и технологической истории всех предшествующих переделов позволило обосновать рациональный уровень пластической деформации (70%), гарантирующий устранение дефектов плоскостности для каждого рулона.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы заключается в раскрытии новых

закономерностей управления плоскостностью стальных холоднокатаных полос на всех этапах производства. Результаты выполненных теоретических и промышленных исследований вносят вклад в понимание физических процессов обеспечения плоскостности в условиях непрерывной холодной прокатки и завершающей правки, создавая основу для разработки новых технологических решений по достижению прецизионной плоскостности проката.

Практическая значимость работы заключается в разработке и промышленной реализации комплекса технологических решений, направленных на повышение эффективности управления плоскостностью холоднокатаных полос.

1. Разработан и внедрен способ прогнозной начальной настройки систем осевой сдвижки CVC и гидроизгиба WRB на непрерывном 4-клетевом стане холодной прокатки 2100 ПАО «Северсталь». Применение способа обеспечивает стабильную плоскостность полос из IF-сталей шириной до 1640 мм, снижает долю несоответствующей продукции по дефектам плоскостности с 1,95% до 0,11% и дает годовой экономический эффект 4,1 млн руб., что непосредственно соответствует повышению стабильности геометрических параметров, снижению доли брака и сокращению производственных затрат. Новизна технического решения подтверждена патентом РФ на изобретение № 2827016.

2. На основе результатов исследования совместного регулирования систем CVC и WRB разработаны и внедрены технологические правила, ограничивающие автономную корректировку осевой сдвижки в клетях № 2 и № 3 непрерывного стана холодной прокатки и расширяющие диапазоны регулирования гидроизгиба. Внедрение правил позволило исключить возникновение сложного дефекта пространственной неустойчивости «диагональная волна» при прокатке стальных широких полос, что повышает стабильность геометрических параметров и снижает потери от брака.

3. Для операции правки холоднокатаных полос на роликовых правильных машинах разработан метод расчета рационального входного перекрытия, базирующийся на прогнозной модели предела текучести, интегрирующей данные химического состава и технологических параметров всех предшествующих переделов. Метод обеспечивает индивидуальную настройку режимов правки для каждого рулона, поддерживая пластическую деформацию на уровне 70%, что гарантирует стабильное устранение дефектов плоскостности.

4. Разработан и внедрен усовершенствованный алгоритм цифровой аттестации плоскостности холоднокатаных полос, основанный на определении активных зон стресс-ролика, формировании пяти диагностических групп (левая кромка, левая переходная зона, центр, правая переходная зона, правая кромка) и расчете статистических характеристик напряжений. Алгоритм обеспечивает непрерывный мониторинг остаточных напряжений в реальном времени с формированием структурированного цифрового заключения для каждого рулона, что повышает объективность контроля качества и позволяет своевременно корректировать технологические режимы для стабилизации геометрических параметров.

Методология и методы исследования.

Работа включает комплекс исследований, основанных на использовании совокупности современных научных методов, применяемых в области обработки металлов давлением. Теоретические исследования выполнены с применением методов математической статистики и машинного обучения, реализованных на языке Python. Экспериментальные исследования механических свойств холоднокатаных полос проводились по стандартным методикам (ГОСТ 11701) с использованием универсальной испытательной машины Zwick/Roell. Промышленные эксперименты выполнены на непрерывном 4-клетевом стане холодной прокатки 2100, агрегате поперечной резки с роликовыми правильными машинами, а также на линии горячего

цинкования в условиях действующего металлургического производства ПАО «Северсталь». Сбор и обработка промышленных данных осуществлялись с использованием систем автоматизированного сбора технологической информации (АСУ ТП стана горячей прокатки 2000, стана холодной прокатки 2100, агрегата поперечной резки), а также данных профилометрии и роликов для измерения отклонений от плоскостности (стресс-роликов).

Положения, выносимые на защиту.

1. Закономерности возникновения дефекта «диагональная волна» при холодной прокатке, обусловленного рассогласованным динамическим взаимодействием систем осевой сдвижки CVC и гидроизгиба WRB, и принцип его предотвращения на основе пространственно-временной синхронизации воздействий.

2. Критерий технологической наследственности горячекатаного подката – интегральный показатель качества X для IF-сталей, и установленные количественные соотношения, связывающие его с асимметрией поперечного профиля (клиновидность кромок, смещение вершины) и температурными режимами конца прокатки и смотки.

3. Принцип прогнозной компенсации технологической наследственности подката при холодной прокатке IF-сталей – иерархическое распределение корректирующих воздействий CVC и WRB по клетям стана, и установленные количественные соотношения, связывающие показатель X с рациональными уставками осевого смещения валков в предпоследней и последней клетях и усилием гидроизгиба в последней клетке.

4. Линейная зависимость кривизны изгиба холоднокатаной полосы от ее толщины и входного перекрытия роликовой правильной машины для диапазона толщин 1,2–3,0 мм, позволяющая на основе прогнозируемого предела текучести, определяемого по данным химического состава и технологической истории всех предшествующих переделов, обосновать рациональный уровень пластической деформации (70%), обеспечивающий

устранение дефектов плоскостности для каждого рулона.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность результатов диссертационного исследования обеспечена применением математического описания, базирующегося на известных положениях теории обработки металлов давлением, статистической обработке больших массивов промышленных данных (более 15 000 рулонов), подтверждается комплексом исследований и экспериментов на действующем непрерывном 4-клетевом стане холодной прокатки 2100, агрегате поперечной резки с роликовыми правильными машинами, а также обеспечивается соответствием результатов теоретических исследований промышленным экспериментам.

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских научно-технических конференциях: «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки. Технология – оборудование – инструмент – качество» (г. Минск, Республика Беларусь, 2025 г., 2026 г.), «Современное перспективное развитие науки, техники и технологий» (г. Воронеж, 2025 г.), «Перспективы развития, совершенствования и автоматизации высокотехнологичных производств» (г. Иркутск, 2026 г.), «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2026 г.).

Личный вклад автора.

Научные положения и результаты работы, выносимые на защиту, получены автором самостоятельно. Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, обоснованном выборе методов решения технологических проблем, проведении всех экспериментальных исследований, анализе и обобщении результатов, а также в обосновании всех положений, выносимых на защиту. Апробация и внедрение в производство предложенных новых технологических решений осуществлялись при

непосредственном участии автора.

Публикации.

Материалы диссертации представлены в 14 публикациях, в том числе 7 статей опубликовано в журналах, рекомендованных ВАК, получено 2 патента на изобретения Российской Федерации.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Текст диссертации изложен на 157 страницах машинописного текста, иллюстрирован 37 рисунками, содержит 15 таблиц и 2 приложения. Библиографический список включает 124 наименования.

Глава 1. Современное состояние, проблемы и перспективные методы обеспечения плоскостности холоднокатаных полос

1.1 Плоскостность как критерий качества

Плоскостность холоднокатаных полос является важным аспектом их качества при производстве на непрерывных станах. Плоскостность характеризует отсутствие пространственных искажений геометрической формы, проявляющихся в виде краевой волнистости (рисунок 1.1, *а*), центральной коробоватости (рисунок 1.2, *б*) или их комбинаций.

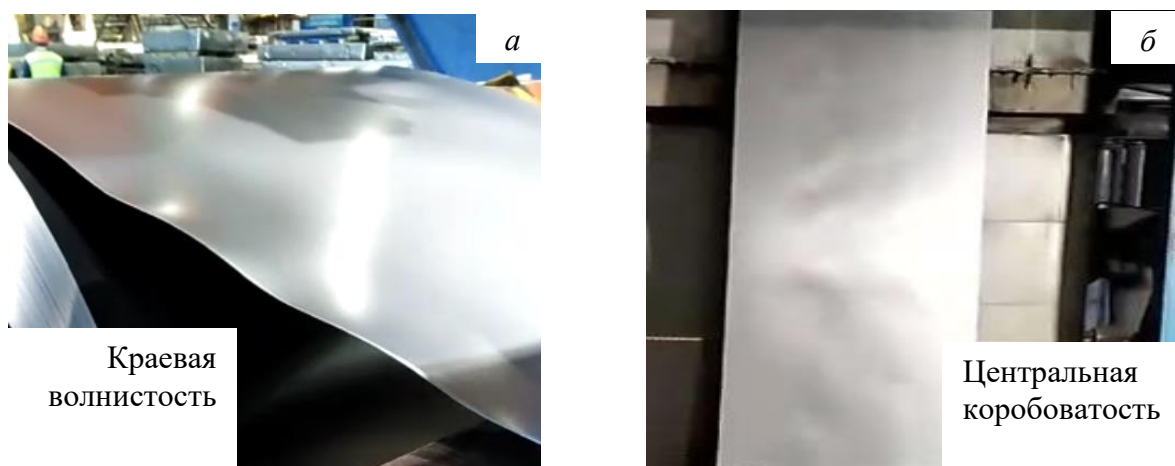


Рисунок 1.1 – Примеры видов неплоскостности холоднокатаных полос

Для количественной оценки этих искажений ГОСТ 26877 устанавливает методику, схематично представленную на рисунке 1.2. Согласно стандарту, отклонение от плоскостности Δ определяется как разность между максимальной высотой волны H и номинальной толщиной полосы h .

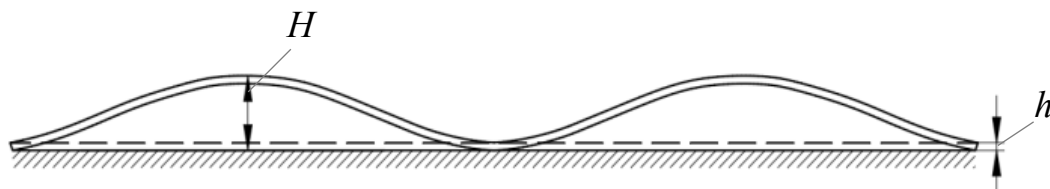


Рисунок 1.2 – Измерение отклонения от плоскостности:

$$\Delta = H - h \text{ (} H \text{ – высота волны, } h \text{ – толщина полосы)}$$

Однако в международной практике, помимо прямого измерения высоты волны, регламентированного ГОСТ, широко применяются другие способы количественной оценки плоскостности. Например, уклон или показатель крутизны краевой волны S , определяемый как отношение высоты волны H к базовой длине L , на которой эта высота измерена (рисунок 1.3, а):

$$S = \frac{H}{L} \cdot 100\%. \quad (1.1)$$

Также используется единица плоскостности I (I -Unit) – безразмерная величина, являющаяся основной для работы многих систем автоматического регулирования плоскостности. Ее физический смысл – относительная разность удлинений $(\Delta L/L) \cdot 10^5$ между наиболее длинным и наиболее коротким волокнами на контролируемом участке полосы. Практически это соответствует отношению разности длин мысленно выделенных продольных полосок ΔL к длине самой короткой из них $L_{\min}$, умноженному на 10^5 для удобства вычислений (рисунок 1.3):

$$I = \frac{\Delta L}{L_{\min}} \cdot 10^5. \quad (1.2)$$

Для теоретического анализа, связывающего показания систем автоматического регулирования плоскостности в I -Units с наблюдаемой геометрией искажения, используется модель синусоидальной волны.

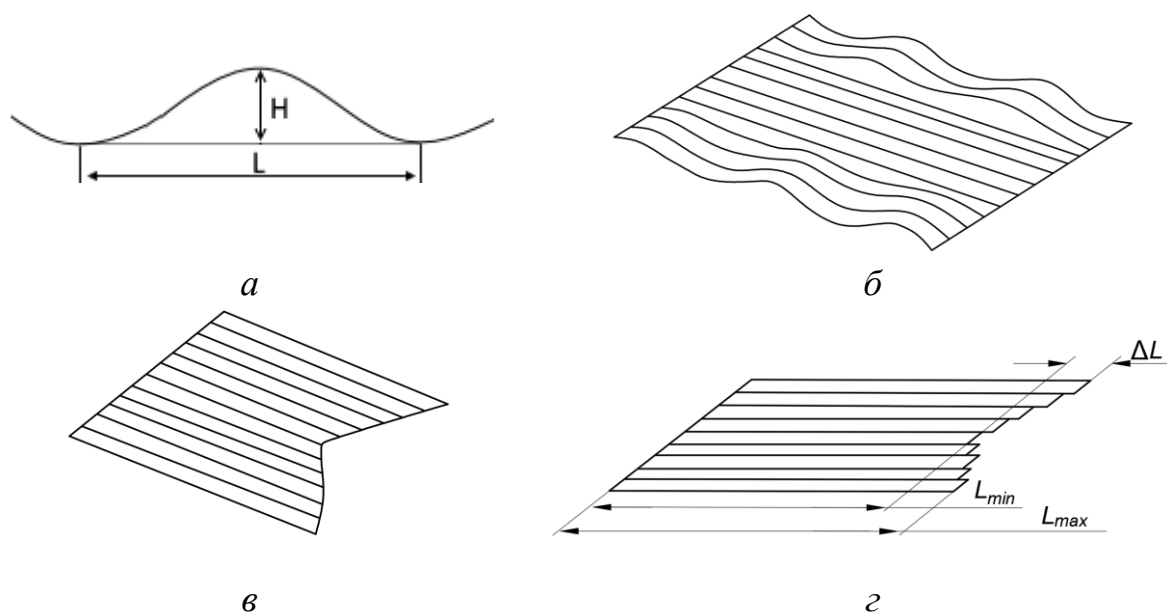


Рисунок 1.3 – Определение параметров неплоскостности полосы с волной по краю: *a* – схема к определению параметров волны; *б* – фрагмент полосы; *в* – полоски, полученные в результате продольных разрезов фрагмента полосы; *г* – схема к определению длины полосок

Если представить форму искривленной кромки полосы по синусоидальному закону (рисунок 1.4) [1]:

$$y = a \sin \frac{2\pi}{\lambda} x,$$

где a – амплитуда полуволны; λ – длина волны, то длина дуги волнистой кромки $\lambda + \Delta L$ выражается через интеграл:

$$\lambda + \Delta L = \int_0^{\lambda} \sqrt{1 + (y')^2} dx.$$

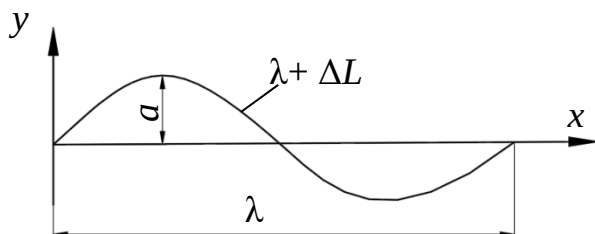


Рисунок 1.4 – Форма волнистости в виде синусоиды:

a – амплитуда синусоиды; λ – длина волны

В результате интегрирования для синусоидального профиля получается зависимость:

$$\lambda + \Delta L = \lambda \left[\left(\frac{a\pi}{\lambda} \right)^2 + 1 \right].$$

Тогда относительная разность длин между удлинённой кромкой $\lambda + \Delta L$ и серединой полосы, имеющей длину λ , составит:

$$\frac{\Delta L}{\lambda} = \left(\frac{A\pi}{2\lambda} \right)^2, \quad (1.3)$$

здесь $A = 2a$ – полная амплитуда волны (высота искажения).

В случае, когда длина волны искажения равна L , а полная амплитуда (высота волны) равна H , то значение I -Unit может быть аппроксимировано формулой

$$I = \left[\frac{\pi H}{2 L} \right]^2 \cdot 10^5. \quad (1.4)$$

Представленный анализ показывает, что единица формы, выраженная через $\Delta L/L$, является универсальной количественной мерой оценки искажения плоскостности. Более того, из закона постоянства объема металла при прокатке следует прямая связь этого параметра с неравномерностью обжатий по ширине полосы, связывая наблюдаемое геометрическое искажение (волнистость или коробоватость) с технологической причиной – неоднородным распределением вытяжки в очаге деформации, что является основой для управления процессом прокатки и обеспечения высокого качества плоского проката.

Конкретные требования к плоскостности готовой продукции устанавливаются в виде допусков, которые регламентируются национальными и международными стандартами и могут быть выражены в различных единицах измерения (мм, I -Unit). В таблице 1.1 приведены требования стандартов различных стран к предельным отклонениям от плоскостности холоднокатаных листов на 1 м длины. Отечественные

стандарты устанавливают высокие требования по плоскостности. Так, ГОСТ 19904 регламентирует особо высокую плоскостность 6 мм для холоднокатаных листов шириной свыше 1500 мм.

Таблица 1.1 – Допуски на неплоскостность холоднокатаных листов по стандартам ряда стран (все размеры в мм)

Страна	Стандарт	Виды плоскостности	Отклонения от плоскостности, при ширине листа		
			до 1000 (вкл)	свыше 1000 до 1500	свыше 1500
Россия	ГОСТ 19904-90	Особо высокая	4	5	6
		Высокая	8	8	10
		Улучшенная	10	12	15
		Нормальная	12	15	18
США	ASTM -568-92 (при толщине листов до 1,0мм)	Предел текучести менее 310 МПа	10 (при ширине до 900)	15 (ширина 900-1500)	20
		Предел текучести 310-345 МПа	20	30	40
Германия	DIN 1623.1-83 (при толщине листов до 0,7мм)	Нормальная	12 (при ширине до 1200)	15 (ширина 1200-1500)	19
		Высокая	5	6	8
Япония	JISG 3141-90	Волна по кромке	8	9 (ширина 1000-1250)	11 (ширина 1250-1600)
		Центральная коробоватость	6	8	8

Для перехода между различными системами измерений важно понимать соотношение единиц измерения I-Unit и величины неплоскостности (таблица 1.2). Уровень качества полосы и, соответственно, жесткость допусков определяются требованиями технологий дальнейшей обработки. Например, для операций штамповки и профилирования может

требоваться плоскостность не хуже 5 *I*-Unit, тогда как для точных процессов, таких как лазерная резка, допустимый уровень неплоскостности существенно ниже – не более 2 *I*-Unit.

Таблица 1.2 – Единицы измерения *I*-Unit при разной высоте и длине волны

Высота волны H , мм	Длина волны L , мм									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1,5	56	14	6	3	2	2	1	1	1	1
2	99	25	11	6	4	3	2	2	1	1
2,5	154	39	17	10	6	4	3	2	2	2
3	222	56	25	14	9	6	5	3	3	2
5	617	154	69	39	25	17	13	10	8	6
8	1579	395	175	99	63	44	32	25	19	16
10	2467	617	274	154	99	69	50	39	30	25
15	5552	1388	617	347	222	154	115	87	69	56
20	9870	2467	1097	617	395	274	201	154	122	99
25	15421	3855	1713	964	617	428	315	241	190	154

Несмотря на уже достигнутый высокий уровень стандартов, требования к плоскостности листового проката продолжают неуклонно ужесточаться, вплоть до целевых значений порядка 2 мм на 1 м и ниже для премиальных сегментов. Эта тенденция напрямую обусловлена масштабным внедрением высокоавтоматизированных поточных линий в ключевых отраслях-потребителях металлопроката, таких как автомобилестроение, машиностроение, производство строительных материалов и трубное производство. Дополнительным фактором, усложняющим достижение

требуемых параметров плоскостности, является рост доли высокопрочных (DP, TRIP, CP) и высокопластичных сталей в номенклатуре производимого проката, особенно холоднокатаного. Такие стали предъявляют особые требования к технологиям прокатки, правки и контроля остаточных напряжений. Поэтому постоянное совершенствование плоскостности, с учетом специфики современных материалов и процессов переработки, остается ключевой технологической задачей и важнейшим требованием к конкурентоспособности для производителей проката.

1.2 Физико-математические основы формирования плоскостности

В работах Ю.Д. Железнова, Л.А. Кузнецова, Г.Г. Рокотяна, В.П. Настича, А.И. Божкова, Р.Л. Шаталова, С.М. Бельского и других исследователей установлено, что плоскостность полосы после прокатки определяется сложным взаимодействием упругих и пластических деформаций, а также остаточных напряжений [2–5]. При рассмотрении физической модели, иллюстрирующей эту зависимость, принимается, что к полосе в момент времени t приложено равномерное растягивающее напряжение $\sigma(t)$, например, межклетевое или выходное натяжение. Полное напряжение складывается в произвольной точке x по ширине полосы из этого приложенного напряжения $\sigma(t)$ и остаточного напряжения $\sigma_r(x)$, возникшего в процессе пластической деформации:

$$\sigma_{total}(x, t) = \sigma(t) + \sigma_r(x). \quad (1.5)$$

За счет высокого равномерного растяжения, составляющего по рекомендациям работ [6, 7] в среднем 18–22% от условного предела текучести полосы на выходе из i -й клетки, подавляется проявление неоднородностей формы полосы от остаточного напряжения $\sigma_r(x)$, и полоса удерживается в плоском, распрямленном состоянии. При этом в каждой точке полосы упругая деформация подчиняется закону Гука:

$$\varepsilon_{el}(x, t) = \sigma_{total}(x, t) / E = (\sigma(t) + \sigma_r(x)) / E, \quad (1.6)$$

где ε_{el} – относительная упругая деформация, E – модуль продольной упругости материала полосы. Эта упругая деформация будет однородной по ширине только, если остаточные напряжения равномерны, $\sigma_r(x) = const$. Если же распределение $\sigma_r(x)$ неоднородно, то и $\varepsilon_{el}(x, t)$ будет неоднородным. Однако, благодаря внешнему натяжению $\sigma(t)$, полоса все равно сохраняет плоскую форму.

При снятии внешнего натяжения, $\sigma(t) = 0$, согласно принципу суперпозиции (1.5) полное напряжение в каждой точке становится равным только остаточному напряжению:

$$\sigma_{total}(x, t) = \sigma_r(x). \quad (1.7)$$

Теперь полоса стремится достичь нового механического равновесия исключительно за счет перераспределения внутренних остаточных напряжений $\sigma_r(x)$.

Поскольку остаточные напряжения возникают как прямое следствие неоднородности пластической деформации $\varepsilon_{pl}(x)$ по ширине полосы, то, если пренебречь поперечными деформациями, эту связь можно выразить соотношением:

$$\sigma_r(x) = -E \cdot (\varepsilon_{pl}(x) - \varepsilon_{plcp}), \quad (1.8)$$

где ε_{plcp} – средняя пластическая деформация по ширине полосы. Уравнение (1.8) показывает, что области, где пластическая деформация выше средней ($\varepsilon_{pl}(x) > \varepsilon_{plcp}$) будут иметь сжимающие остаточные напряжения $\sigma_r(x) < 0$, и, наоборот, области, где пластическая деформация ниже средней ($\varepsilon_{pl}(x) < \varepsilon_{plcp}$), будут иметь растягивающие остаточные напряжения $\sigma_r(x) > 0$.

Для анализа условий коробления полосы следует рассмотреть поперечное сечение полосы шириной b после снятия натяжения. Поскольку остаточные напряжения самоуравновешены, то должны выполняться два условия:

1) Равенство нулю равнодействующей силы ($\Sigma F = 0$):

$$\int (\sigma_r(x) \cdot h) dx = 0, \quad (1.9)$$

где h – постоянная толщина полосы. Интеграл от напряжений по ширине сечения должен быть равен нулю, что эквивалентно равенству положительных (растягивающих) и отрицательных (сжимающих) вкладов в результирующую силу.

2) Равенство нулю изгибающего момента ($\Sigma M = 0$):

$$\int (\sigma_r(x) \cdot h \cdot y(x)) dx = 0, \quad (1.10)$$

где $y(x)$ – расстояние от элементарной силы $dF = \sigma_r(x) \cdot h \cdot dx$ до нейтральной оси изогнутой полосы.

Неоднородность остаточных напряжений ($d\sigma_r(x)/dx \neq 0$) приводит к тому, что элементарные силы dF создают результирующий момент. Полоса изгибается до тех пор, пока не найдется новая нейтральная ось, удовлетворяющая условию (1.10). Направление и величина коробления определяются распределением $\sigma_r(x)$: при симметричном $\sigma_r(x)$ коробление отсутствует, а при асимметрии (например, больше растяжения у одного края) полоса искривляется в сторону преобладающих сжимающих напряжений.

Из изложенного следует, что главная цель системы управления плоскостностью на непрерывном стане – обеспечить равномерное распределение пластической деформации $\varepsilon_{pl}(x)$ по ширине полосы в процессе прокатки:

$$\varepsilon_{pl}(x) \approx \varepsilon_{plcp} = const. \quad (1.11)$$

При выполнении условия (1.11) из уравнения (1.8) следует, что остаточные напряжения $\sigma_r(x) \approx 0$. Согласно (1.7), после снятия натяжения, $\sigma_{total}(x, t) \approx 0$, условия самоуравновешенности (1.9) и (1.10) выполняются автоматически и отсутствуют изгибающие моменты, способные вызвать деформацию полосы. Следовательно, полоса сохраняет плоскую форму после прокатки.

Несмотря на понимание физических принципов, проблема обеспечения плоскостности холоднокатаных полос остается не до конца решенной в технологической практике. Это обусловлено комплексным влиянием множества факторов в условиях непрерывного высокоскоростного стана. Данная ситуация определяет необходимость преодоления разрыва между теоретическими знаниями и производственной реализацией для совершенствования процесса.

1.3 Принципы контроля и регулирования плоскостности на непрерывном стане

Управление плоскостностью на современном стане холодной прокатки является исключительно сложной, многокомпонентной задачей, требующей комплексной стратегии, интегрирующей передовое оборудование, точные системы измерения, мощные алгоритмы управления и экспертизу персонала. Сложность этой задачи подчеркивается основными проблемами: высокими скоростями прокатки, широким диапазоном продукции, многофакторным взаимовлиянием параметров и динамикой процесса с быстрыми переходными процессами, связанными с разгоном и замедлением стана, сменой рулонов, изменением режимов. При этом неотъемлемой составляющей холодной прокатки являются высокие силы натяжения полосы [2–17]: с одной стороны они обеспечивают снижение усилий деформации, повышение точности по толщине и увеличение скоростей, с другой – они одновременно являются главным «активатором» дефектов плоскостности (волн, коробления) после размотки рулона. Причина этого кроется в физической сути плоскостности, которая определяется равномерностью распределения пластических деформаций и остаточных напряжений по ширине полосы, что делает ее крайне уязвимой к любым локальным воздействиям в условиях растяжения.

Реализация принципов контроля и регулирования плоскостности холоднокатаных полос на непрерывном стане рассматривается на примере 4-клетевого промышленного стана 2100 ПАО «Северсталь» [18]. При прокатке на современном непрерывном стане достижение равномерной пластической деформации по ширине полосы обеспечивается комплексным применением управляемых механизмов в каждой прокатной клетки в рамках замкнутой системы автоматического регулирования плоскостности (рисунок 1.5).

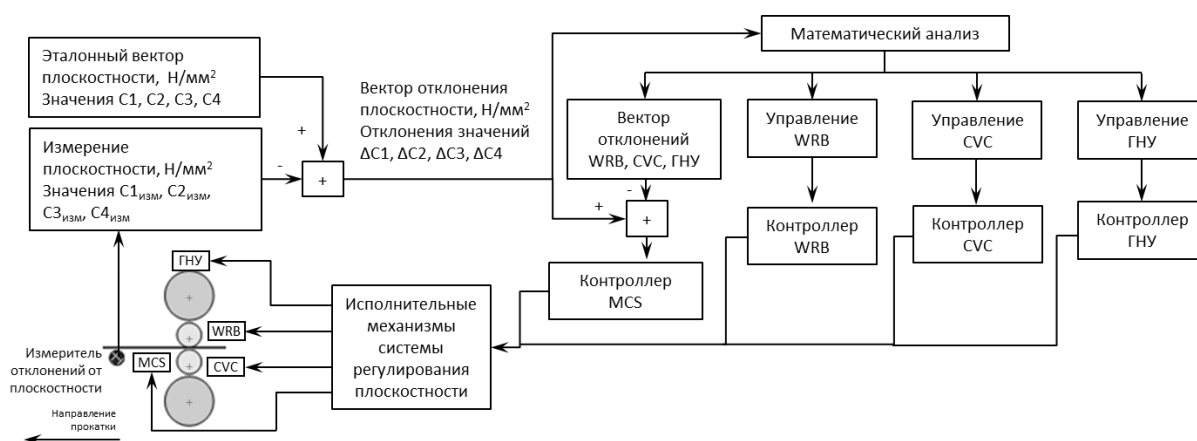


Рисунок 1.5 – Система автоматического регулирования плоскостности при холодной прокатке в клетки кварто

К таким управляемым механизмам относятся: гидравлические нажимные устройства (ГНУ) для регулирования положения валков, осевая сдвигка валков CVC (Continuously Variable Crown) для макрокоррекции профиля, гидроизгиб рабочих валков WRB (Work Roll Bending) для локальной механической коррекции профиля и MCS (Multi-Zone Cooling System) для локального теплового регулирования на основе системы многозонного охлаждения рабочих валков.

Несмотря на развитие бесконтактных оптико-электронных и тепловизионных методов измерения плоскостности [19–21], основой управления плоскостностью при холодной прокатке остается прямое измерение распределения напряжений по ширине полосы с помощью

контактного многосекционного ролика (стресс-ролика), установленного после клетки. Система регулирования направлена на выравнивание именно этих измеряемых усилий по секциям ролика.

Стресс-ролик измеряет распределение контактных усилий F_{Ri} (рисунок 1.6), действующих перпендикулярно поверхности ролика со стороны прокатываемой полосы. Эти усилия являются прямым следствием продольных напряжений σ_{Zi} , возникающих в полосе. Измеренная контактная сила F_{Ri} на i -той секции ролика связана с продольным усилием F_{Zi} в соответствующем поперечном сечении тригонометрической зависимостью, учитывающей угол охвата полосой ролика α [8, 22, 23]:

$$F_{Zi} = F_{Ri} / (2 \cdot \sin(\alpha/2)). \quad (1.12)$$

Эта формула пересчитывает радиальную составляющую силы в тангенциальную (продольную) составляющую усилия в полосе. Продольное напряжение σ_{Zi} в материале полосы в пределах i -той измерительной зоны определяется из продольного усилия F_{Zi} с учетом толщины полосы h и b_i – ширины i -той измерительной зоны (секции ролика):

$$\sigma_{Zi} = F_{Zi} / (h \cdot b_i). \quad (1.13)$$

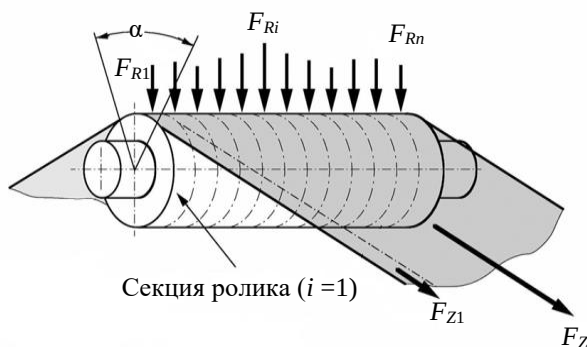


Рисунок 1.6 – Схема измерения усилий в полосе на стресс-ролике

Агрегируя рассчитанные значения σ_{Zi} по всем n измерительным зонам ролика, система формирует детальный профиль распределения продольных напряжений по ширине полосы. Именно этот профиль является первичной

информацией для системы автоматического регулирования плоскостности, задача которой – минимизировать его неравномерность.

Пример конфигурации измерительных секций стресс-ролика представлен на рисунке 1.7.

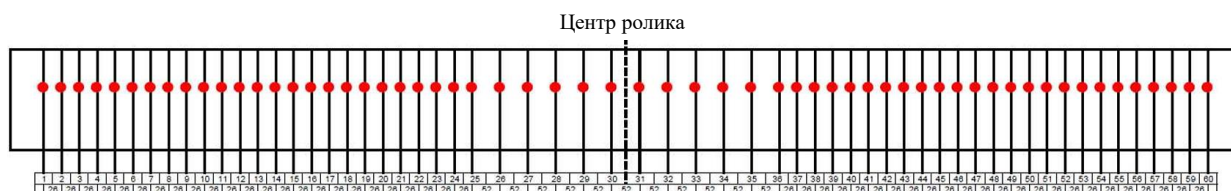


Рисунок 1.7 – Схема измерительных секций стресс-ролика

Ролик разделен на 60 независимых измерительных секций. Точки на схеме обозначают центры измерительных зон. Каждая точка соответствует физическому центру датчика силы в данной секции. Ширина измерительных зон уменьшается, а плотность датчиков, соответственно, увеличивается, по мере удаления от центра ролика. Уменьшение ширины измерительной зоны b_i вблизи кромок полос обеспечивает высокое детектирование резких перепадов напряжений, вызывающих дефекты плоскостности.

Полоса, огибающая ролик для измерения отклонений от плоскостности, генерирует нагрузку на его поверхность. Неплоскостность полосы вызывает неравномерное давление (Н/мм^2) на поверхность ролика. Встроенные датчики внутри ролика преобразуют это давление в электрические сигналы. Сигнал каждой i -ой секции пропорционален приложенной силе F_{Ri} . Однако сами по себе радиальные силы не позволяют определить степень неплоскостности в I -Unit. Для этого сигнал обрабатывается специальным программным обеспечением, которое преобразует значения давления (Н/мм^2) в I -Unit с использованием калибровочных кривых и расчетных формул. В расчетах учитывается фактическое натяжение полосы, ее ширина и толщина. На основе этих

данных вычисляется разность длин волокон полосы по ее ширине, что и характеризует неплоскостность.

На рисунке 1.8, *а* представлены измерения со стресс-ролика в *I*-Unit. Также современная система управления плоскостностью интегрирует динамическое картографирование измеренных напряжений по длине и ширине прокатываемой полосы (рисунок 1.8, *б*). На основе непрерывного потока данных со стресс-ролика и датчика длины полосы система строит двумерную цветовую карту (карту плоскостности). По оси *X* откладывается ширина полосы, по оси *Y* – длина участка полосы. Карта обновляется в режиме реального времени синхронно с движением полосы, формируя «развертку» по всей длине. На рисунке 1.8, *б* цвет каждого пикселя кодирует величину относительного удлинения полосы: нейтральные цвета (зеленый) соответствует номинальной деформации, холодные цвета (синий) – сжатию в продольном направлении, теплые цвета (красный) – растяжению.

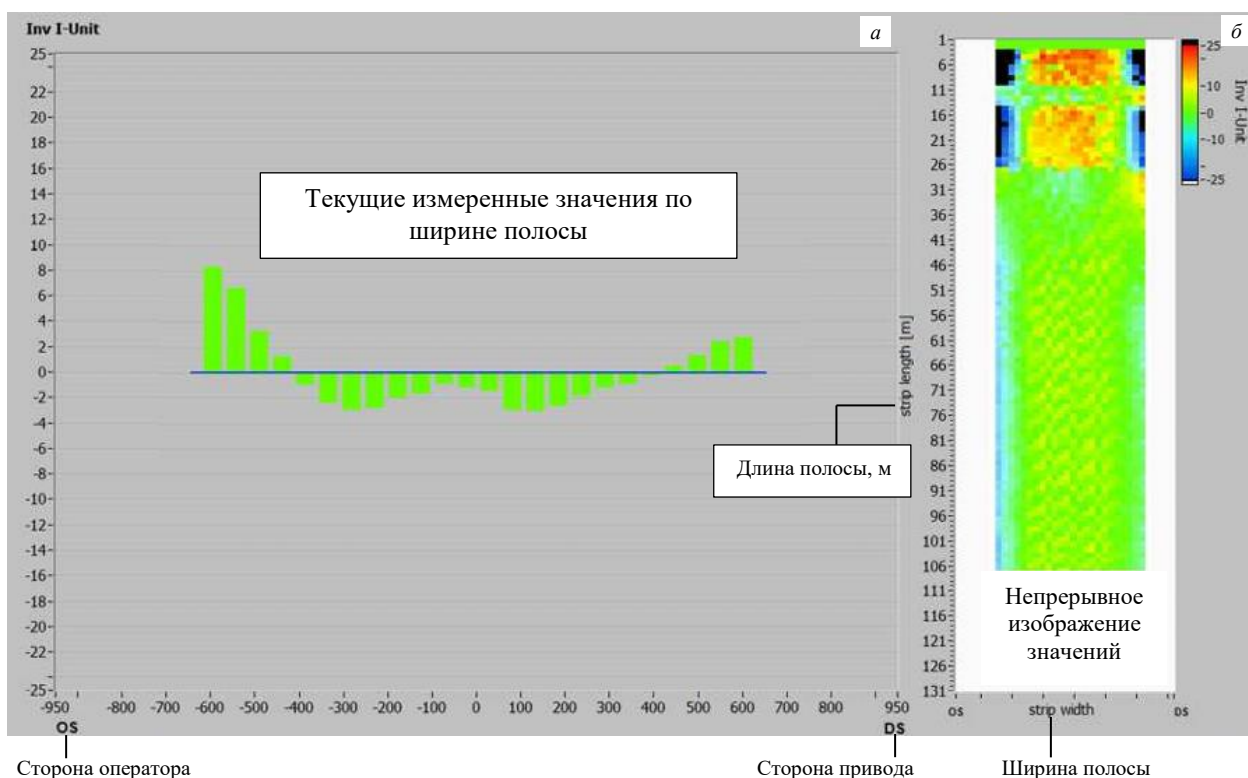


Рисунок 1.8 – Визуальное отображение профиля плоскостности

Такое визуальное отображение позволяет осуществлять оперативный мониторинг при прокатке, выполнять оценку эффективности работы контуров регулирования и диагностику процессов на основе корреляции дефектов с событиями прокатки: изменение скорости, срабатываниями автоматического регулирования, а также анализировать моменты активного вмешательства системы управления для коррекции дефектов плоскостности.

Неравномерность продольных напряжений σ_z в произвольной точке x по ширине полосы $\sigma_z(x)$ обусловлена неравномерностью пластической деформации $\varepsilon_{pl}(x)$. Для математического анализа пространственных искажений профиля продольных напряжений вводятся нормированные координаты. Физические координаты центров секций x_i (в мм) линейно преобразуются в нормированную координату $x_i' \in [-1, 1]$:

$$x_i' = (2 \cdot x_i) / b_{\text{ролика}}, \quad (1.14)$$

где $b_{\text{ролика}}$ – полная ширина измерительной зоны ролика, $x_i' = -1$ соответствует левому краю, $x_i' = 0$ – центру, $x_i' = +1$ – правому краю.

Профиль напряжений по всей ширине $x_i' \in [-1, 1]$ может быть аппроксимирован полиномом методом наименьших квадратов:

$$\sigma_z(x_i') = a_0 + a_1 x_i' + a_2 (x_i')^2 + \dots + a_m (x_i')^m. \quad (1.15)$$

В этом случае полиномиальные коэффициенты физически не интерпретируемы и не ортогональны. Их значения сильно зависят друг от друга и от степени m .

Гармоническое разложение аппроксимирующего полинома в ряд по ортогональным полиномам Лежандра $P_k(x_i')$ [24] позволяет описать пространственные искажения профиля продольных напряжений:

$$\sigma_z(x_i') = \sum_{k=0}^m C_k \cdot P_k(x_i'), \quad (1.16)$$

где каждая гармоника $C_k \cdot P_k(x_i')$ соответствует определенной форме искажения, а коэффициент C_k количественно характеризует ее амплитуду. Все физически значимые дефекты могут быть описаны до $k = 4$, высшие

гармоники уже реагируют на погрешности датчиков, а не на реальные деформации.

Коэффициенты C_k вычисляются как проекции аппроксимированной функции $\sigma_z(x_i')$ на базисные полиномы $P_k(x_i')$:

$$C_k = \frac{2k+1}{2} \int_{-1}^1 \sigma_z(x_i') P_k(x_i') dx_i'. \quad (1.17)$$

Каждая гармоника $C_k \cdot P_k(x_i')$ соответствует типу технологического искажения профиля напряжений, нарушающего условие (1.11):

$C_1 \neq 0$ – линейный градиент деформации по ширине (клин). Приводит к асимметричному обжатию кромок с риском односторонней волны на стороне с большим обжатием;

$C_2 > 0$ – повышенная деформация в центре, в сравнении с деформацией кромок, что вызывает коробоватость центра полосы;

$C_2 < 0$ – повышенная деформация в зоне кромок, что приводит к волнистости кромок;

$C_3, C_4 \neq 0$ – локальные зоны неоднородной деформации. Образуются зоны неоднородного обжатия, что приводит к комбинированным дефектам.

Система автоматического регулирования плоскостности (рисунок 1.5) компенсирует отклонения гармоник $\Delta C_1, \Delta C_2, \Delta C_3, \Delta C_4$ через исполнительные механизмы, обеспечивая выполнение условия (1.11). Хотя эти искажения возникают одновременно в процессе прокатки, система осуществляет их отдельную коррекцию. Первая гармоника C_1 , характеризующая линейный градиент деформации по ширине полосы, эффективно устраняется путем минимизации отклонения ΔC_1 на основе регулировки усилия прокатки через гидронажимное устройство (ГНУ), изменяя распределение давления по ширине клетки и выравнивая асимметрию толщины. При этом отклонение второй гармоники ΔC_2 компенсируется комплексным воздействием: ГНУ обеспечивает базовое управление общим усилием деформации, в то время как системы CVC и WRB позволяют точно

настроить геометрию контакта валков. CVC изменяет эффективный профиль за счет осевого смещения S-образных валков, а WRB обеспечивает дополнительную подстройку через изгиб рабочих валков.

Для компенсации отклонений высших гармоник ΔC_3 и ΔC_4 , связанных с локальными неоднородностями деформации, система применяет комбинированное воздействие. Механические методы CVC и WRB целенаправленно воздействуют на проблемные зоны с дополнительным точным температурным контролем через многозонную систему охлаждения MCS, которая локально регулирует тепловое расширение валков. Такая комбинация механического и теплового воздействий обеспечивает эффективную коррекцию сложных локальных деформационных отклонений.

Важно отметить, что все эти механизмы работают в строгой взаимосвязи: сначала грубые регулировки ГНУ, затем прецизионные механические CVC, WRB и на завершающем этапе – тепловые MCS. Такой каскадный принцип управления позволяет минимизировать взаимное влияние систем друг на друга и достигать высокой точности коррекции профиля при сохранении стабильности процесса прокатки.

Современные непрерывные станы холодной прокатки, несмотря на оснащение комплексными системами управления плоскостностью, сталкиваются со значительными технологическими сложностями при обработке различных классов сталей (таких как IF, DP, TRIP, CP), а также тонких и особо широких полос. Указанные материалы демонстрируют повышенную чувствительность к колебаниям технологических параметров, включая натяжение и условия смазки. Особую проблему представляет нелинейный характер их деформационных характеристик, что существенно осложняет процесс прогнозирования и компенсации возникающих дефектов.

Кроме того, высокопластичные и высокопрочные стали могут формировать нелинейные и существенно изменяющиеся во времени профили натяжения по ширине полосы. В таких условиях традиционные алгоритмы

управления, разработанные для стандартных марок стали, оказываются неадекватными и не обеспечивают требуемого уровня плоскостности готовой продукции. Помимо этого, дополнительные трудности регулирования связаны с переходными процессами работы стана, такими как разгон и замедление оборудования, а также сменой рулонов. Эти процессы создают значительные возмущения, с которыми существующие системы регулирования не всегда справляются эффективно.

В современных производственных условиях принципиально важным становится не просто фиксация факта возникновения дефекта формы, а точное установление его причинно-следственной связи с конкретными технологическими событиями. Жесткие требования к качеству продукции обуславливают необходимость проведения комплексного анализа каждого дефекта, включая исследование его корреляции с параметрами прокатки и оценку своевременности, адекватности и полноты вмешательств системы управления плоскостностью.

Таким образом, несмотря на развитый арсенал средств управления (ГНУ, CVC, WRB, MCS) и сложные алгоритмы обработки данных, современные системы регулирования плоскостности на непрерывных станах холодной прокатки эффективно компенсируют отклонения, но не способны гарантированно предотвратить возникновение дефектов, особенно при прокатке высокопластичных (IF) и высокопрочных (DP, TRIP, CP) сталей, характеризующихся нелинейной реакцией на воздействие. Для преодоления этих ограничений требуется разработка способов прогнозной настройки станов и цифровой аттестации с оценкой плоскостности в реальном времени.

1.4 Анализ существующих методов управления плоскостностью при холодной прокатке

Для обеспечения плоскостности холоднокатаных полос необходимо

целенаправленно воздействовать на процесс прокатки с целью компенсации исходной разнотолщинности подката и неравномерности деформации по ширине полосы. В практике для этого применяются регулирующие воздействия, которые по механизму компенсации искажений можно разделить на три основные группы [25–28]:

- 1) воздействие на геометрию очага деформации путем изменения формы рабочей поверхности валков;
- 2) управление продольными напряжениями;
- 3) воздействия на кинематику процесса прокатки, включающие асимметричную прокатку, регулирование скоростных режимов и других параметров, косвенно влияющих на распределение обжатия по ширине полосы.

На современных непрерывных станах холодной прокатки, оснащенных системами осевой сдвижки валков CVC, основными и наиболее эффективными инструментами являются первые две группы методов. Третий подход, как правило, имеет ограниченное применение в силу технологических сложностей или используется в качестве вспомогательного.

Эффективность этих методов напрямую зависит от исходных условий, в частности, от геометрии подката. Однако актуальной производственной задачей, остающейся нерешенной, является определение начальных уставок регулирующих механизмов осевой сдвижки CVC и гидроизгиба рабочих валков WRB, гарантирующих требуемое качество полосы. Анализ современных исследований показывает, что эта задача не получила комплексного решения. Значительная часть работ, включая исследования Э.А. Гарбера, Г.Г. Григоряна, Ю.Д. Железнова, А.В. Третьякова, А.А. Будаковы, Ю.В. Коновалова, В.А. Николаева, П.В. Антонова, Н.Л. Болобановой, В.М. Салганика, П.П. Полецкова, С.М. Бельского, И.П. Мазура и других, посвящена теоретическим основам расчета профилировок [6, 7, 29–36] и моделированию формоизменения стального проката [5, 37]. При этом

практические алгоритмы оперативной настройки оборудования остаются за рамками этих работ. В отдельных работах [33–36] приводятся результаты расчета CVC-профилировок, но без рассмотрения их настройки для управления плоскостностью. Для расчета профиля CVC его часто выражают полиномом третьей степени:

$$R(x) = R_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3, \quad (1.18)$$

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. Полином третьей степени позволяет точно описать радиус с дискретностью 10 мм, однако сам по себе не определяет оптимальных начальных уставок для конкретного рулона.

В ряде исследований решаются вопросы разработки методов определения полиномиальных коэффициентов CVC-профилей [38–40] – для минимизации силы прокатки, оценки усилия осевого перемещения или изменения выпуклости межвалкового зазора. Тем не менее, в имеющихся исследованиях осевой сдвижки CVC и гидроизгиба валков [41–48] не раскрыты в полной мере механизмы совместного регулирования профиля и плоскостности холоднокатаных полос.

Работы [49–58] фокусируются на диагностике профиля горячекатаной полосы через новые параметры (коэффициенты детерминации и седловидности) для описания макродефектов профиля, вводится параметризация профилей через полиномы Чебышева шестого порядка, что представляет научный интерес, но практическая задача управления CVC не решается. Исследование [59] подтверждает важность управления обжатием и профилем для подавления дефектов плоскостности, однако представленные данные не верифицированы инструментальными измерениями. Работа [60]

предлагает модель прогнозирования поперечного профиля холоднокатаных полос, основанную на эффектах сплющивания валков, с учетом влияния входного профиля, профилировки валков и позволяющую оценивать поперечную разнотолщинность и кромочное утонение, но при этом не решается задача оптимизации параметров CVC. В работе [61] установлена количественная взаимосвязь между эпюрой удельных натяжений в холоднокатаной полосе и качеством плоскостности после непрерывного отжига, но при этом не рассмотрены методы формирования требуемой эпюры натяжений на стане холодной прокатки. Ряд работ [62–65] посвящен теоретическим вопросам исследования внешних продольных натяжений при прокатке тонких полос и расчета критических напряжений и показателей плоскостности полосы при тонколистовой прокатке.

В зарубежной технической литературе, несмотря на значительный интерес к исследованию формирования плоскостности полос при холодной прокатке, этот вопрос также остается открытым, хотя авторы [66, 67] активно развивают исследования, применяя методы статистического анализа больших данных для идентификации скрытых и нелинейных зависимостей между параметрами подката, режимами прокатки и конечной плоскостностью. Ряд работ [68–71] посвящен разработке перспективных гибридных моделей, интегрирующих физические принципы прокатки с алгоритмами машинного обучения для решения задач управления формой полосы. Хотя эти подходы перспективны, они не позволяют оперативно решать задачу настройки параметров CVC и WRB непрерывных станов холодной прокатки.

Особую сложность управление плоскостностью приобретает при прокатке высокопластичных IF-сталей, широко применяемых в автомобилестроении для глубокой вытяжки. Эти стали характеризуются низким пределом текучести, высоким относительным удлинением и повышенной чувствительностью к неравномерности деформации по ширине полосы. Даже незначительная асимметрия профиля горячекатаного подката

может приводить к нестабильности плоскостности холоднокатаной полосы, что подтверждается промышленными данными. Традиционные методы настройки CVC и WRB, ориентированные на средние параметры подката, не обеспечивают стабильного результата для IF-сталей, особенно при производстве полос большой ширины (до 1640 мм). Это требует разработки прогнозных подходов, учитывающих индивидуальные геометрические характеристики подката.

Таким образом, в существующих исследованиях отсутствует целостный подход, обеспечивающий прямой переход от измеренных параметров подката к рациональным начальным уставкам систем CVC и WRB. Это приводит к тому, что настройка оборудования часто выполняется по факту возникновения дефектов, либо на основе эмпирических правил, не гарантирующих стабильного результата для высокопластичных или высокопрочных сталей и сложных профилей. Данный пробел определяет необходимость разработки формализованного способа прогнозной настройки параметров CVC и WRB непрерывных станов холодной прокатки.

Кроме того, несмотря на наличие в каждой клети современных средств управления профилем, таких как CVC и WRB, их совместная работа в динамических условиях непрерывного стана сопряжена с нерешенными проблемами. Анализ промышленных данных на 4-клетевом стане 2100 ПАО «Северсталь» показал, что при несогласованном срабатывании этих систем, особенно в переходных режимах (разгон, замедление, смена рулонов), могут возникать сложные дефекты пространственной неустойчивости, в том числе так называемая «диагональная волна» (рисунок 1.9).

Такой дефект характеризуется диагонально ориентированной зоной повышенной вытяжки и не устраняется стандартными алгоритмами коррекции, настроенными на симметричные искажения. Физический механизм его образования при рассогласованном взаимодействии CVC и

WRB остается недостаточно изученным, а технологические правила, исключающие его появление, отсутствуют.

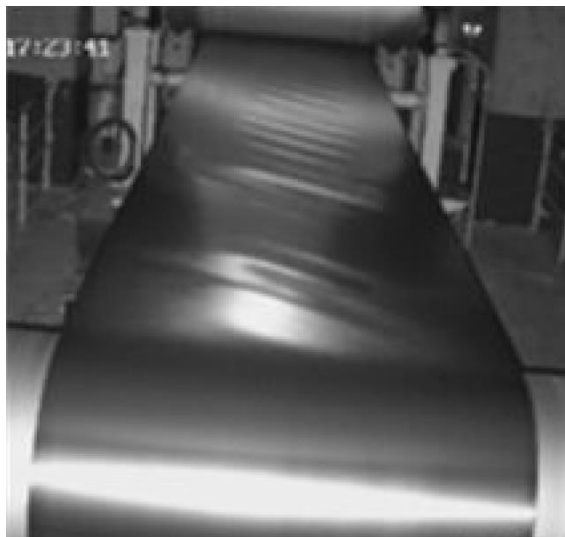


Рисунок 1.9 – Холоднокатаная полоса с дефектом «диагональная волна»

1.5 Проблема обеспечения прецизионной правки холоднокатаных полос

При оптимальных настройках процесса прокатки окончательная плоскостность холоднокатаной полосы формируется и гарантируется на заключительной операции – правке. Правка может реализовываться на роликовой правильной машине (РПМ) или на изгибо-растяжной машине (ИРМ). Именно этот процесс позволяет обеспечивать стабильное минимальное отклонение от плоскостности холоднокатаных полос и пригодность для обработки на автоматических производственных линиях машиностроительных заводов.

Наиболее распространенным способом является правка на роликовых правильных машинах (РПМ), что обусловлено их высокой производительностью и возможностью вариативного расположения – как в линии отделки, так и в виде отдельного агрегата. Эффективность процесса

правки на РПМ зависит от точного соответствия режимов механическим свойствам, прежде всего пределу текучести σ_t , каждого конкретного рулона.

Пример схемы 15-роlikовой машины для правки холоднокатаных полос представлен на рисунке 1.10, где обозначены основные конструктивные параметры: D – диаметр роликов, мм; t – шаг роликов, мм и регулируемый параметр Δ – величина, характеризующая наклон верхней кассеты роликов и обеспечивающая общий изгиб полосы по длине, мм. Величина Δ определяется как разность перемещений по вертикали роликов верхней кассеты № 2 и № 14. Именно рациональное задание величины Δ в значительной степени определяет обеспечение высокой и стабильной точности (прецизионности) правки.

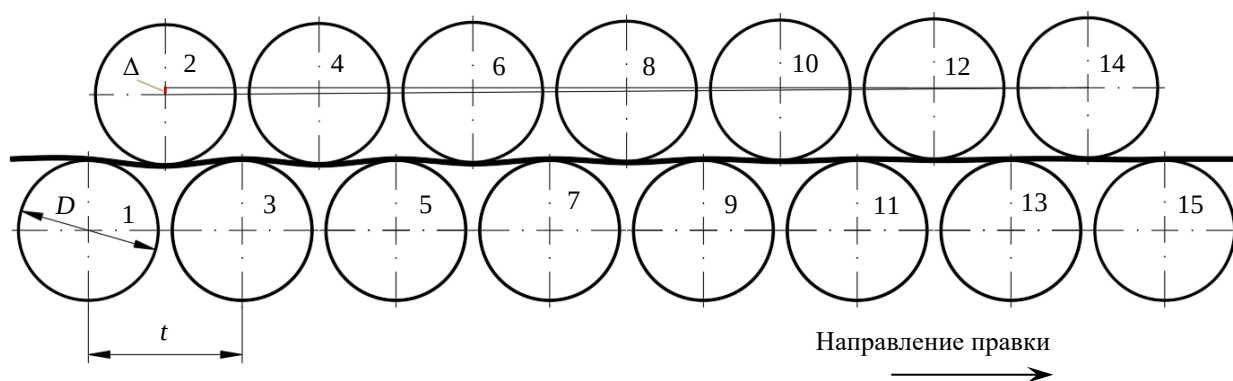


Рисунок 1.10 – Схема 15-роlikовой правильной машины

Однако практика показывает, что достижение такой рациональной настройки сопряжено с проблемами. Эффективность правки напрямую зависит от соответствия режимов реальным механическим свойствам конкретного рулона. В существующей практике настройка часто выполняется на основе усредненных справочных данных для марки стали, что не учитывает технологическую индивидуальность рулона, обусловленную вариациями химического состава, параметров прокатки и режимов отжига. Это приводит к двум основным проблемам:

– недостаточная проработка металла, приводящая к неполному исправлению дефектов, сохранению остаточной волнистости или коробоватости, а также неравномерному распределению остаточных напряжений, что неприемлемо для высокоточных потребителей.

– избыточное воздействие при правке, приводящее к созданию новых внутренних напряжений, риску образования новых дефектов, повышенному износу оборудования и расходу энергии.

Анализ промышленных данных показывает, что при фиксированной настройке, ориентированной на среднюю прочность, фактическая степень пластической деформации может колебаться от 50% до 90%, что выходит за пределы технологически оптимального диапазона.

В связи с этим, вопросам моделирования и оптимизации правки уделяется значительное внимание. Имеется большое число работ, посвященных анализу типов машин [37, 72] и исследованию моделей расчета процесса многократного знакопеременного изгиба на РПМ [73–100]. Существующие теоретические подходы можно условно разделить на несколько групп.

К первой группе относятся отечественные исследования, основанные на гипотезе плоских сечений и предположении одноосного напряженно-деформированного состояния. В рамках этого подхода А.И. Целиковым и В.В. Смирновым [74], А.А. Королевым [73, 75], И.В. Недорезовым [77, 78] разработаны методики расчета деформаций, изгибающих моментов и усилий на ролики; Слонимым А.З. и Сониным Л.А. [76] предложены эмпирические формулы для выбора параметров РПМ (диаметр, шаг, число роликов); А.Е. Шелестом и др. [79, 80] созданы модели, рассматривающие изгиб полосы как балки на опорах; В.Н. Шинкиным [81–86] разработаны математические методы для определения кривизны при правке и остаточной кривизны в зависимости от геометрии машины и свойств металла; Р.Л. Шаталовым и

Е.А. Максимовым [87, 88] разработаны модели, описывающие кинематику очага деформации.

Ко второй группе можно отнести подход, основанный на разделении листа на продольные полосы [89, 90]. Данный метод полезен для анализа геометрии листа с дефектами «короб», «волна», однако он часто не рассматривает распределение внутренних напряжений, что важно для прогноза поведения полосы в дальнейших операциях.

Третью группу составляет численное моделирование методом конечных элементов (МКЭ) [91-100]. Эти работы позволяют исследовать процесс правки с учетом сложных моделей упрочнения материала и эффекта Баушингера, управлять кривизной путем оптимизации позиционирования роликов, а также разрабатывать программные комплексы для автоматизированного расчета режимов. Несмотря на прогресс, даже в рамках МКЭ-моделирования зачастую недостаточно исследуются закономерности распределения внутренних напряжений по ширине полосы в зависимости от технологических параметров, что важно для комплексной оценки остаточной плоскостности.

Практико-ориентированные разработки и промышленные исследования [37, 100] позволили сформулировать ряд важных закономерностей:

- Режим правки с максимальным уровнем пластических деформаций на входе в машину и минимальным – на выходе обеспечивает минимизацию остаточных напряжений и потенциальной энергии деформации, что снижает коробление при последующей резке.

- Конструктивная оптимизация РПМ на основе увеличения числа роликов и уменьшения их диаметра способствует формированию более однородного профиля остаточных напряжений по толщине, повышая эффективность пластической проработки металла по толщине.

– Получены зависимости, связывающие конструктивные и технологические параметры с глубиной проникновения пластической деформации, что позволяет прогнозировать деформацию поверхности.

– Разработаны методики выбора режимов правки, направленные на устранение исходной неоднородности напряженного состояния и дефектов плоскостности.

Проведенный анализ работ показывает их общую особенность: все они требуют в качестве входного параметра точного значения предела текучести σ_T . Поэтому, наряду с моделированием процесса правки, важное значение имеет прогнозирование предела текучести, поскольку именно он определяет рациональные режимы деформирования. Этой проблеме посвящен ряд исследований. В работе [101] разработаны математические модели предела текучести углеродистых и легированных сталей в диапазоне дорекристаллизационных температур, возникающих при холодной деформации. Модели позволяют уточнить энергосиловые параметры прокатки, однако не учитывают влияние всей предшествующей технологической истории рулона. В [102] получено регрессионное уравнение для расчета предела текучести IF-сталей в функции химического состава, режимов горячей и холодной прокатки и размера зерна. Несмотря на практическую ценность, модель ограничена узким классом сталей. Авторы [103] исследовали влияние степени обжата при холодной прокатке и содержания примесей на свойства стали 08Ю, что позволило скорректировать технологию для обеспечения высоких показателей штампуемости, но полученные зависимости носят частный характер. В работе [104] для прогнозирования относительного удлинения горячекатаных полос применены нейронные сети, однако целевая переменная – относительное удлинение, а сортамент ограничен. С использованием методов машинного обучения в [105] построены модели предела текучести трубных сталей после термической обработки, что также сужает область применения.

В [106] проведено сравнение различных подходов к прогнозированию деформационного упрочнения сталей при холодной прокатке, показано преимущество нейронных сетей, однако модели ориентированы на описание упрочнения в процессе прокатки, а не на прогноз готовых свойств после всех переделов.

Таким образом, существующие подходы либо ориентированы на конкретные марки стали или узкие диапазоны условий, либо не охватывают всю совокупность технологических переделов, влияющих на конечные свойства холоднокатаной полосы. Это делает актуальной разработку модели, интегрирующей данные всех этапов производства для прогнозирования предела текучести каждого конкретного рулона непосредственно перед правкой.

Несмотря на наличие работ по моделированию правки и механических свойств, для холоднокатаных полос остается нерешенной задача установления надежной связи между технологической историей рулона (химический состав, параметры горячей и холодной прокатки, режимы отжига) и его фактическим пределом текучести, необходимым для расчета режимов правки. Для преодоления этих проблем и реализации гарантированной прецизионной правки необходима разработка метода расчета рациональных настроек роликовой правильной машины, основанного на прогнозировании предела текучести по данным всех предшествующих переделов и установлении связи между настройками машины и достигаемой пластической деформацией.

1.6 Проблема комплексной оценки плоскостности холоднокатаных полос в производстве плоского проката

Эффективное управление плоскостностью на современном непрерывном стане невозможно без точной, оперативной и технологически

значимой оценки этого параметра. Исторически сложившиеся методы контроля плоскостности носили преимущественно выборочный и оффлайн-характер. После прокатки полоса визуально инспектировалась оператором, либо для оценки использовались контрольные плиты. Такой подход имел два принципиальных ограничения: дефект обнаруживался слишком поздно, когда значительная часть партии была уже изготовлена, а сам контроль не учитывал, что неплоскостность обусловлена неоднородным распределением остаточных продольных напряжений, которые при прокатке с натяжением могут быть скрытыми и проявляются лишь на последующих операциях обработки, что делает пассивный визуальный контроль неэффективным. Ответом на это стало внедрение систем непрерывного онлайн измерения плоскостности на основе секционированного измерительного ролика (стресс-ролика), описанного в п. 1.3, что позволило получать в реальном времени картину распределения остаточных продольных напряжений по всей длине и ширине полосы – ее цифровой двойник по плоскостности. Однако, как показывает анализ промышленной практики и технической литературы [3, 16, 61, 107], сам по себе точный измерительный прибор не решает проблему гарантированного качества. Возникают сложности в области оценки и аттестации плоскостности в условиях высокоавтоматизированного листопрокатного производства:

- Данные со стресс-ролика (2D-карты напряжений, сигналы в I-Unit) остаются сложными для оперативной интерпретации персоналом. Отсутствие формализованных алгоритмов интеллектуальной аттестации, переводящих сигнал в однозначное диагностическое заключение (тип дефекта, его локализация по длине рулона, степень критичности), приводит к запаздыванию в принятии решений.

- Информация о плоскостности слабо интегрирована в основные управляющие контуры: автоматизированную систему управления технологическим процессом (АСУ ТП) стана и систему управления

производством (MES). Это не позволяет реализовывать оперативную коррекцию технологических процессов.

Таким образом, разработка методов комплексной оценки плоскостности холоднокатаных полос, обеспечивающих интерпретацию измеряемых сигналов и подготовку данных для последующего использования в системах управления, является актуальной задачей, решение которой направлено на повышение эффективности производства.

Выводы по главе 1

Выполненный анализ современного состояния, проблем и перспективных методов обеспечения плоскостности холоднокатаных полос на непрерывных станах и при завершающей правке позволил сформулировать ряд ключевых выводов.

1. Существующие технологические решения на непрерывных станах холодной прокатки ориентированы в основном на установившиеся режимы прокатки, при этом закономерности совместного динамического взаимодействия систем осевой сдвижки CVC и гидроизгиба рабочих валков WRB, включая физический механизм возникновения дефекта «диагональная волна», остаются нераскрытыми.

2. Несмотря на наличие методов количественного описания геометрии горячекатаного подката, отсутствуют интегральные критерии и прогнозные модели, позволяющие оценить степень влияния технологической наследственности на формирование плоскостности при холодной прокатке, что особенно критично для высокопластичных IF-сталей, требующих перехода от управления по отклонению к прогнозному.

3. Отсутствие способов прогнозного назначения начальных уставок систем осевой сдвижки CVC и гидроизгиба рабочих валков WRB, базирующихся на параметрах подката, не позволяет компенсировать

технологическую наследственность и предотвращать дефекты плоскостности до начала процесса прокатки.

4. Настройка роликовых правильных машин выполняется по усредненным справочным данным без учета индивидуального предела текучести рулона, что не позволяет обеспечить гарантированное устранение дефектов плоскостности на завершающем этапе производства.

5. Отсутствие формализованных алгоритмов цифровой аттестации плоскостности на основе данных стресс-ролика снижает эффективность оперативного контроля и ограничивает интеграцию информации о качестве в автоматизированные системы управления производством.

Сделанные выводы об уровне развития теории и практике управления плоскостностью холоднокатаных полос позволяют сформулировать следующие задачи исследования, решение которых направлено на создание научно обоснованных технологических решений по обеспечению стабильного качества проката:

1. Провести экспериментальные промышленные исследования закономерностей совместного регулирования профиля и плоскостности системами осевой сдвижки CVC и гидроизгиба рабочих валков WRB на непрерывном стане холодной прокатки, раскрыть физический механизм возникновения дефекта «диагональная волна» и обосновать технологические правила его предотвращения.

2. Исследовать влияние геометрических параметров горячекатаного подката и температурных режимов горячей прокатки на формирование локальных дефектов плоскостности при холодной прокатке высокопластичных IF-сталей; на этой основе обосновать интегральный показатель качества подката X , характеризующий его технологическую наследственность.

3. Обосновать принцип прогнозной компенсации технологической наследственности подката при холодной прокатке IF-сталей, заключающийся

в иерархическом распределении корректирующих воздействий систем CVC и WRB по клетям непрерывного стана, и определить количественные соотношения, связывающие показатель X с рациональными уставками осевого смещения валков и усилием гидроизгиба.

4. Установить влияние параметров настройки роликовой правильной машины на устранение дефектов плоскостности при правке холоднокатаных полос и обосновать критерии для расчета рациональных режимов правки с учетом технологической истории рулона.

5. Осуществить промышленную апробацию и внедрение разработанных технических и технологических решений в условиях действующего металлургического производства с оценкой их технико-экономической эффективности.

Глава 2. Оборудование, методики и материалы для проведения исследования

2.1 Особенности технологического процесса производства холоднокатаных полос

Экспериментальные и промышленные исследования охватывали пределы полного технологического цикла производства плоского холоднокатаного проката на ПАО «Северсталь». После горячей прокатки и травления рулоны следуют по одному из трех основных технологических маршрутов (рисунок 2.1).

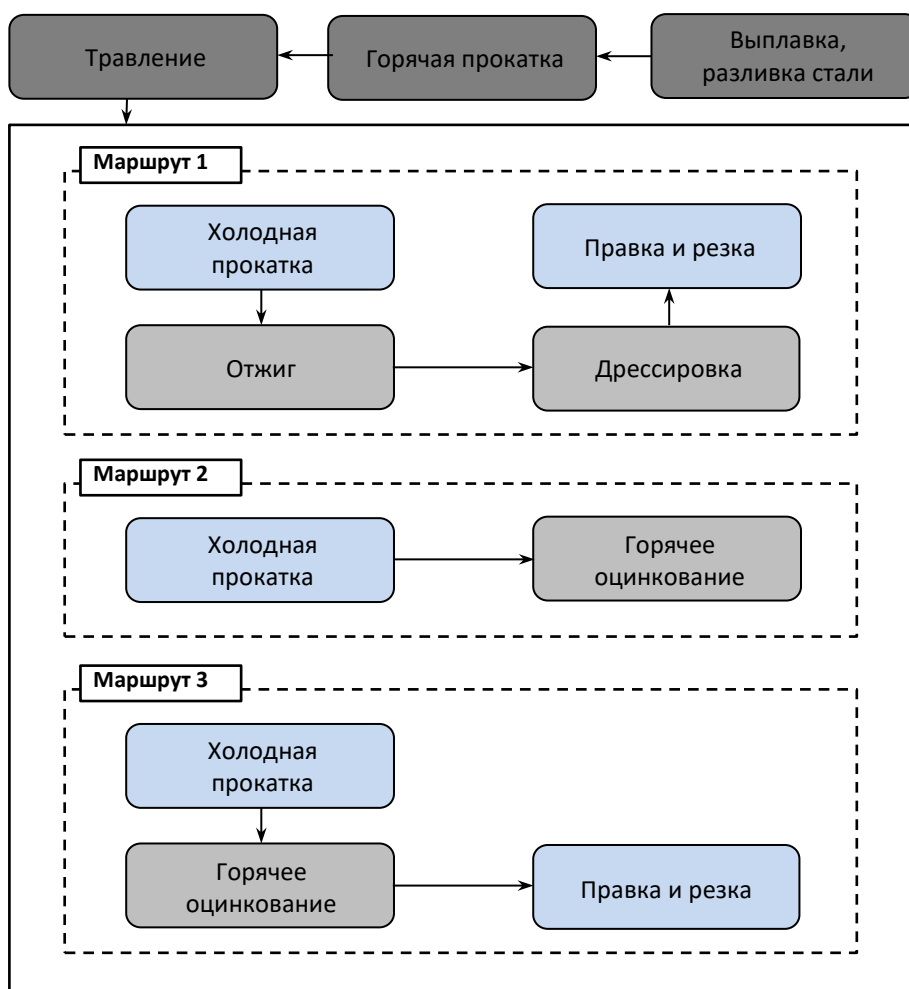


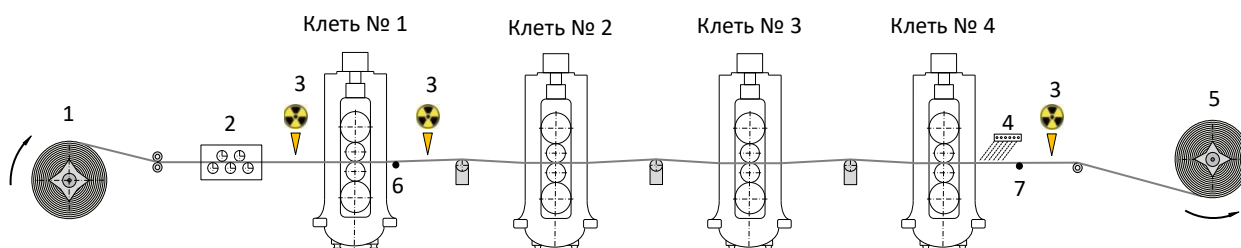
Рисунок 2.1 – Технологические маршруты производства холоднокатаных полос

В исследовании в качестве ключевых технологических агрегатов управления плоскостностью были выбраны:

1. Непрерывный 4-клетевой стан холодной прокатки 2100 – как основной объект для исследования управления плоскостностью в процессе прокатки.

2. Агрегат поперечной резки с двумя роликовыми правильными машинами (РПМ) – как основной объект для исследования и реализации настройки режимов правки.

Непрерывный 4-клетевой стан холодной прокатки 2100 ПАО «Северсталь» (рисунок 2.2), прошедший в 2015 и 2019 годах масштабное техническое перевооружение, является основным агрегатом для производства высококачественного тонколистового проката. Стан оснащен современными системами активного воздействия на профиль и плоскостность. Его проектная мощность составляет 1,3 млн тонн продукции в год.



1 – разматыватель; 2 – роликовая правильная машина; 3 – рентгеновский толщиномер; 4 – сдвиг эмульсии; 5 – моталка; 6, 7 – ролики для измерения отклонений от плоскостности за клетью № 1 и клетью № 4 соответственно

Рисунок 2.2 – Схема 4-клетевого стана холодной прокатки 2100

Основные технологические этапы стана включают подготовку и задачу переднего конца горячекатаного травленого рулона, размотку,

последовательную прокатку в четырех клетях с межклетевым натяжением, контроль геометрических параметров и смотку готовой полосы в рулон.

Каждая прокатная клеть включает комплекс систем для управления формой полосы:

– Систему осевой сдвижки рабочих валков CVC (Continuously Variable Crown), позволяющую бесступенчато изменять профиль межвалкового зазора за счет встречного осевого перемещения рабочих валков с S-образной геометрией бочки. Принцип работы системы иллюстрирует рисунок 2.3. Смещение верхнего рабочего валка влево и нижнего – вправо (положение *а*) или в противоположных направлениях (положение *в*) относительно нейтрального (положение *б*) позволяет корректировать выпуклость и устранять асимметрию прокатываемой полосы.

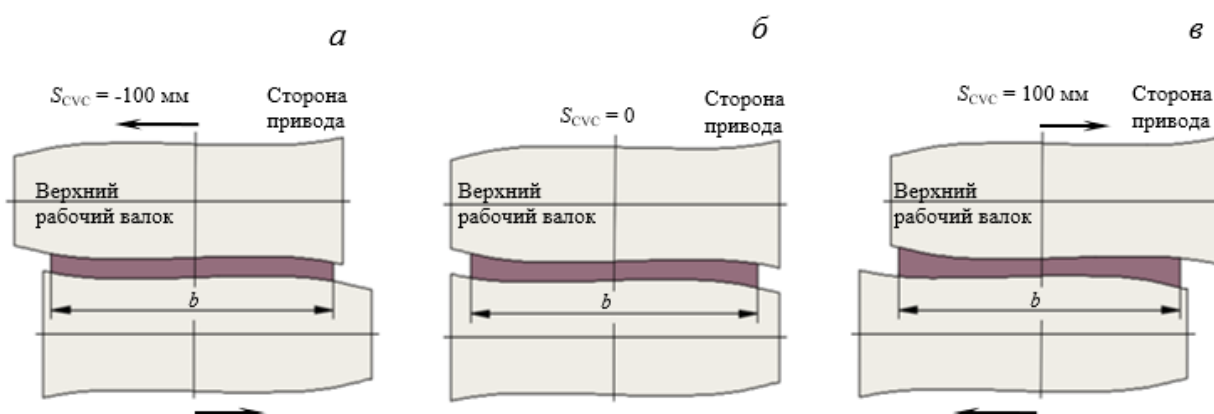


Рисунок 2.3 – Принцип работы системы CVC:

S_{CVC} – осевое смещение рабочего валка; b – ширина полосы

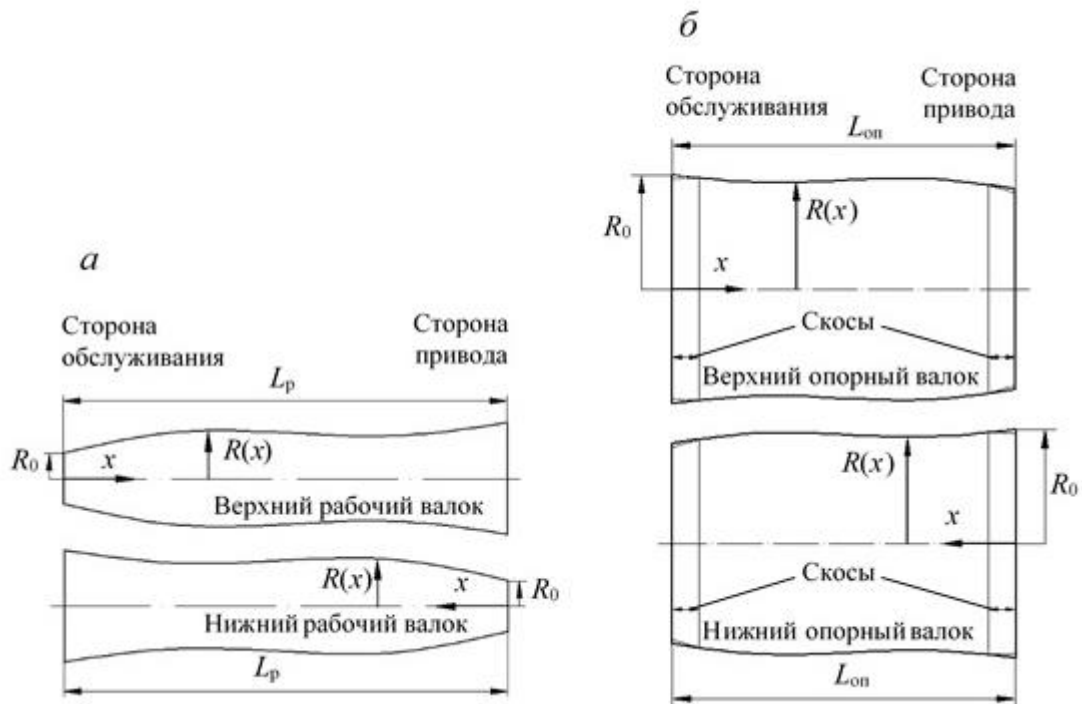
– Систему гидравлического изгиба рабочих валков WRB (Work Roll Bending), обеспечивающую локальную корректировку профиля за счет приложения изгибающего момента к шейкам рабочих валков.

Профили бочек CVC-валков (рисунок 2.4) описываются полиномом третьей степени (формула (1.18)). Для рабочих и опорных валков

исследуемого стана полиномиальные коэффициенты имеют следующие значения [108, 109]:

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



L_p и $L_{оп}$ – длины бочек рабочего и опорного валков; 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 $x = 0$

Рисунок 2.4 – CVC-профили бочек валков: *а* – рабочих; *б* – опорных

Для оперативного контроля технологических параметров стан оснащен измерительным комплексом, включающим:

– три рентгеновских толщиномера (перед клетью № 1, за клетью № 1 и за клетью № 4);

– лазерные измерители скорости, интегрированные в рамы толщиномеров;

– два стресс-ролика, установленные за клетью № 1 и клетью № 4 для непрерывного измерения распределения удельных продольных напряжений по ширине полосы.

Основные технические характеристики стана приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные технические характеристики 4-клетевого стана холодной прокатки 2100

Параметр	Значение
Диаметр рабочих валков, мм	420 – 480
Длина бочки рабочих валков, мм	2120
Диаметр опорных валков, мм	1150 – 1250
Ширина полосы (подката), мм	780 – 1650
Толщина подката, мм	1,5 – 5,5
Толщина готовой полосы, мм	0,3 – 3,5
Максимальное усилие прокатки на клеть, кН	30 000
Диапазон регулирования противоизгиба WRB, кН на шейку	-350 ... +500
Суммарная мощность главных приводов, кВт	39 340

Агрегат поперечной резки № 2 цеха отделки металла № 3 ПАО «Северсталь» является заключительным этапом технологической цепочки производства холоднокатаных полос. Для обеспечения прецизионной

плоскостности он оснащен двумя роликовыми правильными машинами (РПМ), работающими в зависимости от толщины полосы:

- РПМ 1 (рисунок 2.5): для правки полос толщиной 1,2 – 4,0 мм, имеет 15 правильных роликов диаметром 65 мм.

- РПМ 2: для правки полос толщиной 0,25 – 1,2 мм, имеет 19 правильных роликов диаметром 40 мм.



Рисунок 2.5 – Общий вид 15-роликовой РПМ агрегата поперечной резки № 2

2.2 Исследуемые материалы

В соответствии с комплексным характером исследования материалы были выбраны дифференцированно для решения двух основных задач.

Для исследования управления плоскостностью непосредственно в процессе холодной прокатки основное внимание было уделено высокопластичным сталям (прежде всего IF-сталям). Этот выбор обусловлен

их чувствительностью к точности настройки стана. Любая неоднородность в распределении напряжений по ширине полосы, вызванная субоптимальной настройкой профилировки CVC и усилий WRB или другими возмущающими факторами, неизбежно приводит к нарушению плоскостности. Таким образом, высокопластичные стали являются наиболее чувствительным индикатором и критерием эффективности алгоритмов управления, поскольку именно на них в первую очередь проявляются любые технологические отклонения. Профилеразмеры исследуемых холоднокатаных полос находились в следующих диапазонах: толщина 0,59–0,7 мм; ширина 1400–1640 мм.

Для разработки модели настройки завершающей операции правки использовалась расширенная выборка, охватывающая весь сортамент холоднокатаной продукции предприятия. Это обеспечило универсальность создаваемого алгоритма. Диапазон основных параметров исследуемых холоднокатаных полос был следующим:

- предел текучести: 155–740 МПа;
- толщина полосы: 0,4–3,2 мм;
- ширина полосы: 800–1650 мм.

2.3 Методика сбора и обработки промышленных данных

Исследование базируется на анализе больших массивов промышленных данных, объединяющих информацию от всех переделов.

Источники данных.

1. Параметры горячекатаного подката регистрировались промышленным профилометром, установленным на непрерывном широкополосном стане горячей прокатки стана 2000. Поперечный профиль измеряется бесконтактным методом с использованием ионизирующего излучения, которое проходит через полосу и регистрируется детекторами.

Скорость измерения составляет от 10 до 20 мс, а точность достигает $\pm 2\text{--}3,5$ мкм или $\pm 0,13\text{--}0,15\%$ от толщины.

2. Режимы горячей и холодной прокатки выгружались из АСУ ТП стана горячей прокатки 2000 и АСУ ТП стана холодной прокатки 2100.

3. Показатели плоскостности фиксировались роликами для измерения отклонений от плоскостности за клетью № 1 и клетью № 4. Данные представлялись в виде временных рядов удельных напряжений по 60 измерительным секциям, которые конвертировались в *I-Unit* и визуализировались в виде 2D-карт плоскостности.

4. Данные по химическому составу, режимам отжига и дрессировки были получены из единой системы автоматической оценки качества. Эта система хранит полную информацию о проверке каждой партии: результат аттестации и детальные результаты по технологии, геометрии и дефектам.

5. Механические испытания проводились в лабораторных условиях, результаты фиксировались в виде протоколов испытаний.

Методика обработки и анализа данных.

Для установления количественных связей между параметрами подката, режимами прокатки и показателями плоскостности холоднокатаных полос использовался комплекс методов статистического анализа и машинного обучения.

Для выявления наиболее значимых параметров, влияющих на интегральный показатель качества горячекатаного подката X , и построения адекватной прогнозной модели был применен многоэтапный аналитический подход, реализованный средствами Python [110–112].

1. Первичный анализ взаимосвязей. На первом этапе для выявления общих закономерностей и сокращения размерности данных был применен парный корреляционный и факторный анализ.

Корреляционный анализ (Пирсона) позволил оценить силу и направление линейных связей между отдельными исходными параметрами и

целевой переменной. Коэффициент корреляции r_{xy} между признаком x и целевым показателем y рассчитывается по формуле:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (2.1)$$

где n – общее количество наблюдений (рулонов) в выборке; индекс i ($i = 1, \dots, n$) – номер конкретного наблюдения (рулона); x_i – значение анализируемого признака (например, выпуклость профиля) для i -го рулона; y_i – значение целевой переменной (показателя X) для i -го рулона; $\bar{x}$, $\bar{y}$ – средние значения признака и целевой переменной по всей выборке.

Анализ коэффициентов r_{xy} для всех исходных параметров дал первичное понимание их линейной связи с показателем X .

Факторный анализ был применен для сокращения размерности и выявления скрытых структур среди многочисленных коррелирующих параметров профиля и режимов. Он агрегирует исходные m признаков в k синтетических факторов (где $k < m$). Значение p -го фактора для каждого наблюдения вычисляется как взвешенная сумма значений исходных признаков для этого наблюдения:

$$F_p^{(i)} = \sum_{j=1}^m w_{pj} \cdot x_j^{(i)}. \quad (2.2)$$

где индекс j ($j = 1, \dots, m$) – номер исходного признака (технологического параметра); $x_j^{(i)}$ – значение j -го признака для i -го рулона; w_{pj} – факторная нагрузка, определяющая вклад j -го признака в формирование p -го фактора (не зависит от номера наблюдения); $F_p^{(i)}$ – значение p -го синтетического фактора для i -го рулона.

Таким образом, исходные параметры были сведены к ограниченному числу факторов.

2. Предобработка данных. Перед моделированием все числовые признаки были масштабированы для обеспечения сравнимости признаков, устойчивости обучения алгоритмов и исключения влияния единиц измерения. Масштабирование методом стандартизации включает процедуру преобразования исходного значения x_i для каждого j -го признака в новые z_{ij} :

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \mu_j}{\sigma_j}, \quad (2.3)$$

где z_{ij} – стандартизированное значение j -го признака для i -го наблюдения; x_{ij} – исходное значение j -го признака для i -го наблюдения; μ_j – выборочное среднее значение j -го признака; σ_j – выборочное стандартное отклонение j -го признака.

3. Построение прогнозных моделей. На данном этапе были построены и сравнены модели различной сложности: линейная регрессионная модель с L1-регуляризацией (LASSO) и нелинейная модель градиентного бустинга (XGBoost).

Метод LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) [113] решает единую задачу оптимизации, совмещающую обучение модели и отбор признаков. Метод минимизирует функцию потерь, которая совмещает точность подгонки модели со штрафом за ее сложность, выраженным через L1-норму вектора весов.

$$\min_{w_0, \mathbf{w}} \left\{ \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (y_i - w_0 - \mathbf{w}^T \mathbf{x}_i)^2 + \lambda \|\mathbf{w}\|_1 \right\}, \quad (2.4)$$

где $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$ – вектор значений всех m признаков для i -го наблюдения. Каждый элемент x_{ij} соответствует значению j -го признака для i -го рулона; w_0 – свободный член модели; $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ – вектор весовых коэффициентов и w_j соответствует вкладу j -го признака; $\|\mathbf{w}\|_1 = \sum_{j=1}^m |w_j|$ – L1-норма вектора весов (сумма абсолютных значений); $\lambda \geq 0$ – параметр регуляризации, управляющий силой штрафа за сложность.

Ключевой особенностью метода LASSO является свойство разреженности, индуцируемое L1-членом регуляризации. С увеличением параметра λ функция потерь минимизирует не только ошибку предсказания, но и сумму абсолютных значений коэффициентов $\|\mathbf{w}\|_1$, что приводит к обнулению весов w_j для наименее информативных признаков. Значение λ^* , обеспечивающее оптимальный компромисс между смещением и дисперсией модели, определялось процедурой 5-кратной кросс-валидации, являющейся методом оценки и настройки моделей машинного обучения, направленным на обеспечение их устойчивости к новым данным. В этом случае исходная выборка 5 раз случайно делится на обучающую и проверочную части; модель обучается на одной части и оценивается на другой. В качестве λ^* выбирается значение, обеспечивающее минимальную среднюю ошибку предсказания на проверочных выборках, что гарантирует баланс между точностью и устойчивостью модели к переобучению. В результате из исходного множества предикторов было селектировано компактное подмножество наиболее значимых и физически интерпретируемых признаков, определяющих поведение показателя X .

Модель на основе градиентного бустинга представляет собой ансамбль последовательно обучаемых деревьев решений, где каждое последующее дерево корректирует ошибки предыдущих. Итоговый прогноз для i -го наблюдения (рулона) формируется как взвешенная сумма прогнозов всех K деревьев:

$$\hat{y}_i = \hat{y}_0 + \eta \sum_{k=1}^K f_k(\mathbf{x}_i), \quad (2.5)$$

где $\hat{y}_i$ – прогнозируемое моделью значение целевой переменной (показателя X) для i -го рулона; $\hat{y}_0$ – начальное приближение; $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$ – вектор значений всех признаков для i -го наблюдения; $f_k(\mathbf{x}_i)$ – прогноз, выдаваемый k -м деревом решений для входного вектора $\mathbf{x}_i$; η – скорость обучения, параметр, управляющий вкладом каждого дерева в итоговый прогноз. Такая

архитектура позволяет модели улавливать сложные нелинейные зависимости и взаимодействия признаков, однако делает ее менее интерпретируемой. Данная модель, обладая максимальной прогностической точностью, послужила эталоном для оценки предельной прогнозной способности данных.

Сравнение моделей проводилось по комплексу критериев, адаптированных к требованиям промышленной эксплуатации в контуре АСУ ТП, включая точность прогноза (коэффициент детерминации R^2 , средняя абсолютная ошибка), вычислительная эффективность, склонность к переобучению, стабильность работы на новых данных. Окончательный выбор модели для промышленной интеграции был сделан на основе анализа баланса этих критериев по результатам промышленной апробации.

Аналогичный методологический подход, основанный на сборе производственных данных, факторном анализе и сравнении моделей, был применен для решения сопряженной задачи построения прогнозных моделей для настройки профилировки CVC и усилий WRB в зависимости от интегрального показателя качества подката X .

Для расчета режимов правки была разработана регрессионная модель, прогнозирующая предел текучести каждого рулона на основе полного комплекса данных его технологической истории, включая химический состав стали, параметры прокатки, режимы отжига и дрессировки. Модель прогноза является универсальной и применима к рулонам, следующим по любому из маршрутов рисунка 2.1.

2.4 Лабораторные и промышленные исследования

Лабораторные исследования проводились в лаборатории механических испытаний ПАО «Северсталь». Был выполнен комплекс испытаний на растяжение в соответствии с ГОСТ 11701. Испытания проводились на

плоских образцах с начальной расчетной длиной $l_0 = 80$ мм ($l_0 = 4b_0$, где $b_0 = 20$ мм – ширина рабочей части плоского образца до испытания) и длиной плоскопараллельной части 120 мм с использованием универсальной испытательной машины Zwick/Roell (рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 – Универсальная испытательная машина Zwick/Roell

Отбор проб осуществлялся в начале материнского рулона после вырезки дефектных и необжатых участков. Для ответственных марок проводился отбор 2–3 образцов по длине рулона для контроля однородности.

Промышленные исследования заключались в апробации разработанных технологических решений в условиях действующего металлургического производства ПАО «Северсталь» на полном технологическом цикле, включающем: непрерывный 4-клетевой стан холодной прокатки 2100, агрегат поперечной резки с роликовыми правильными машинами.

Эффективность оценивалась по динамике показателей плоскостности, стабильности технологического процесса и результатам выборочного контроля готовой продукции.

Выводы по главе 2

1. Представлены оборудование и материалы, необходимые для проведения комплексных исследований по управлению плоскостностью на полном технологическом цикле ПАО «Северсталь». В качестве основных объектов выбраны: непрерывный 4-клетевой стан холодной прокатки 2100, агрегат поперечной резки с роликовыми правильными машинами, а также холоднокатаные полосы из высокопластичных сталей для исследования процесса прокатки и всего сортамента для разработки метода настройки процесса правки.

2. Разработана и представлена комплексная методика сбора, обработки и анализа больших промышленных данных, основанная на многоэтапном аналитическом подходе и включающая:

- первичный статистический анализ (корреляционный и факторный) для выявления взаимосвязей между параметрами подката, режимами прокатки и показателями плоскостности;

- предобработку данных (масштабирование) для обеспечения корректной работы алгоритмов;

- построение и сравнительный анализ прогнозных моделей различной сложности – линейной модели с автоматическим отбором признаков (LASSO) и нелинейной модели градиентного бустинга.

Методика служит инструментальной основой для построения предиктивных моделей и обоснованного выбора решений, пригодных для интеграции в АСУ ТП с целью управления плоскостностью и настройки профилировки валков CVC.

3. Лабораторные испытания проводятся с соблюдением стандартных методик и обеспечивают получение достоверных данных о механических свойствах, промышленные исследования проводятся в условиях действующего металлургического производства ПАО «Северсталь» и направлены на экспериментальное подтверждение разработанных зависимостей и алгоритмов в реальном технологическом процессе.

Глава 3. Разработка и апробация методов прогнозного управления плоскостностью холоднокатаных полос

3.1 Исследование совместного регулирования систем CVC и WRB

Повышенные требования современного рынка к точности геометрии и плоскостности холоднокатаных полос определяют необходимость использования высокоэффективных систем воздействия на прокатных станах. Основными исполнительными механизмами, обеспечивающими управление профилем и формой полосы в процессе прокатки, являются система осевой сдвижки валков CVC (Continuously Variable Crown – непрерывно изменяемая кривизна) и система гидроизгиба рабочих валков WRB (Work Roll Bending).

Система валков CVC реализуется в двух вариантах исполнения: первый вариант – с цилиндрическим профилем бочки опорных валков; второй вариант, называемый «CVC плюс», – с выпукло-вогнутым профилем бочки опорных валков. В системе «CVC плюс» образующая верхнего опорного валка зеркально отображает образующую верхнего рабочего валка и при отсутствии осевого смещения рабочего валка ($S_{CVC} = 0$) максимальный радиус рабочего валка совпадает с минимальным радиусом опорного. Такая система валков применяется во всех 4-х клетях непрерывного стана холодной прокатки 2100 ПАО «Северсталь» (рисунок 2.4). Смещение верхнего валка влево, а нижнего – вправо, что соответствует отрицательным значениям S_{CVC} и варианту *a* рисунка 2.3, приводит к увеличению выпуклости в центральной части полосы и, наоборот, положительные значения S_{CVC} (вариант *в* рисунка 2.3) формируют вогнутый профиль полосы.

Для анализа возможностей совместного управления профилем системами CVC и WRB на 4-клетевом стане 2100 была построена геометрическая модель зоны регулирования в виде ромба (рисунок 3.1).

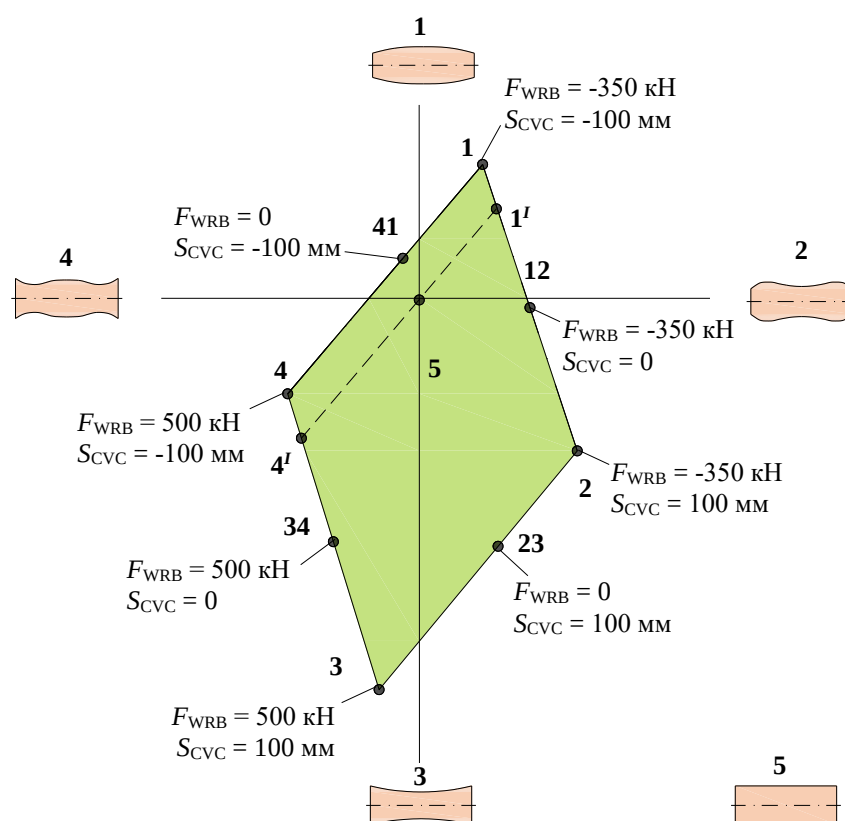


Рисунок 3.1 – Геометрическая модель (ромб) зоны совместного регулирования профиля полосы системами CVC и WRB

Угловым точкам области (точки 1, 2, 3, 4) соответствуют экстремальные значения параметров систем осевой сдвижки и гидроизгиба с формированием различных профилей полосы. Диапазон величины сдвижки S_{CVC} составляет ± 100 мм, усилие изгиба валков F_{WRB} варьируется от -350 кН до +500 кН. Положительные значения соответствует противоизгибу рабочих валков, отрицательное значение – дополнительному изгибу.

Профиль полосы первоначально определяется на основе величины сдвижки системы CVC и далее корректируется с помощью системы WRB. Положительные значения усилия изгиба F_{WRB} (противоизгиб) уменьшают воздействия в зоне кромок полосы, отрицательные – повышают воздействия

в этой зоне.

Профиль, обозначенный цифрой 1, формируется в точке 1 при совместном регулировании систем CVC и WRB. Здесь отрицательная осевая сдвижка ($S_{CVC} = -100$ мм) приводит к вогнутой форме профилей бочек рабочих валков, величина вогнутости с учетом применяемых CVC-профилей [108, 109] достигает значения $-0,1$ мм. В этом случае и от действия силы дополнительного изгиба до -350 кН остается выпуклый профиль полосы. В точке 3, в вершине области, противоположной точке 1, максимальная положительная осевая сдвижка ($S_{CVC} = 100$ мм) приводит к выпуклым профилям бочек рабочих валков, величина выпуклости достигает $0,55$ мм и обеспечивается уже вогнутый профиль полосы 3. Под действием силы противоизгиба до 500 кН профиль полосы останется вогнутым.

Точки 2 и 4 области регулирования можно раскрыть на основе анализа уже рассмотренных вариантов воздействий в точках 1 и 3. В точке 2 при $S_{CVC} = 100$ мм формируется вогнутый профиль холоднокатаной полосы, но дополнительный изгиб шеек рабочих валков с усилием до $F_{WRB} = -350$ кН приводит к росту воздействий в кромочной зоне и получению формы профиля 2 с уменьшением толщины по кромкам. Точке 4 соответствует $S_{CVC} = -100$ мм и первоначально формируется выпуклый профиль полосы, как и в точке 1. Под воздействием силы противоизгиба происходит снижение давления в зоне кромок и поперечный выпуклый профиль полосы приобретает прикромочные утолщения (профиль 4). Все изложенное по предельным возможностям регулирования в узловых точках показывает, что на стане обеспечиваются существенные технологические воздействия систем CVC и WRB по ширине полосы, что, в свою очередь, является определяющим при формировании плоскостности полос.

На ребрах области регулирования рисунка 3.1 отмечены точки 12, 23, 34 и 41. В зависимости от значений узловых точек каждого ребра в них фиксированы исходные состояния одного из параметров ($S_{CVC} = 0$ или $F_{WRB} =$

0) и экстремальные – другого. В точках 12 и 34 отсутствие осевого смещения рабочих валков ($S_{CVC} = 0$) приводит к профилям рабочих валков с величиной выпуклости до 0,225 мм, что в 2 раза меньше, чем при $S_{CVC} = 100$ мм. При этом получается профиль полосы в точке 34 – вогнутый, как профиль 3, но с величиной вогнутости меньшей в 2 раза. В точке 12 обеспечивается вогнутый профиль с утонением по кромкам, как профиль 2, но также с меньшей в 2 раза вогнутостью, чем у профиля 2. В точках 23 и 41 при отсутствии работы системы WRB форма получаемого профиля полосы в точке 23 соответствует форме профиля 3, в точке 41 – форме профиля 1, но с большей величиной вогнутости или выпуклости.

Анализ работы систем регулирования (рисунок 3.1) показывает, что в зоне, ограниченной точками 1-12-34-4, за счет сдвижки CVC, есть область формирования профиля, максимально близкого к прямоугольному. Линия 1^I-4^I соответствует зоне регулирования CVC с формированием в середине профиля полосы плоского участка. Для точек 1^I и 4^I $S_{CVC} = -70$ мм и профили рабочих валков близки к цилиндрической профилировке бочек. Точка 1^I находится под воздействием противоизгиба 500 кН, точке 4^I – соответствует дополнительный изгиб -350 кН, а значит нулевое значение изгиба, не оказывающего влияния на форму кромок полосы, будет находиться в точке 5 на линии 1^I-4^I. В этой точке будет прямоугольный профиль полосы – форма профиля 5.

Для иллюстрации возможностей работы систем CVC и WRB в зависимости от ширины прокатываемых холоднокатаных полос построены области воздействия систем на профиль полос (рисунок 3.2). Видно, что с уменьшением ширины полосы, несмотря на снижение размаха значений воздействий, остается возможность получения различных форм поперечных профилей полос и сохраняется возможность воздействий по ширине полосы для регулирования плоскостности.

Оценка эффективности использования систем осевой сдвижки валков CVC и гидроизгиба рабочих валков WRB была выполнена на основе реальных прокаток на стане 2100 с контролем распределения вытяжек по ширине.

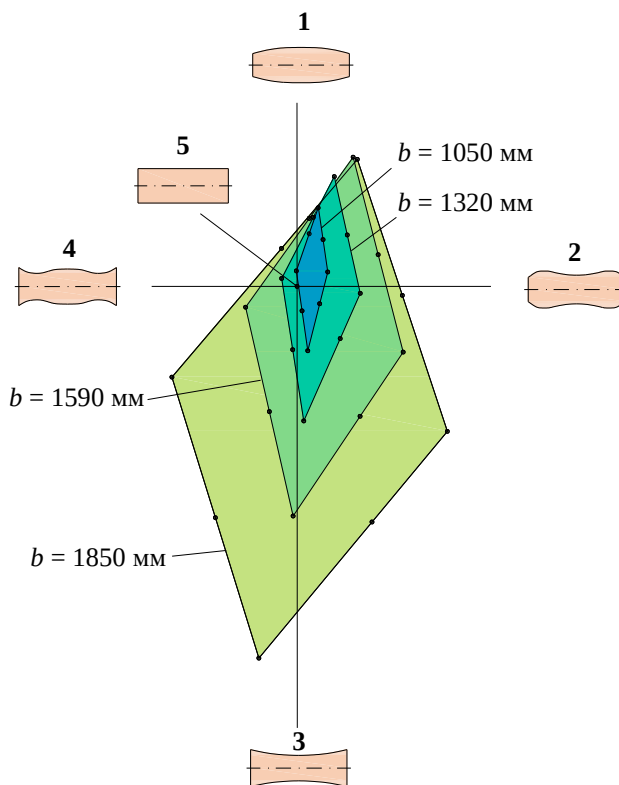


Рисунок 3.2 – Возможности совместного регулирования профиля полос различной ширины на основе систем CVC и WRB

В качестве примера, иллюстрирующего возможности регулирования, рассматривалась прокатка полосы толщиной 0,68 мм и шириной 1580 мм из стали CR2 для дальнейшего оцинкования [114]. Оценивалась эффективность работы системы контроля вытяжек по ширине полосы за клетью № 1 (рисунок 3.3) и клетью № 4 (рисунок 3.4) с формированием технологических воздействий в системах CVC и WRB в этих клетях.

Профиль полосы формируется на основе определения разности напряжений по ширине при прокатке с использованием стресс-роликов после клетей № 1 и № 4, что позволяет на стане комплексно регулировать плоскостность для формирования качества полосы.

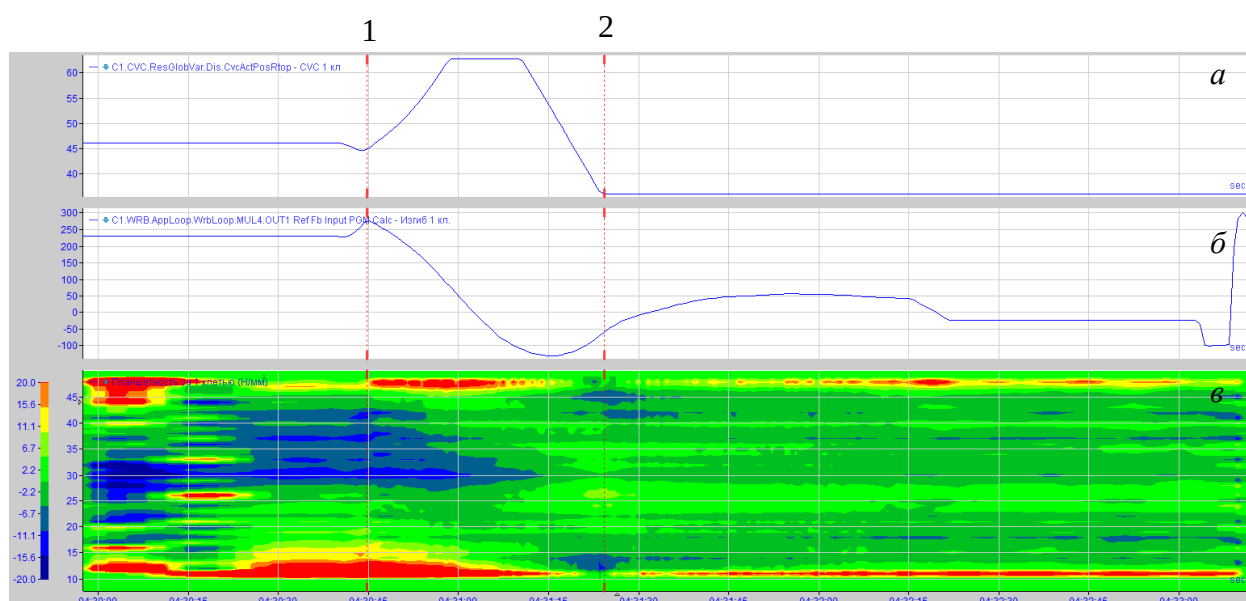


Рисунок 3.3 – Регулирующие воздействия CVC (*a*), изгиба WRB (*б*) с профилем полосы (Н/мм²) на ролике для измерения отклонений от плоскостности за клетью № 1 (*в*)

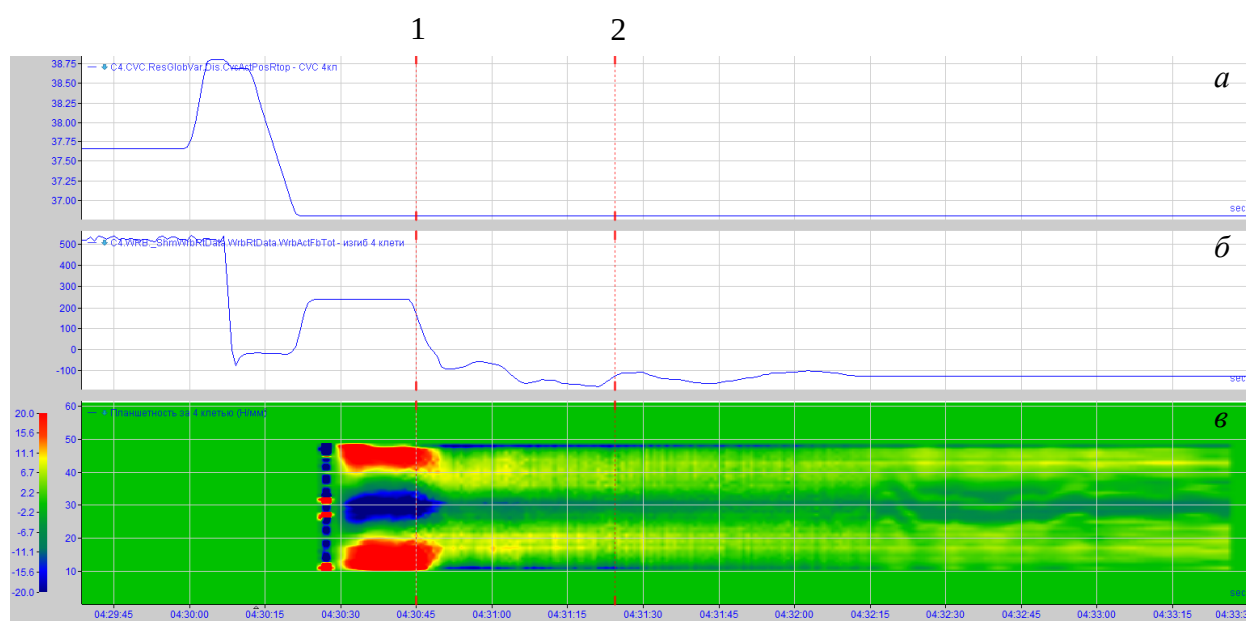


Рисунок 3.4 – Регулирующие воздействия CVC (*a*), изгиба WRB (*б*) с профилем полосы (Н/мм²) на ролике измерения отклонений от плоскостности за клетью № 4 (*в*)

Из рисунка 3.3, в видно, что в начале величина натяжений в краевых участках 20 Н/мм^2 , в середине – -20 Н/мм^2 , что соответствовало форме профиля полосы – центральная волнистость (коробоватость). При этом система регулирования реализовывала воздействия в середине полосы с положительной осевой сдвижкой $S_{\text{CVC}} = 46 \text{ мм}$ (рисунок 3.3, а) и с противоизгибом рабочих валков $F_{\text{WRB}} = 230 \text{ кН}$ (рисунок 3.3, б). Для компенсации этих отклонений система первоначально применила рост положительной сдвижки S_{CVC} с 46 мм до 69 мм и переход с противоизгиба на дополнительный изгиб до $F_{\text{WRB}} = -125 \text{ кН}$, одновременно незначительно повысив воздействие в середине и увеличив деформационное воздействие в зоне кромок, что способствовало выравниванию вытяжек по ширине. Дальнейшее снижение значения осевой сдвижки S_{CVC} до 35 мм (метка 2) и придание усилий по кромкам полосы позволило снять избыточные натяжения в середине. В последующих клетях № 2 и № 3 выполнялись настройки систем CVC и WRB для поддержания распределений напряжений, полученных после клетки № 1. В клетки № 4 окончательно формировалась плоскостность полосы. При воздействии CVC в середине $S_{\text{CVC}} = 36,8 \text{ мм}$ (рисунок 3.4, а) с переходом от противоизгиба (метка 1) в дополнительный изгиб (метка 2) (рисунок 3.4, б) были компенсированы все отклонения по ширине (рисунок 3.4, в).

Представленный анализ демонстрирует, что совместная работа систем CVC и WRB на непрерывном стане 2100 является эффективным инструментом для активного воздействия на форму полосы и повышения точности ее геометрии.

Вместе с тем, анализ промышленных данных выявил границы эффективности такого подхода и сложные сценарии формирования дефектов, возникающих при специфических комбинациях воздействий CVC и WRB. Таким примером является образование дефекта «диагональная волна» (рисунок 1.9) на высокопластичных полосах.

Этот дефект представляет собой особый вид неплоскостности, при котором зона повышенной вытяжки приобретает несимметричную, диагонально вытянутую форму. Механизм его формирования раскрывается через анализ совместного, но недостаточно скоординированного воздействия систем регулирования.

Первая фаза – формирование центрального короба, когда в момент прокатки установлен значительный противоизгиб рабочих валков (состояние, близкое к точке 3 на рисунке 3.1). В этом состоянии давление в очаге деформации в средней части полосы превышает давление на кромках. Середина полосы получает большую относительную вытяжку, что приводит к образованию классического центрального короба и повышенным остаточным напряжениям у кромок.

Вторая фаза – попытка устранения дефекта. Для компенсации центрального короба требуется увеличить обжатие кромок, что обычно достигается отрицательной осевой сдвижкой ($S_{CVC} < 0$) или дополнительным изгибом ($F_{WRB} < 0$). Однако, если в момент коррекции сдвижка имеет положительное значение ($S_{CVC} > 0$), соответствующее выпуклому профилю валков, то попытка резкого перемещения для обжатия кромок приводит к асимметричному воздействию. Вместо равномерного увеличения давления по обеим кромкам, зона максимального обжатия смещается по диагонали, что приводит к вытягиванию сформированной коробоватости в диагональном направлении.

Аналогичный механизм пространственного искажения может проявляться и при других начальных состояниях. Например, в точке 2 (рисунок 3.1) сочетание вогнутого профиля от положительной сдвижки CVC и дополнительного изгиба WRB создает предпосылки для одновременного короба и кромочной волны. Резкое корректирующее перемещение CVC в такой ситуации также способно вызвать асимметричное перераспределение давления и формирование диагонального дефекта. Аналогично, состояние в

точке 4 при выпуклом профиле под воздействием противоизгиба, характеризующееся двумя зонами утолщений у кромок, при неудачной попытке коррекции может привести к смещению и слиянию этих зон в диагональную волну.

Таким образом, геометрическая модель регулирования (рисунок 3.1) описывает установившиеся режимы и служит основой для понимания того, как резкий переход из одной точки ромба в другую, вызванный коррекцией одной из систем, может привести к временному пространственно-неоднородному силовому состоянию в очаге деформации. А дефект «диагональная волна» является общей формой пространственной неустойчивости очага деформации, которая может развиваться из различных исходных дефектов профиля при их динамической коррекции. Основным фактором риска выступает несогласованность во времени между изменением геометрии межвалкового зазора, задаваемым системой CVC, и силовым воздействием системы WRB, которое должно компенсировать это изменение.

В качестве примера формирования дефекта рассматривалась прокатка полосы из стали 08пс (исходная толщина 3 мм, конечная – 1,11 мм, ширина 1275 мм), на которой была зафиксирована диагональная волна.

На рисунке 3.5 представлены данные, полученные из системы сбора и анализа технологических параметров стана: регулирующие воздействия систем CVC и WRB в клетки № 3 (а) и клетки № 4 (б), а также 2D-карты распределения напряжений в полосе после клетки № 1 (в) и после клетки № 4 (г).

В начальном состоянии между метками 1 и 2 (рисунок 3.5, а), соответствующем временному интервалу 22:48:30–22:49:00, зафиксированы предпрокатные настройки: система WRB установила усилие дополнительного изгиба -200 кН, а смещение S_{CVC3} составило +17 мм. В этот момент от ролика контроля плоскостности за клетью № 1 поступили сигналы о наличии волнистости по кромкам полосы (рисунок 3.5, в).

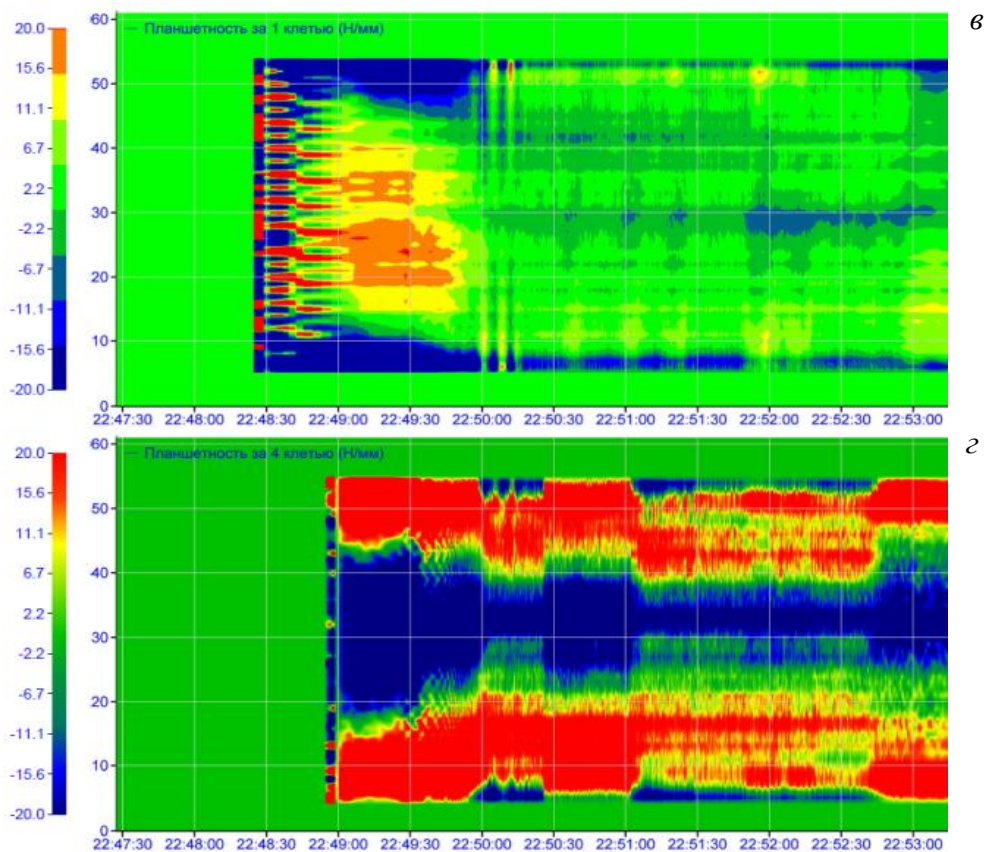
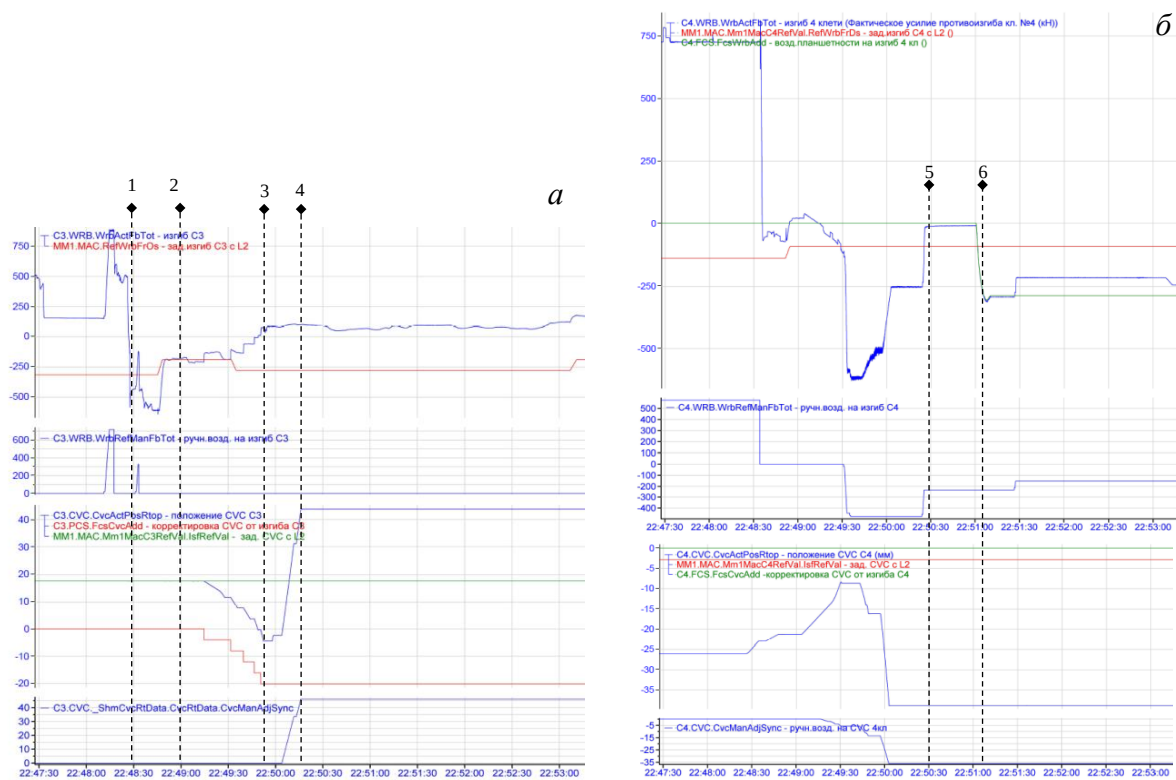


Рисунок 3.5 – Регулирующие воздействия CVC и WRB в клетки № 3 – а и № 4 – б, 2D-карта напряжений полосы после клетки № 1 – в и после клетки № 4

Автоматическая система регулирования, реагируя на эти данные, скорректировала усилие WRB клетки № 3 до +40 кН (метка 3), что соответствовало установленному лимиту отклонения по усилию противоизгиба (100 кН). Одновременно система CVC клетки № 3 выполнила компенсирующее перемещение, изменив позицию сдвижки с +17 мм до -4 мм (метка 3). Это резкое геометрическое изменение на фоне ограниченного силового воздействия WRB привело к одновременному формированию за клетью № 3 и кромочной волнистости, и центральной корбоватости (рисунок 3.5, з).

Оператор вручную скорректировал положение CVC клетки № 3, увеличив сдвижку S_{CVC3} до +45 мм (метка 4 на рисунке 3.5, а), что позволило уменьшить кромочную волнистость, но усилило центральную. Однако из-за предшествовавшей некорректной работы автоматики (компенсационные перемещения CVC между метками 2 и 3) и достижения силового лимита WRB, регулирование не привело к выравниванию профиля – вместо этого зона повышенной вытяжки приобрела диагональную ориентацию.

Ситуация усугубилась в клетке № 4 (рисунок 3.5, б). После 22:50:30 (метка 5) система, реагируя на сигналы от ролика контроля плоскостности, увеличила усилие противоизгиба WRB с 0 до -300 кН (метка 6). Оператор, пытаясь устранить сохраняющуюся корбоватость, вручную снизил усилие дополнительного изгиба на 100 кН, однако из-за уже сформированного диагонального искажения и рассогласованного состояния систем после клетки № 3, эффективная коррекция оказалась невозможной. В результате на выходе из клетки № 4 был зафиксирован выраженный короб с диагональной составляющей.

Данная последовательность воздействий наглядно демонстрирует, как рассогласованное динамическое взаимодействие автоматических коррекций и ручных вмешательств приводит к возникновению сложного пространственно-неустойчивого дефекта «диагональная волна»,

окончательно формирующегося в последней клетке стана. Следует отметить, что по данным ролика контроля отклонений от плоскостности после клетки № 1 (рисунок 3.5, в) состояние полосы не имело критических отклонений, что подтверждает: дефект «диагональная волна» возник и развился не из-за исходного состояния подката, а именно в процессе рассогласованного совместного регулирования системами CVC и WRB в последующих клетках.

Для подавления выявленного механизма формирования диагональной волны были разработаны и внедрены технологические правила, ограничивающие автономную корректировку параметров сдвижки CVC в клетках № 2 и № 3 относительно базовых уставок клетки № 1, а также расширены допустимые диапазоны регулирования. Конкретные изменения параметров настройки систем по клеткам представлены в таблице 3.1.

Анализ параметров настройки, приведенных в таблице 3.1, свидетельствует о реализации принципа устранения динамического рассогласования систем CVC и WRB. Основные изменения сфокусированы на клетках № 2 и № 3, которые в прежней схеме могли действовать автономно. Для указанных клеток лимиты допустимых усилий как противоизгиба, так и дополнительного изгиба были существенно расширены: для противоизгиба – в 1,4–2 раза, для дополнительного усилия – до 3,5 раза. Это обеспечивает системе WRB большой ресурс для своевременной компенсации геометрических воздействий, инициируемых CVC, и предотвращает выход на граничные режимы при регулировании.

Установка дискретного шага изменения осевой сдвижки (4 мм) для клеток № 2 и № 3 ограничивает скорость изменения геометрии межвалкового зазора. Данная мера снижает риск возникновения резких градиентов давления в очаге деформации, провоцирующих пространственную неустойчивость процесса.

Таблица 3.1 – Изменение параметров настройки систем CVC и WRB после корректировки технологических правил

Параметр	Клеть			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Было				
Лимит отклонения усилия противоизгиба, кН	700	350	250	340
Лимит отклонения дополнительного усилия, кН	-200	-100	-100	-270
Компенсация изменения CVC на изгиб	Выкл.	Вкл.	Вкл.	Выкл.
Стало				
Лимит отклонения усилия противоизгиба, кН	700	500	500	350
Лимит отклонения дополнительного усилия, кН	-200	-350	-350	-250
Шаг изменения CVC, мм	2	4	4	0,5
Компенсация изменения CVC на изгиб	Выкл.	Вкл.	Вкл.	Выкл.

Функция автоматической компенсации изменения положения CVC соответствующим изменением усилия WRB была сохранена в активном состоянии исключительно для клеток № 2 и № 3. Данное решение соответствует распределению технологических задач по длине стана:

- в клетки № 1 управление основано на первичном сигнале от ролика для измерения отклонений от плоскостности и автономная компенсация не требуется;

- в клетях № 2 и № 3 основная задача связана со стабилизацией напряжений и сглаживание воздействий между клетями; включенная компенсация гарантирует, что любое корректирующее перемещение CVC в

этих клетях будет немедленно поддержано соответствующим силовым воздействием WRB, минимизируя период временного рассогласования;

– в клетки № 4 при формировании конечной плоскостности требуется прецизионное управление с минимальным шагом CVC (0,5 мм) и введение компенсации могло бы усложнить контур управления.

Внедрение данных правил позволило устранить ключевую причину возникновения дефекта «диагональная волна» – динамическое рассогласование воздействий систем CVC и WRB – и свести к минимуму его появление, стабилизировав процесс управления плоскостностью.

Проведенное исследование подтвердило широкие технологические возможности систем CVC и WRB, а также позволило детально описать механизм возникновения диагональной волны как специфического дефекта пространственной неустойчивости. Установлено, что его основной причиной является временная несогласованность между геометрическим воздействием CVC и силовым откликом WRB в процессе динамического регулирования. Разработанные и внедренные технологические правила, синхронизирующие управление системами по длине стана, обеспечили эффективное подавление данного дефекта.

Вместе с тем, результаты анализа совместного регулирования выявили ограничения: эффективность регулирования зависит от начальных уставок CVC и WRB, что обуславливает необходимость перехода от управления по отклонению к прогнозному назначению начальных параметров настройки систем с учетом технологической наследственности горячекатаного подката.

3.2 Влияние параметров горячекатаного подката на плоскостность.

Разработка модели условного показателя качества подката

Качество холоднокатаных полос, напрямую зависящее от их плоскостности, в значительной степени определяется характеристиками

поступающего горячекатаного подката. Ключевые отклонения поперечного профиля подката – поперечная разнотолщинность, клиновидность, смещение вершины, местные неровности – являются исходной причиной возникновения неплоскостности холоднокатаных полос: продольной и поперечной волнистости, включая коробление, а также серповидности и локальных искажений.

Возникающие отклонения формы приводят к значительному росту доли отсортровки и серьезным экономическим потерям. Особенно актуальна эта проблема при производстве автолиста для последующего цинкования, где требования к плоскостности исключительно высоки. В процессе горячего цинкования неплоскостность холоднокатаной полосы проявляется в виде критических пороков поверхности готовой продукции (рисунок 3.6), таких как «порезы с печи», «дросс», механические повреждения, а также приводит к уводам полосы с оси агрегата.

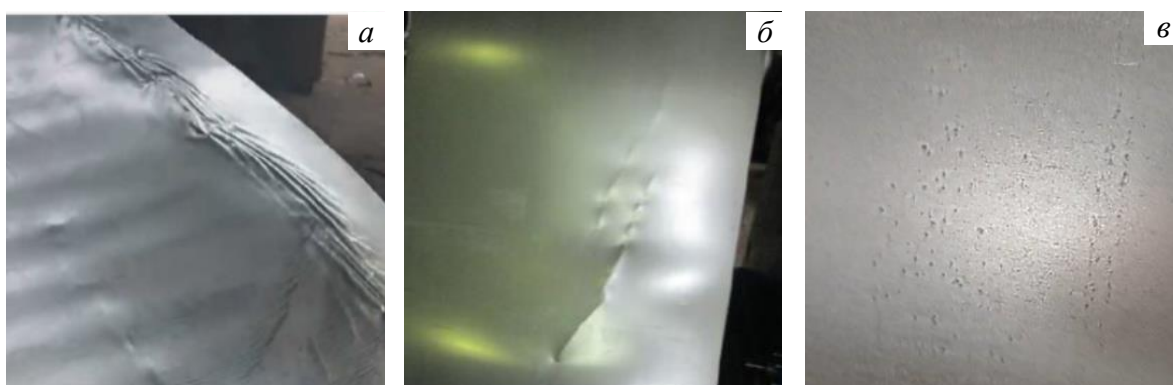


Рисунок 3.6 – Дефекты оцинкованной полосы:

а, б – «порезы с печи»; *в* – дросс

Дефект «порезы с печи» связан с образованием глубоких продольных складок (рисунок 3.6, *а*) или надрывов металла (рисунок 3.6, *б*) под воздействием высокой температуры в печи и натяжения полосы, имеющей отклонения от плоскостности. Дефект «дросс» (рисунок 3.6, *в*) представляет

включения частиц интерметаллидных фаз Fe-Zn, возникающих на поверхности оцинкованной полосы из-за нарушения гидродинамики цинковой ванны, вызванной неравномерным движением волнистой полосы. Механические повреждения в виде задигов, царапин и вмятин возникают из-за прямого контакта участков полосы с нарушением плоскостности и узлами оборудования при движении по линии агрегата. Кроме того, локальные отклонения формы (особенно коробоватость) резко уменьшают площадь контакта полосы с барабанами центрирующих устройств, что снижает их эффективность и ведет к значительным боковым смещениям (уводам) полосы с технологической оси. Уводы полосы – серьезная проблема и прямая причина возникновения многих дефектов, включая складки и механические повреждения.

Основным индикатором, предопределяющим риск возникновения дефектов на линии цинкования, является распределение удельных натяжений (остаточных напряжений) в холоднокатаной полосе, формирующееся в процессе прокатки и напрямую определяющее ее плоскостность [3–5, 23, 49, 50, 66–69]. Однако установление количественной зависимости между конкретными параметрами горячекатаного подката и характеристиками результирующей эпюры натяжений или непосредственно измеряемой плоскостностью остается сложной научно-практической проблемой. Основные трудности связаны с многофакторностью и нелинейностью процесса холодной прокатки и отсутствием общепринятых эмпирических моделей, связывающих геометрию подката с распределением остаточных напряжений по ширине, а следовательно, и с конечным качеством готового проката. Как следствие, проблемы управления плоскостностью на непрерывном стане и минимизации связанных дефектов на стадии цинкования влекут за собой значительные затраты на коррекцию и, как итог, снижение эффективности производства и качества продукции.

Разработка модели интегрального показателя качества подката X выполнена на основе комплексного анализа влияния параметров геометрии и параметров горячей прокатки с привлечением методов статистического анализа и машинного обучения больших промышленных данных [115].

Исследование базировалось на анализе технологической цепочки непрерывного стана горячей прокатки 2000 и последующей переработки полученных рулонов на 4-клетевом непрерывном стане холодной прокатки ПАО «Северсталь».

Исходный массив данных включал свыше 500 параметров, детально характеризующих геометрию горячекатаного подката, регистрируемую профилометром стана 2000, режимы горячей и холодной прокатки, а также показатели плоскостности холоднокатаной полосы, фиксируемые роликом после клетки № 4.

Для широкой автолистовой стали, особенно IF-стали, из-за ее исключительно высокой пластичности, характерны локальные потери устойчивости при прокатке. Поэтому были физически обоснованы и выделены следующие типы неплоскостности, основанные на механизме возникновения и геометрическом масштабе: 1 – локальное отклонение шириной свыше 300 мм (заменяет для IF-стали понятие «общий короб», соответствует потери устойчивости плоской формы на широком участке полосы); 2 – локальное отклонение шириной от 120 мм до 300 мм включительно (при недостаточной локальной жесткости полосы на узком участке); 3 – волна (критические сжимающие напряжения на краевых участках полосы). 0 – отсутствие дефекта: участки с равномерным распределением удельного натяжения и отсутствием зон критических напряжений.

Пример измеренного профиля горячекатаной полосы представлен на рисунок 3.7, *а*. Для пояснения основных геометрических параметров поперечного профиля на рисунке 3.7, *б* представлена его схема.

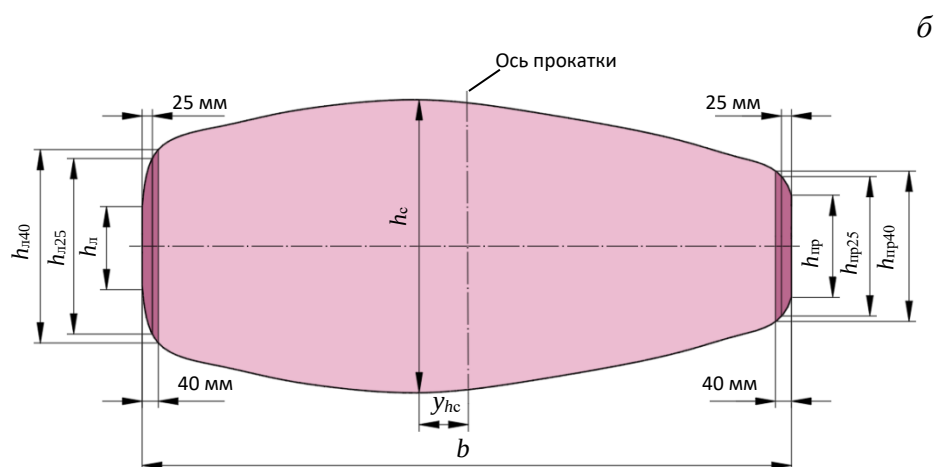
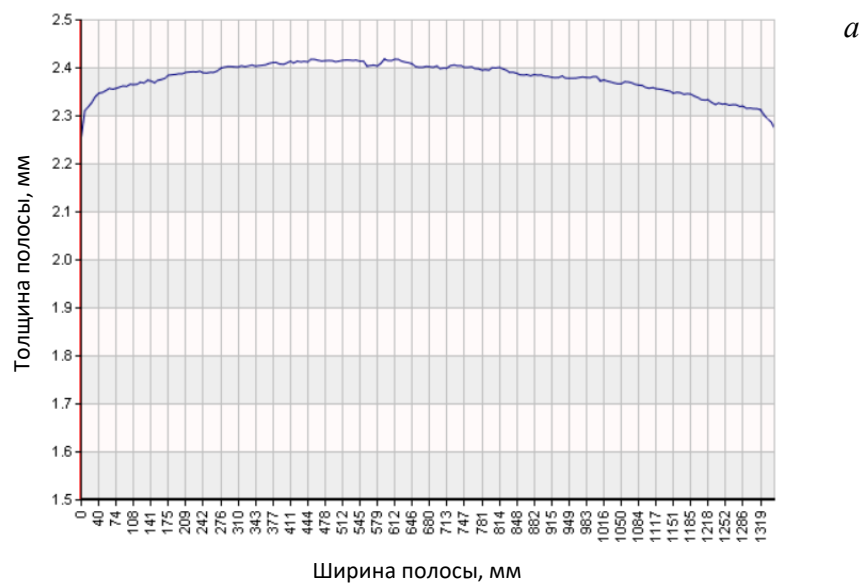


Рисунок 3.7 – Фактический профиль горячекатаной полосы – *a*,
параметры поперечного профиля полосы – *б*

Фактический профиль горячекатаной полосы характеризуется следующими геометрическими показателями, мм:

– смещение вершины профиля от оси прокатки y_{hc} ;

– поперечная разнотолщинность, определяемая в соответствии с требованиями промышленного стандарта:

$$\delta h_{\text{поп}} = h_{\text{с}} - (h_{\text{л40}} + h_{\text{пр40}})/2, \quad (3.1)$$

где $h_{\text{с}}$ – толщина полосы в середине с учетом смещения вершины профиля; $h_{\text{л40}}$ и $h_{\text{пр40}}$ – толщины у левой и правой кромок на расстоянии 40 мм от каждой кромки;

– клиновидность поперечного профиля:

$$\delta w_{\text{поп}} = h_{\text{л40}} - h_{\text{пр40}}; \quad (3.2)$$

– клиновидность левой и правой кромок

$$\delta w_{\text{л}} = h_{\text{л40}} - h_{\text{л25}} \text{ и } \delta w_{\text{пр}} = h_{\text{пр40}} - h_{\text{пр25}}, \quad (3.3)$$

где $h_{\text{л25}}$ и $h_{\text{пр25}}$ – толщины у левой и правой кромок на расстоянии 25 мм от каждой кромки.

На схеме б рисунка 3.7 кроме перечисленных обозначений показано: $h_{\text{л}}$ и $h_{\text{пр}}$ – толщины левой и правой кромок полосы и ее ширина b .

Обработка данных выполнена по методике, описанной в разделе 2.3, с использованием средств языка Python и специализированных библиотек машинного обучения и статистического анализа. Принцип обработки заключался в классификации по типам неплоскостности и изоляции сигналов от дефектных участков рулонов для исключения влияния «хороших» зон на чистоту анализа. Рассматривался сортамент холоднокатаных полос толщиной 0,59–0,7 мм и шириной 1400–1640 мм, произведенных из горячекатаного подката толщиной 2,3–2,75 мм.

Для выявления наиболее значимых параметров, влияющих на интегральный показатель качества подката X , и построения прогнозной модели применен комплексный аналитический подход (корреляционный и факторный анализ, L1-регуляризация), подробно описанный в п. 2.3. Сравнительный анализ прогнозной эффективности построенных моделей

линейной регрессии и градиентного бустинга показал, что модель на основе градиентного бустинга обладает максимальной прогностической точностью, подтверждая наличие в данных сложных нелинейных зависимостей и определяя теоретический предел точности прогноза. Однако для задач оперативного управления в контуре АСУ ТП критическими являются не только точность, но также интерпретируемость, вычислительная эффективность, устойчивость к переобучению и стабильность работы на новых данных.

Таким образом, в качестве итогового решения была выбрана линейная регрессионная модель. Ее вид представлен ниже:

$$X = -0,7947 - 10,5704 \cdot \delta w_{\text{лmin}} + 0,0024 \cdot y_{\text{hmax}} - 2,5099 \cdot \delta w_{\text{прmin}} + 0,82 \cdot b + \\ + 0,0007(T_{\text{кпср}} - T_{\text{смср}}), \quad (3.4)$$

где $\delta w_{\text{лmin}}$ – минимальный левый клин полосы, мм; y_{hmax} – максимальное смещение вершины поперечного профиля полосы, мм; $\delta w_{\text{прmin}}$ – минимальный правый клин полосы, мм; b – ширина полосы, мм; $T_{\text{кпср}}$ – средняя температура конца прокатки, °C; $T_{\text{смср}}$ – средняя температура смотки, °C.

Коэффициент детерминации разработанной линейной регрессионной модели при уровне значимости $p < 0,01$ составил $R^2 = 88\%$, что свидетельствует о высокой степени соответствия уравнения опытным данным и его статистической значимости.

Наличие в модели (3.4) разности температур $(T_{\text{кпср}} - T_{\text{смср}})$ свидетельствует о влиянии термомеханического режима горячей прокатки на структурное состояние подката, определяющее его поведение при холодной деформации. Отсутствие в формуле параметра «выпуклость профиля поперечного сечения» указывает, что для широких полос из IF-стали проявление дефектов формы связано с локальной неплоскостностью. Данный эффект корректно отражается через асимметрию профиля – «клинья» и смещение вершины.

Для проверки и анализа модели были использованы данные 69 рулонов. Статистика предикторов и показателя X представлена в таблице 3.2. Смещение вершины поперечного профиля полосы и значения левого и правого клина профиля демонстрируют высокую вариативность, что указывает на нестабильность геометрии подката.

Доля дефектных полос составляла 79,7% с преобладанием локальных отклонений. Был выявлен критический фактор риска неплоскостности – асимметрия поперечного профиля подката.

Таблица 3.2 – Статистика предикторов и показателя X

Параметр	Min	Max	Среднее значение	Стандартное отклонение
$\delta w_{\text{лmin}}$, мм	-0,00796	0,00517	-0,001	0,00313
$y_{\text{сmax}}$, мм	-81	208	28,4	50,3
$\delta w_{\text{прmin}}$, мм	-0,010	0,014	0,0000161	0,00483
b , мм	1408	1638	1534	86,4
$(T_{\text{кпер}} - T_{\text{смер}})$, °C	152,0	222,5	175,1	16,14
X	1154	1343	1257	70,82

На рисунке 3.8 представлено распределение полос по типам дефектов в зависимости от абсолютной разности средних значений модулей левого и правого клина $|\delta w_{\text{ср}}|$, где $|\delta w_{\text{ср}}| = |\delta w_{\text{лminср}}| - |\delta w_{\text{прminср}}|$. В отличие от бездефектных полос (тип 0, $|\delta w_{\text{ср}}| = 0$ мм), дефектные полосы характеризовались измеримой асимметрией $|\delta w_{\text{ср}}|$, максимальной (0,00175 мм) для типа 2.

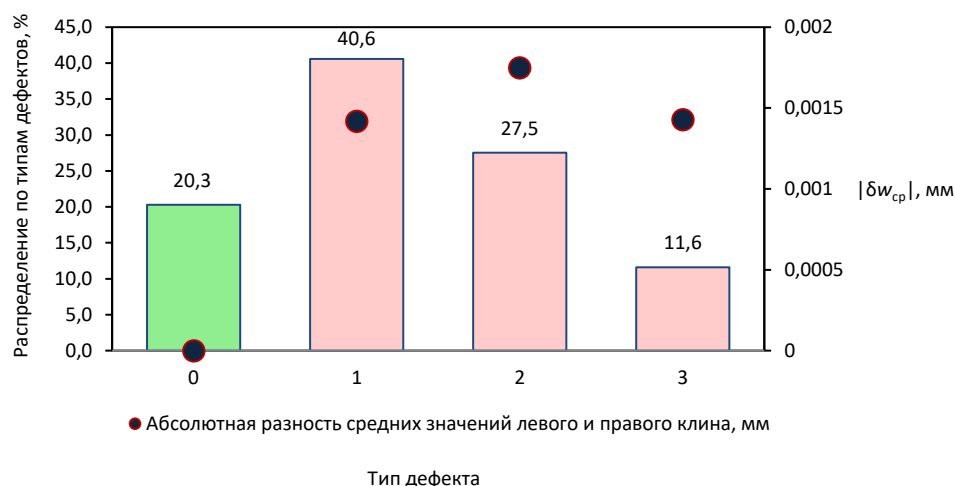


Рисунок 3.8 – Распределение полос по типам дефектов и абсолютной разности средних значений левого и правого клина

На рисунке 3.9 представлена диаграмма размаха распределения асимметрии профиля $|\delta w|$ по группам качества. Дефектные группы демонстрируют статистически значимое увеличение медианных значений $|\delta w|$: для отклонений шириной свыше 300 мм (тип 1) медиана составляет 0,0023 мм с максимумом 0,0068 мм; для локальных отклонений шириной 120-300 мм (тип 2) – медиана равна 0,0025 мм с максимальным выбросом 0,0117 мм; для волны (тип 3): медиана составляет 0,0027 мм с пределом 0,0063 мм. Бездефектные полосы (тип 0) характеризуются минимальной асимметрией профиля (медиана 0,0018 мм). Наличие единственного значимого выброса (0,0045 мм) в этой группе может указывать на то, что в отдельных случаях влияние асимметрии профиля на неплоскостность компенсируется другими технологическими факторами.

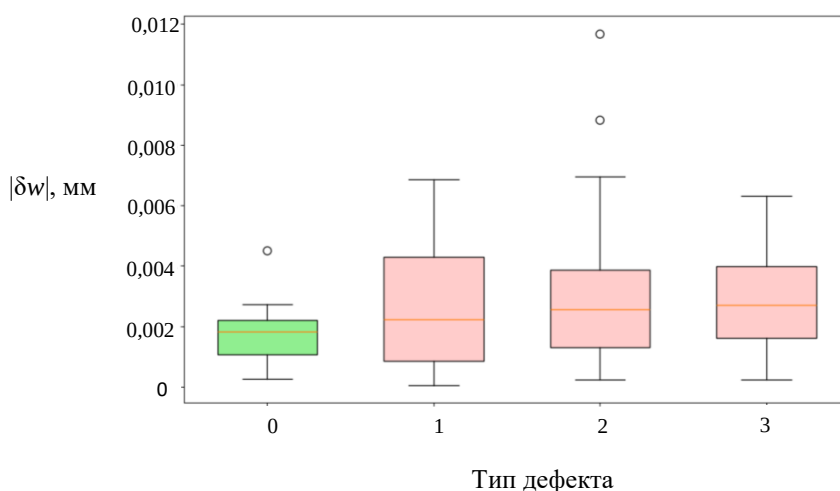


Рисунок 3.9 – Диаграмму размаха распределения асимметрии профиля $|\delta w|$ по группам качества

На рисунке 3.10 в качестве примера приведены распределения средних значений удельных натяжений по ширине холоднокатаных полос, полученные за клетью № 4 стана холодной прокатки. Средние значения рассчитаны по всей длине полос по данным со стресс-ролика. Распределение 1 соответствует полосе без дефектов геометрии, распределение удельных напряжений 2 – полосе с локальным отклонением шириной свыше 300 мм, смещенное к левой кромке, 3 – полосе с локальным отклонением шириной от 120 мм до 300 мм с правосторонней волной. Номинальная ширина полос составляла 1628 мм.

Анализ показывает, что полоса без дефектов 1 характеризуется меньшим разбросом натяжений по ширине по сравнению с дефектными полосами 2 и 3, на эпюрах которых наблюдаются ярко выраженные участки растяжения и сжатия.

Сопоставление распределений натяжений для дефектных полос (2 и 3 рисунка 3.10) с параметрами их горячекатаного подката (таблица 3.3) выявило недостаточную эффективность текущих настроек систем CVC и WRB стана холодной прокатки для компенсации дефектов геометрии подката.

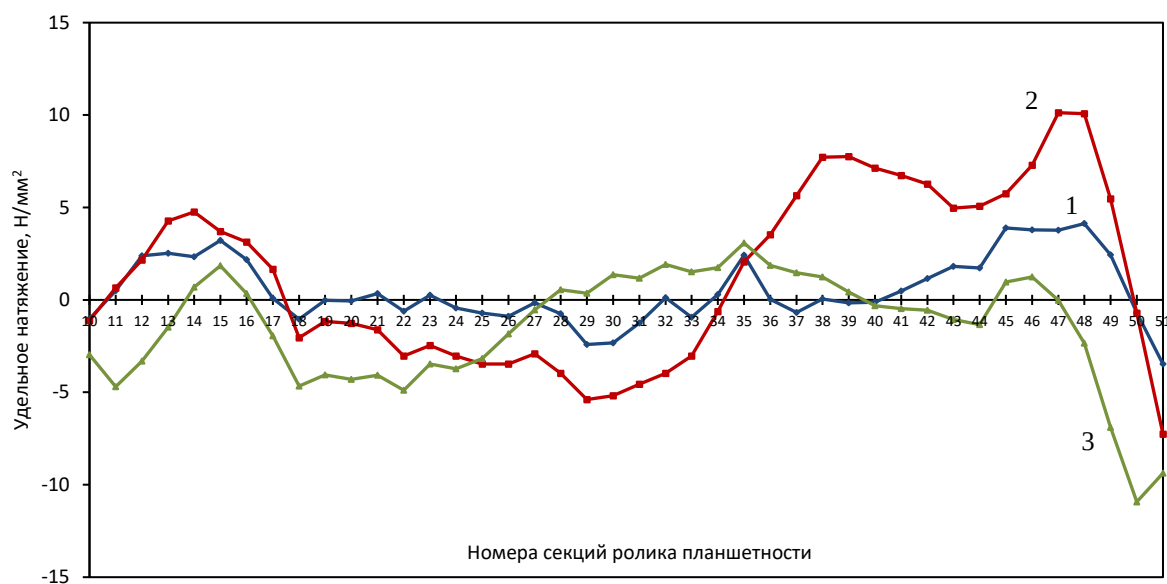


Рисунок 3.10 – Распределение средних значений удельных натяжений холоднокатаных полос (данные с ролика планшетности)

Таблица 3.3 – Параметры горячекатаного подката (для примеров рисунка 3.10)

Параметр	Тип дефекта		
	Без дефекта	Локальное отклонение шириной свыше 300 мм	Локальное отклонение шириной до 300 мм с правосторонней волной
$\delta w_{\text{лmin}}$, мм	0,00285	0,00387	-0,00335
$\delta w_{\text{прmin}}$, мм	0,005	-0,001	-0,003
$ \delta w = \delta w_{\text{лmin}} - \delta w_{\text{прmin}} $, мм	0,00215	0,00287	0,00035
$y_{\text{сmax}}$, мм	69	4	-21
b , мм	1628		
$(T_{\text{кпер}} - T_{\text{смер}})$, °C	157	165	166
X	1334,40	1334,25	1334,27

Данные таблицы 3.3 демонстрируют, что даже при одинаковой ширине b и близких значениях показателя X различная геометрия профиля подката (значения левого и правого клина, смещение вершины) определяет наличие или отсутствие дефектов в холоднокатаной полосе. Минимизация $|\delta w|$ важна,

но недостаточна: полоса с распределением удельных натяжений 2 имеет высокий $|\delta w| = 0,00287$ мм, а полоса с распределением 3 и с локальным отклонением шириной от 120 мм до 300 мм с правосторонней волной – очень низкий $|\delta w| = 0,00035$ мм, но обе дефектны. В этом случае контроль положения вершины профиля $y_{h\max}$ является критичным: смещение вершины, особенно в отрицательную сторону ($y_{h\max} = -21$ мм для полосы с распределением натяжений 3 на рисунке 3.10), является значимым фактором риска возникновения дефектов даже при благоприятных значениях других параметров, как низкий $|\delta w|$.

Хотя перепад температур ($T_{\text{ксп}} - T_{\text{смср}}$) статистически значимо влияет на показатель X (вклад в модель подтвержден уравнением (3.4)), его физическая интерпретация отличается от влияния геометрических параметров $\delta w_{\min}$, $y_{h\max}$, $\delta w_{\text{прmin}}$ и b . Геометрические параметры напрямую определяют распределение напряжений и устойчивость полосы при прокатке. Влияние же перепада температур обусловлено иными механизмами: он воздействует через возникновение внутренних напряжений из-за неравномерного охлаждения, повышение уровня остаточных напряжений в полосе, а также влияние на фазовые превращения и формирование структуры стали. Данные примеры показывают, что при схожих значениях X и b именно различия в геометрии профиля являются основными факторами возникновения дефектов плоскостности при холодной прокатке.

В рамках проведенного анализа влияния параметров подката на плоскостность были получены следующие основные результаты:

1. Установлено, что асимметрия поперечного профиля горячекатаного подката, характеризуемая разностью значений левого и правого клина $|\delta w|$, является значимым фактором риска возникновения различных типов неплоскостности в холоднокатаной полосе. Дефектные полосы демонстрируют достоверно более высокие медианные значения $|\delta w|$ по сравнению с бездефектными.

2. Разработанный интегральный показатель качества подката X , обладающий высокой статистической значимостью, не заменяет необходимости жесткого контроля индивидуальных геометрических параметров. Важным остается контроль положения вершины профиля (особенно при ее отрицательном смещении), а также анализ асимметрии клина ($\delta w_{\text{лmin}}$, $\delta w_{\text{прmin}}$, $|\delta w|$) и их комбинаций, напрямую влияющих на распределение натяжений и риск дефектов.

3. Сравнительный анализ распределений удельных натяжений и геометрии подката выявил принципиальные ограничения текущих алгоритмов систем CVC и WRB. Существующие настройки оказываются недостаточно эффективными для компенсации значительного смещения вершины профиля и сложных асимметрий, что подтверждает необходимость разработки адаптивных стратегий управления этими системами для нейтрализации сложных дефектов геометрии подката.

3.3 Способ предварительной настройки параметров CVC и WRB для обеспечения плоскостности полос из IF-стали

Анализ существующих исследований и промышленной практики управления плоскостностью выявил, что до настоящего времени не решена ключевая задача: как заранее, до начала прокатки конкретного рулона, рассчитать и установить оптимальные начальные уставки систем активного воздействия CVC и WRB на многоклетевом стане. Это необходимо для гарантированного получения полосы с требуемой плоскостностью и предотвращения технологического брака на последующих операциях (отжиг, цинкование).

В связи с этим разработан и апробирован способ прогнозной начальной настройки параметров CVC и WRB. Его основой является интегральный показатель качества подката X (раздел 3.2), количественно оценивающий

технологическую наследственность рулона и связанный с ней риск нарушения плоскостности. Апробация способа выполнена на действующем промышленном 4-клетевом стане холодной прокатки ПАО «Северсталь» (рисунок 2.2).

Анализ производственных данных и технологических режимов стана выявил трудности в обеспечении требуемой плоскостности широких полос при прокатке IF-сталей. Эти трудности обусловлены особенностями данного класса сталей. При сверхнизком содержании углерода и азота ($C < 0,005\%$, $N < 0,004\%$) и микролегировании Ti и Nb, углерод и азот полностью связываются в стабильные карбонитриды [116, 117]. Это исключает наличие растворенных межузельных атомов C и N в решетке железа – атомов, блокирующих движение дислокаций и обеспечивающих упрочнение в обычных низкоуглеродистых сталях. Такое отсутствие межузельных атомов приводит к тому, что IF-стали обладают низким пределом текучести и исключительно высокой пластичностью. Любая неоднородность в распределении напряжений по ширине полосы, вызванная субоптимальной настройкой профилировки CVC и усилий WRB или другими возмущающими факторами, неизбежно приводит к нарушению плоскостности. Таким образом, управление плоскостностью при прокатке IF-сталей, особенно шириной свыше 1400 мм, представляет собой особо сложную технологическую задачу, требующую прецизионного управления.

Разработка нового способа базировалась на комплексном анализе работы стана в различных режимах управления системами CVC и WRB с обязательной фиксацией параметров горячекатаного подката и его прокатки на непрерывном стане 2000 ПАО «Северсталь», а также соответствующих уставок стана холодной прокатки. Исследовались два основных режима управления плоскостностью на 4-клетевом стане: автоматическом и ручном. В обоих вариантах использовались стандартные шаблоны обжатий и натяжений при прокатке стальных полос толщиной 0,59–0,7 мм шириной

1400–1800 мм из стали IF. Условия деформирования были с максимальным единичным обжатием в клетях № 2. В клетях № 1 диапазон обжатий составлял 39–45%, в клетях № 3 – 27–35% и в клетях № 4 – 4–7%. Для минимизации утяжек полос применялось равномерное распределение межклетевых удельных натяжений с учетом токовых нагрузок на привода. Значения межклетевых удельных натяжений на выходе из клетей составляли 20–30% от фактического сопротивления деформации в клетях. Скорость прокатки ограничивалась 15 м/с. Такие условия деформирования направлены на равномерную загрузку по клетям и регламентацию показателей качества поверхности и точности размеров холоднокатаных полос. Для поддержания точности профиля CVC калибровка валков выполнялась после 100 т прокатанного металла.

В режиме автоматического управления плоскостностью величины сдвижки CVC рабочих валков (рисунок 2.3) во всех клетях задавались автоматикой по сигналам обратной связи с измерительных роликов, расположенных после клетей № 1 и клетей № 4 (рисунок 2.2).

Клеть № 1 определяет формирование базового профиля в условиях высокого единичного обжатия, а клеть № 4 важна как последняя точка коррекции профиля при минимальном обжатии. Изменение профиля в клетях № 1 нежелательно, так как нарушает унаследованную геометрию подката, что для IF-сталей мгновенно ведет к потере плоскостности из-за неравномерного удлинения по ширине.

Выявленные проблемы при прокатке IF-сталей состояли в том, что автоматика не успевала эффективно компенсировать «наследственность» дефектов подката на старте прокатки рулона в клетях № 1, особенно для полос шириной свыше 1400 мм. Кроме того, система не всегда обеспечивала оптимальную корректировку поперечного профиля полосы. В клетях № 4 высокое сопротивление деформации более 780–800 МПа делало коррекцию профиля во время прокатки сложной и запаздывающей.

В режиме ручного управления автоматика была отключена для системы CVC1 в клети № 1, чтобы сохранить поперечную форму подката, а также для систем CVC4 и WRB4 в клети № 4, поскольку коррекция профиля при высоком сопротивлении деформации в этой клети была сложной. Параметры для этих систем оператор задавал вручную, руководствуясь своим опытом и общими рекомендациями.

Анализ работы систем автоматического и ручного управления, эмпирические данные по отклонению вытяжек полос из IF-стали с ролика после клети № 1 и логика профилировки валков с учетом фактической выпуклости профиля позволил установить следующие ограничения: осевая сдвигка рабочих валков CVC: клети № 1-3 – ± 10 мм; клеть №4 – $-60...+10$ мм; усилие гидравлического изгиба рабочих валков во всех клетях: ± 200 кН (положительные значения – противоизгиб, отрицательные – дополнительный изгиб).

Проблемы автоматического управления и практика частичного ручного управления показали технологическую необходимость разработки формализованного способа. Он должен сохранять преимущество ручного предварительного задания в клети № 4 осевого смещения S_{CVC4} и усилия изгиба F_{WRB4} , при этом учитывать рекомендации и ограничения по работе CVC на основе количественной оценки параметров конкретного горячекатаного подката X. Рассчитанные параметры должны автоматически соответствовать допустимым диапазонам работы стана, обеспечивать стабильное качество IF-стали и минимизировать риск дефектов плоскостности за счет учета специфики подката.

Разработка способа базировалась на анализе промышленных данных при обработке 180 рулонов IF-стали на технологической цепочке непрерывного стана горячей прокатки 2000 и 4-клетевого стана холодной прокатки 2100 ПАО «Северсталь».

Расчет начальных настроек осевого смещения CVC-валков целенаправленно был сфокусирован на клетях № 3 и № 4. В клетях № 3 формируется профиль полосы перед финальной клетью и позволяет снижать нагрузку на F_{WRB4} . Клеть № 4 обладает максимальной чувствительностью, здесь минимальное обжатие, высокое сопротивление деформации полосы, и выполняется окончательная коррекция распределения давлений и остаточных напряжений, непосредственно определяя плоскостность перед смоткой. Предварительная настройка S_{CVC4} и F_{WRB4} дает максимальный эффект. Для клеток № 1 и № 2 параметры значения сдвижки CVC рекомендованы в диапазоне ± 10 мм для исключения активной коррекции профиля в этих клетях, особенно для широких полос из IF-стали. Значительное положительное смещение S_{CVC1} начинает активно «вытягивать» середину, а отрицательное значение S_{CVC1} приводит к вытяжке кромки, нарушая равномерность деформации и провоцируя потерю плоскостности. Технологическая практика стана и отключение автоматики подтверждало, что стабильность и минимальное вмешательство в клетях № 1 являются оптимальной стратегией. Кроме того, после значительного единичного обжатия 39–45% в клетях № 1 сопротивление деформации резко возрастает свыше 480 МПа, существенно ограничивая возможности эффективного управления профилем и в клетях № 2. Попытки радикальной коррекции здесь часто приводят к дисбалансу натяжений. Поэтому вводимый интегральный показатель качества подката X позволяет адаптировать настройки последующих клеток S_{CVC3} , S_{CVC4} и F_{WRB4} к особенностям подката, компенсируя его «наследственность» именно там, где это технически возможно и эффективно – в клетях № 3 и № 4.

Исходный массив данных включал свыше 500 параметров, детально характеризующих геометрию горячекатаного подката, регистрируемую профилометром стана 2000, режимы горячей и холодной прокатки, а также показатели плоскостности холоднокатаной полосы, фиксируемые роликом

после клетки № 4 и классифицированные по следующим типам дефектов, соответствующим их физическому проявлению: 0 – нет дефекта, 1 – локальное отклонение шириной свыше 300 мм, 2 – локальное отклонение шириной 120-300 мм, 3 – волна. На рисунке 3.7 представлены ключевые параметры профиля подката.

С использованием модели интегрального показателя качества подката X (формула (3.4)) методами машинного обучения были получены регрессионные уравнения для расчета оптимальных начальных значений параметров управления плоскостностью в клетях № 3 и № 4 [119]:

$$S_{CVC4} = (0,64 - 0,94 \cdot X) / 81,1, \quad (3.5)$$

$$S_{CVC3} = (0,22 - 0,00007 \cdot X + 0,0078 \cdot S_{CVC4}) / 0,0077, \quad (3.6)$$

$$F_{WRB4} = (-0,07 - 0,00003 \cdot X + 0,0033 \cdot S_{CVC3} + 0,0033 \cdot S_{CVC4}) / 0,0007, \quad (3.7)$$

где S_{CVC4} – величина осевой сдвижки рабочих валков последней клетки № 4 стана, мм; S_{CVC3} – величина осевой сдвижки рабочих валков предпоследней клетки № 3 стана, мм; F_{WRB4} – величины усилия гидроизгиба рабочих валков, кН.

Общая логика разработанного способа основывалась на предварительном (до начала прокатки рулона) последовательном расчете управляющих параметров для систем CVC и WRB ключевых клеток стана холодной прокатки на основе комплексной оценки качества поступающего горячекатаного подката. Последовательность расчета строго определена:

1. Расчет интегрального показателя качества подката X на основе измеренных параметров горячекатаной полосы и параметров горячей прокатки.

2. Расчет величины смещения рабочих валков последней клетки S_{CVC4} на основе значения X .

3. Расчет величины смещения валков предпоследней клетки S_{CVC3} с использованием значений X и рассчитанного S_{CVC4} .

4. Расчет величины усилия изгиба валков последней клетки F_{WRB4} на основе значений X , S_{CVC4} и S_{CVC3} .

Апробация разработанного способа предварительной настройки параметров CVC и WRB проводилась на промышленном 4-клетевом стане холодной прокатки при производстве высококачественного автолиста из IF-стали (ширина 1400-1640 мм, толщина 0,59-0,7 мм). Для каждого прокатываемого рулона горячекатаного подката перед началом холодной прокатки рассчитывался интегральный показатель его качества X по уравнению (3.4). На основе значения X последовательно определялись оптимальные начальные установки: осевое смещение валков в клетки № 4 S_{CVC4} по формуле (3.5), осевое смещение валков в клетки № 3 S_{CVC3} по формуле (3.6) и усилие гидравлического изгиба рабочих валков в клетки № 4 F_{WRB4} по формуле (3.7). Значения уставок S_{CVC1} и S_{CVC2} – в пределах ± 10 мм.

Настройка стана перед прокаткой конкретного рулона включала задание осевых сдвижек по клетям и усилия изгиба в клетки № 4. Плоскостность полученной холоднокатаной полосы фиксировалась измерительным роликом после клетки № 4 и дополнительно контролировалось после агрегата оцинкования.

В таблице 3.4 представлены исходные параметры горячекатаного подката, использованные для расчета показателя X в семи экспериментальных прокатках.

Таблица 3.4 – Исходные параметры горячекатаного подката для расчета условного показателя качества X

№ варианта	Ширина полосы b , мм	Минимальный левый клин полосы $\delta w_{\text{лmin}}$, мм	Минимальный правый клин полосы $\delta w_{\text{прmin}}$, мм	Максимальное смещение вершины поперечного профиля полосы $u_{\text{нmax}}$, мм	Средняя температура конца прокатки $T_{\text{кпер}}$, °C	Средняя температура скотки $T_{\text{смер}}$, °C	Интегральный показатель качества подката X
1	1579	-0,002	-0,003	11	924	734	1351
2	1590	0,000	-0,007	-15	919	736	1331
3	1534	0,001	0,001	29	902	741	1280
4	1430	0,000	0,012	22	888	683	1187
5	1590	-0,001	-0,003	-53	904	744	1349
6	1430	-0,001	-0,006	64	911	735	1167
7	1590	-0,002	0,001	-59	893	675	1339

Таблица 3.5 содержит параметры прокатки и ее результаты: для вариантов 1-5 в столбцах S_{CVC4} , S_{CVC3} , F_{WRB4} указаны значения, рассчитанные по формулам (3.5)–(3.7) предложенного способа и установленные перед прокаткой; для вариантов 6 и 7 (ранее использованная технология) эти значения установлены автоматикой стана без использования данного способа. Фактические значения осевой сдвижки S_{CVC1} и S_{CVC2} во всех вариантах 1-7 зафиксированы по показаниям оборудования с учетом данных обратной связи с ролика после клетки № 1. В вариантах 1-5 критичные отклонения геометрии отсутствуют, вариант 6 – имел локальное отклонение шириной свыше 300 мм (тип дефекта 1) и волну (тип дефекта 3), вариант 7 – локальное отклонение шириной свыше 300 мм (тип дефекта 1).

Таблица 3.5 – Результаты расчета параметров настройки, установленные параметры и качество прокатки

Группа режимов	№ варианта	Параметры настройки критических клеток			Результат прокатки
		S_{CVC3} , мм	S_{CVC4} , мм	F_{WRB4} , кН	
Режимы с прогнозной настройкой	1	0	-16	-230	Годный
	2	1	-15	-226	Годный
	3	2	-15	-216	Годный
	4	4	-14	-197	Годный
	5	0	-16	-229	Годный
Режимы с базовой настройкой	6	89	-2	-51	Локальное отклонение шириной свыше 300 мм с волной
	7	-5	-39	207	Локальное отклонение шириной свыше 300 мм

Для сравнения был проведен анализ настроек варианта 1 (новый способ) и варианта 7 (базовая технология). В варианте 1 положительная сдвигка в клетки № 1 $S_{CVC1} = 15$ мм направлена на вытягивание центра полосы в сравнении с кромками. Фактическое значение сдвигки, хоть и отклонилось от регламентированного, но незначительно, а значит система управления старалась не увеличивать величину S_{CVC1} . В клетки № 2 смещение $S_{CVC2} = -11$ мм направлено на компенсацию поперечного профиля и риска коробоватости. В клетки № 3 $S_{CVC3} = 0$ стабилизирует профиль после компенсирующего воздействия в клетки № 2. В клетки № 4 $S_{CVC4} = -16$ мм направлено на снижение деформаций в середине и исключения избыточной вытяжки центра полосы с усиленным воздействием на кромки

дополнительным изгибом $F_{WRB4} = -230$ кН. Такая комбинация эффективно подавляет остаточный риск центральной волнистости (коробоватости), сформированный на начальном этапе прокатки. Она выравнивает распределение вытяжек по ширине, обеспечивая равномерность деформации и, как следствие, хорошую плоскостность.

В варианте 7 увеличенная сдвигка $S_{CVC1} = 24$ мм в клетке № 1 формирует увеличение вытяжки в середине. В клетке № 2 фиксируется еще большая положительная сдвигка с риском центральной волнистости (коробоватости) из-за перерастяжения центра. Учитывая высокое сопротивление после обжатия 42% в клетке № 1 такая коррекция является рискованной и малоэффективной. В клетке № 3 смещение $S_{CVC3} = -5$ мм направлено на компенсацию воздействий в предыдущих клетках, а настройка клетки № 4 – на компенсацию всего, что было сделано системой в предыдущих клетках: увеличение величины отрицательной сдвигки $S_{CVC4} = -39$ мм для снижения воздействия в середине, снижение давления в зоне кромок $F_{WRB4} = 207$ кН, исходя из обратной связи по ролику за клетку № 4. Этот подход не позволил реализовать управление плоскостностью широкой полосы для исключения дефектов геометрии.

Таким образом, вариант 7 демонстрирует основной недостаток базовой стратегии управления плоскостностью широких полос: сильный дисбаланс отклонений натяжений по ширине и нестабильность обеспечения плоскостности. Анализ его уставок показывает их существенное отклонение от параметров, рекомендуемых новым способом, и потенциальную нерациональность, так как все величины осевых сдвижек имеют широкий разброс. Это же можно сказать и про вариант 6. Все это показывает неэффективность начальных настроек для коррекции выпуклости поперечного профиля широких полос.

Что касается геометрии подката, то определяющими факторами риска являются рост величины смещения $y_{h\max}$, асимметрии левого и правого клина

через оценку $\delta w_{\text{лmin}}$, $\delta w_{\text{прmin}}$ и абсолютной разности значений модулей левого и правого клина $|\delta w_{\text{ср}}|$, где $|\delta w_{\text{ср}}| = |\delta w_{\text{лminср}}| - |\delta w_{\text{прminср}}|$. Результаты экспериментов доказали результативность нового способа (варианты 1–5) для широкого спектра геометрических характеристик подката.

Критический анализ данных (таблицы 3.3 и 3.4) показал основное преимущество разработанного способа: он обеспечивает стабильное качество прокатки даже при существенных отклонениях геометрии подката. Подтверждением является вариант 4, где при высокой асимметрии клиньев $|\delta w_{\text{ср}}| = 0,012$ мм был получен годный прокат. Напротив, в вариантах 6 и 7 с меньшей асимметрией $|\delta w_{\text{ср}}| = 0,005$ и $0,001$ мм при прокатке по базовой технологии возникли дефекты. Еще более показательное сравнение вариантов 5 и 7: несмотря на сопоставимую величину смещения вершины профиля ($y_{\text{hmax}} = -53$ мм и $y_{\text{hmax}} = -59$ мм), только применение расчетных параметров S_{CVC4} , S_{CVC3} и F_{WRB4} (вариант 5) гарантировало отсутствие дефектов. Это доказывает, что решающим фактором качества является стратегия управления, основанная на количественной оценке подката через показатель X . Базовые же алгоритмы инициализации CVC и WRB, не учитывающие специфику подката, провоцируют нестационарные режимы работы системы автоматического регулирования плоскостности (пример варианта 7: $F_{\text{WRB4}} = 207$ кН вместо требуемых отрицательных значений), что снижает ресурс оборудования и эффективность коррекции.

Промышленные испытания способа подтвердили, что расчет уставок осевого смещения валков в клетях № 3 и № 4 и усилия изгиба в последней клетки по формулам (3.5)–(3.7) позволяет эффективно компенсировать унаследованную асимметрию профиля подката и минимизировать риск дефектов, включая случаи с неблагоприятной геометрией. Интеграция разработанного алгоритма в технологический график стана открывает возможность перехода к прогнозному управлению качеством плоскостности,

что подтверждается получением годной продукции в экспериментальных прокатках (варианты 1–5).

Предложенный способ предварительной настройки систем CVC и WRB, базирующийся на количественной оценке качества горячекатаного подката с помощью показателя X , показал, что обеспечивает гарантированное получение холоднокатаных полос из IF-стали с требуемой плоскостностью. Новизна решения подтверждена патентом РФ на изобретение № 2827016 [118].

3.4 Перспективы развития прогнозного подхода к настройке систем CVC и WRB на основе машинного обучения

Результаты, полученные в разделах 3.2 и 3.3, показали эффективность использования интегрального показателя качества подката X для прогнозной настройки систем CVC и WRB при прокатке высокопластичных IF-сталей. Логичным развитием данного подхода является его распространение на другие классы сталей (такие как HSLA, DP, CP), а также применение методов машинного обучения для повышения адаптивности и точности управления. В этом случае предлагаемый подход может быть реализован в виде трех последовательных этапов (рисунок 3.11), образующих замкнутый цикл управления качеством [120]: этап 1 – построение модели машинного обучения (Machine Learning, ML) для расчета интегрального показателя качества горячекатаного подката; этап 2 – прогноз начальных уставок систем CVC и WRB с использованием ML-моделей, обученных на исторических режимах прокатки с подтвержденными параметрами плоскостности; этап 3 – промышленную прокатку с применением рассчитанных уставок и последующий сбор данных о качестве продукции.

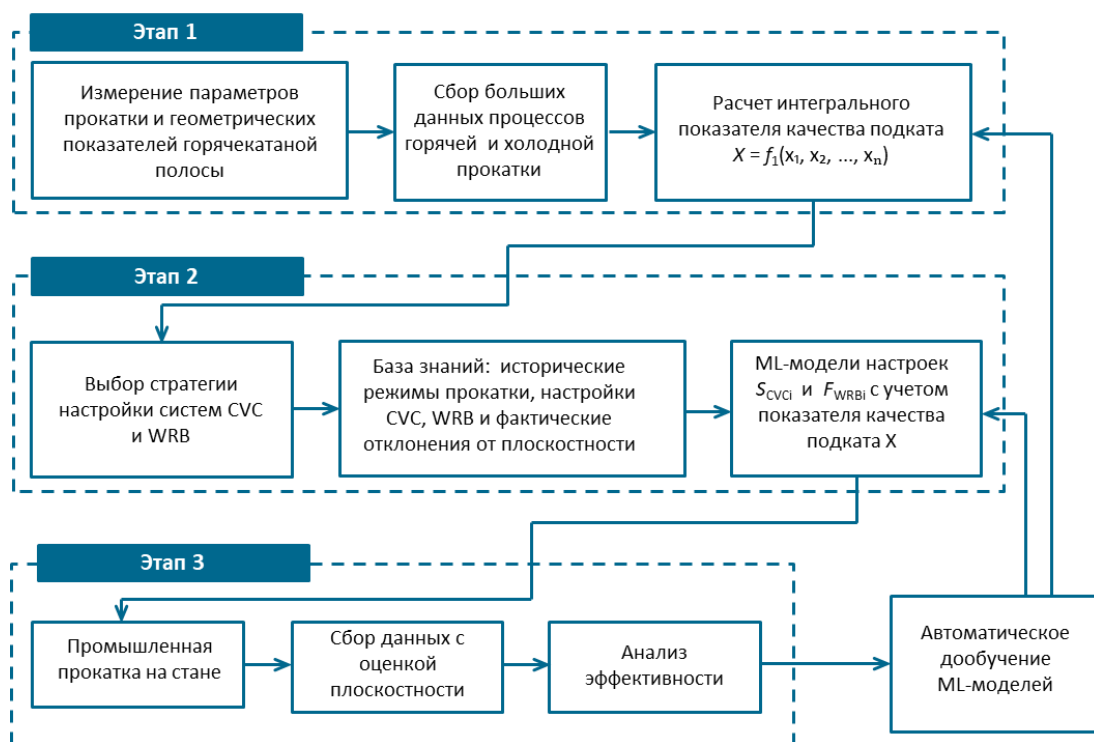


Рисунок 3.11 – Схема реализации прогнозной настройки систем CVC и WRB

На первом этапе решается задача построения модели интегрального показателя качества подката. На основе исторических данных, включающих геометрические параметры горячекатаного подката (например, выпуклость, клиновидность) и технологические параметры горячей прокатки, строится регрессионная модель или модель машинного обучения (Machine Learning (ML) модель) для расчета показателя X по формуле:

$$X = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (3.8)$$

где $x_1, x_2, \dots, x_n$ – независимые переменные, характеризующие состояние подката. Конкретный вид функции $f_1(\cdot)$ определяется в процессе анализа данных и идентификации модели. Полученный показатель X является количественной мерой технологической наследственности, определяющей склонность полосы к проявлению неплоскостности. Для IF-сталей конкретный вид этой функции был получен в разделе 3.2 (уравнение 3.4). Для других классов сталей потребуется переобучение модели на соответствующих выборках.

Второй этап направлен на определение оптимальных начальных значений управляющих воздействий с анализом существующих стратегий настройки систем CVC и WRB. Используя базу знаний, содержащую исторические данные о реализованных режимах прокатки, настройках CVC, WRB и фактических отклонениях от плоскостности, строятся прогнозные модели. Эти модели связывают интегральный показатель X с оптимальными уставками (величиной осевого смещения рабочих валков S_{CVC} и величиной гидроизгиба рабочих валков F_{WRB}) для критических клеток стана, что позволяет компенсировать прогнозируемое негативное влияние подката еще до начала процесса.

Анализ, выполненный в разделе 3.3, показал, что для многоклетевого стана целесообразна следующая иерархическая структура моделей:

– Для клетки № 4 (последней) величина осевого смещения валков CVC определяется непосредственно по значению X :

$$S_{CVC4} = f_2(X). \quad (3.9)$$

– Для клетки № 3 (предпоследней) осевое смещение зависит как от X , так и от уставки смещения в последней клетке:

$$S_{CVC3} = f_3(X, S_{CVC4}). \quad (3.10)$$

– Усилие гидроизгиба валков в последней клетке определяется комплексно, с учетом X и уставок смещения в обеих клетках:

$$F_{WRB4} = f_4(X, S_{CVC3}, S_{CVC4}). \quad (3.11)$$

В общем случае функции f_2 , f_3 , f_4 могут быть реализованы как регрессионные зависимости (подобно уравнениям (3.5)–(3.7) для IF-стали) либо как более сложные модели машинного обучения, способные учитывать нелинейные эффекты и взаимодействия параметров. Выбор конкретного метода зависит от объема и качества доступных исторических данных.

На третьем этапе рассчитанные значения уставок интегрируются в технологический график прокатки и передаются в систему управления станом. После прокатки осуществляется сбор данных о фактическом

качестве плоскостности полосы. Накопленный массив данных используется для периодического переобучения моделей этапов 1 и 2, что позволяет системе адаптироваться к таким факторам, как износ оборудования, изменение свойств поступающего подката и колебание технологических параметров. Таким образом, формируется замкнутый цикл проактивного управления, обеспечивающий постоянное повышение точности прогноза и стабильности качества.

Трехэтапный алгоритм (рисунок 3.11), включающий расчет показателя X , определение по нему оптимальных уставок CVC и WRB, а также последующий сбор данных с обратной связью для адаптации моделей, показал свою реализуемость в условиях действующего производства. Замкнутый цикл «расчет – прокатка – мониторинг – адаптация» создает предпосылки для устойчивого функционирования системы управления плоскостностью при долговременных изменениях технологических факторов, таких как износ валков или колебания свойств подката.

Промышленная апробация предложенного подхода на высокопластичной IF-стали подтвердила его работоспособность и эффективность. Разработанные в разделе 3.3 регрессионные зависимости, соответствующие общей структуре моделей (3.9)–(3.11), обеспечили стабильное получение полос шириной до 1640 мм с требуемой плоскостностью при различных сочетаниях клиновидности кромок и смещения вершины профиля подката. Тем самым доказано, что иерархический принцип расчета уставок, учитывающий технологическую соподчиненность предпоследней и последней клетей, корректно отражает физику процесса и может служить основой для дальнейшего развития метода.

Реальные перспективы развития подхода связаны с расширением сортамента на другие классы сталей (HSLA, DP, CP) и привлечением методов машинного обучения. Накопление промышленных данных по каждому

классу материалов позволит уточнить зависимости (3.8)–(3.11) либо заменить их более гибкими ML-моделями, способными учитывать нелинейные эффекты и специфику деформационного поведения различных сталей. Дальнейшие исследования должны быть направлены на формирование репрезентативных выборок, разработку и проверку моделей для расширенного сортамента, а также на интеграцию предложенного алгоритма в автоматизированную систему управления технологическим процессом для перехода к полностью прогнозному управлению качеством плоскостности.

Выводы по главе 3

1. В результате анализа совместной работы систем осевой сдвижки CVC и гидроизгиба рабочих валков WRB на непрерывном 4-клетевом стане 2100 определена зона их регулирующего воздействия на поперечный профиль холоднокатаной полосы. Выявлены предельные возможности формирования профиля при экстремальных сочетаниях осевого смещения и усилия изгиба, а также показана зависимость этих возможностей от ширины прокатываемых полос. Установлено, что возникновение сложного дефекта пространственной неустойчивости «диагональная волна» обусловлено несогласованностью во времени между геометрическим воздействием CVC и силовым откликом WRB при динамических коррекциях. Для подавления этого дефекта обоснованы и внедрены технологические правила, ограничивающие автономную корректировку CVC в клетях № 2 и № 3 и расширяющие диапазоны регулирования гидроизгиба рабочих валков WRB, что позволило стабилизировать процесс управления плоскостностью.

2. На основе статистического анализа промышленных данных впервые для высокопластичных IF-сталей установлены и количественно определены параметры геометрии горячекатаного подката, являющиеся факторами риска нарушения плоскостности: клиновидность левой и правой кромок и

смещение вершины профиля. Обоснован интегральный показатель качества подката X , включающий эти геометрические параметры, ширину полосы и разность температур конца прокатки и смотки. Полученные зависимости статистически подтверждены ($R^2 = 0,88$ при $p < 0,01$), показатель X позволяет количественно оценить «технологическую наследственность» подката, предопределяющую возникновение локальных отклонений различной ширины и краевой волнистости.

3. На основе показателя X обоснован принцип прогнозной компенсации технологической наследственности подката при холодной прокатке IF-сталей, заключающийся в иерархическом распределении корректирующих воздействий систем CVC и WRB по клетям стана, и установлены количественные соотношения, связывающие X с рациональными уставками осевого смещения валков в предпоследней и последней клетях, а также с усилием гидроизгиба в последней клетке. Промышленная апробация при прокатке полос шириной до 1640 мм подтвердила эффективность предложенного подхода: во всех экспериментальных прокатках с использованием расчетных уставок получена годная продукция, включая случаи с неблагоприятной геометрией подката с высокой асимметрией клиньев. Принцип позволяет компенсировать унаследованную асимметрию профиля и обеспечивает стабильную плоскостность полос, что подтверждено отсутствием дефектов в вариантах новых настроек, тогда как при базовых настройках зафиксированы локальные отклонения формы.

4. Предложены перспективы дальнейшего развития разработанного подхода к настройке систем CVC и WRB: распространение на другие классы сталей и применение методов машинного обучения для построения адаптивных моделей. Описан трехэтапный алгоритм, реализующий замкнутый цикл «расчет – прокатка – мониторинг – адаптация», который обеспечивает повышение точности прогноза и устойчивости управления при долговременных изменениях технологических факторов. Накопление

промышленных данных по различному сортаменту создаст основу для переобучения моделей и перехода к полностью прогнозному управлению качеством плоскостности.

Глава 4. Разработка и исследование методов управления плоскостностью при правке холоднокатаных полос на основе прогнозирования механических свойств

4.1 Анализ влияния предела текучести на степень пластической деформации при правке холоднокатаных полос в роликовой правильной машине

Качество правки на роликовых правильных машинах (РПМ) определяется степенью пластической проработки сечения, которая, в свою очередь, зависит от соответствия режимов деформирования механическим свойствам обрабатываемого металла, прежде всего пределу текучести σ_T . Однако в промышленной практике настройка РПМ выполняется по усредненным справочным данным, без учета индивидуальных характеристик каждого рулона. Для обоснованного выбора режимов правки необходимо установить количественную связь между настройками машины, геометрическими параметрами полосы и достигаемой степенью пластической деформации, а также оценить влияние вариаций предела текучести на стабильность процесса.

Экспериментальное исследование выполнено на 15-роликовой правильной машине агрегата поперечной резки № 2. Машина предназначена для правки полос толщиной $h = 1,2\text{--}4,0$ мм и имеет следующие конструктивные параметры: диаметр рабочих роликов $D = 65$ мм, шаг между роликами одного ряда $t = 71,5$ мм. Основные регулируемые параметры машины представлены на рисунок 4.1.

Настраиваемыми величинами являются зазор или перекрытие на входе $s_{\text{вх}}$ и выходе $s_{\text{вых}}$. Параметр s представляет собой расстояние между плоскостями, касательными к образующим верхних (ролики 2 и 14) и нижнего ряда роликов. Положительное значение s соответствует зазору,

когда верхний ролик расположен выше линии нижних роликов, отрицательное – перекрытию, когда верхний ролик опущен ниже линии нижних роликов. На рисунке 4.1 в качестве примера приведена настройка с перекрытием на входе и зазором на выходе. Регулируемый наклон верхней кассеты характеризуется разностью $\Delta = s_{\text{вых}} - s_{\text{вх}}$, которая определяет изменение кривизны полосы по длине машины.

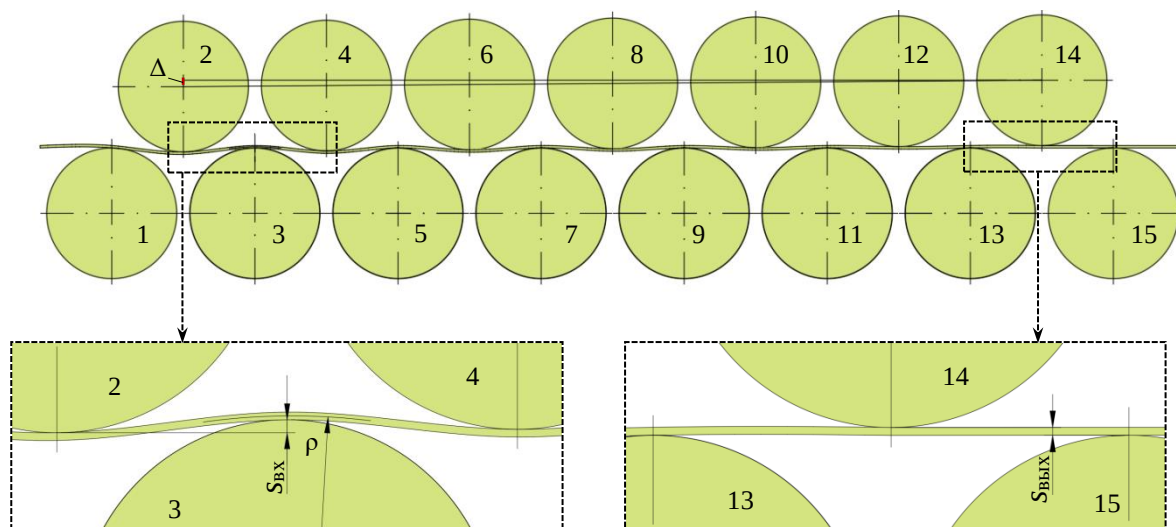


Рисунок 4.1 – Схема 15-роликовой правильной машины

Как следует из геометрических соотношений и подтверждено в работах [72, 75], наибольшая кривизна изгиба (наименьший радиус ρ – рисунок 4.1) достигается под третьим рабочим роликом. Именно здесь, после предварительного изгиба на первых двух роликах, реализуется максимальное напряженно-деформированное состояние полосы. Поэтому для оценки эффективности правки в качестве расчетной принимается кривизна под третьим роликом, что позволяет установить непосредственную связь между входным перекрытием $s_{\text{вх}}$ и степенью пластической проработки сечения. Выходной зазор $s_{\text{вых}}$ для каждой толщины принимался постоянным и составлял $0,9h$. Такое значение выбрано исходя из практики эксплуатации для создания небольшого поджатия полосы на выходе из машины, что

обеспечивает ее устойчивое положение и предотвращает остаточный загиб после выхода из последней пары роликов [121]. Поскольку $s_{\text{вых}}$ не влияет на кривизну в начальных роликах, основным регулируемым параметром, определяющим максимальную степень пластической деформации в очаге изгиба, является входное перекрытие $s_{\text{вх}}$.

Для установления указанной связи использованы фактические производственные данные, зафиксированные системой управления агрегатом, а также результаты дополнительных геометрических измерений, выполненных в среде конструкторского проектирования. Для каждого режима правки, характеризуемого сочетанием толщины полосы h и входного перекрытия $s_{\text{вх}}$, определялся радиус кривизны ρ нейтральной линии под третьим рабочим роликом. Под нейтральной линией (слоем) понимается продольное сечение полосы, в котором при изгибе продольные деформации равны нулю. Радиус кривизны ρ определялся непосредственно в системе геометрического моделирования по построенным схемам положения полосы в роликах, что позволяет точно измерять радиусы дуг и обеспечивает необходимую точность исходных данных для расчетов.

Полученные экспериментальные данные представлены в таблице 4.1. Для расширения диапазона исследуемых параметров и выявления общей закономерности для каждой толщины помимо промышленного режима был смоделирован дополнительный, с измененным входным перекрытием.

Анализ данных, представленных в таблице 4.1, показал, что все экспериментальные точки с высокой точностью описываются единой линейной зависимостью, если в качестве аргумента использовать величину $(h - s_{\text{вх}})$. Эта величина имеет ясный геометрический смысл: при отрицательном перекрытии ($s_{\text{вх}} < 0$) фактическое расстояние между верхним и нижним роликами в месте контакта с полосой равно $(h - (-s_{\text{вх}})) = h + s_{\text{вх}}$, что интенсифицирует изгиб. При положительном перекрытии (зазоре) это

расстояние становится меньше толщины полосы, что соответствует более пологому изгибу.

Таблица 4.1 – Экспериментальные данные для определения зависимости кривизны от входного перекрытия

№ режима	Толщина полосы h , мм	Зазор или перекрытие на входе $s_{вх}$, мм	Радиус кривизны полосы в нейтральном слое под роликом № 3 ρ , мм	Кривизна изгиба полосы в нейтральном слое под роликом № 3 $a = 1/\rho$, мм ⁻¹	$h - s_{вх}$, мм
1	1,2	-0,906	151,3	0,00661	2,106
2	1,2	-2,02	99,3	0,01007	3,22
3	1,4	-0,799	145,3	0,00688	2,199
4	1,4	-0,2	199,5	0,00501	1,6
5	1,5	-0,601	152,1	0,00657	2,101
6	1,5	0	214,2	0,00467	1,5
7	2,0	-0,156	147,9	0,00676	2,156
8	2,0	0,5	212,6	0,00470	1,5
9	2,5	0,207	138,9	0,00720	2,293
10	2,5	1,0	212,4	0,00471	1,5
11	3,0	0,72	139,6	0,00716	2,28
12	3,0	1,5	212,2	0,00471	1,5

На рисунке 4.2 представлен график зависимости кривизны a от параметра $(h - s_{вх})$. Видно, что точки для всех толщин и перекрытий группируются вдоль прямой, проходящей через начало координат.

Методом наименьших квадратов получено уравнение регрессии:

$$a = \alpha \cdot (h - s_{вх}), \quad (4.1)$$

где эмпирический коэффициент $\alpha = 0,003135 \text{ мм}^{-2}$.

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,998$ подтверждает практически линейную связь. Физический смысл коэффициента α – это кривизна, создаваемая единичным изменением геометрического параметра. Коэффициент α постоянен для данной конструкции машины и не зависит от толщины полосы и ее механических свойств.

Полученная зависимость (4.1) является ключевой для решения обратной задачи: она позволяет для любой толщины h и любого допустимого

входного перекрытия s_{BX} определить кривизну в очаге максимальной деформации.

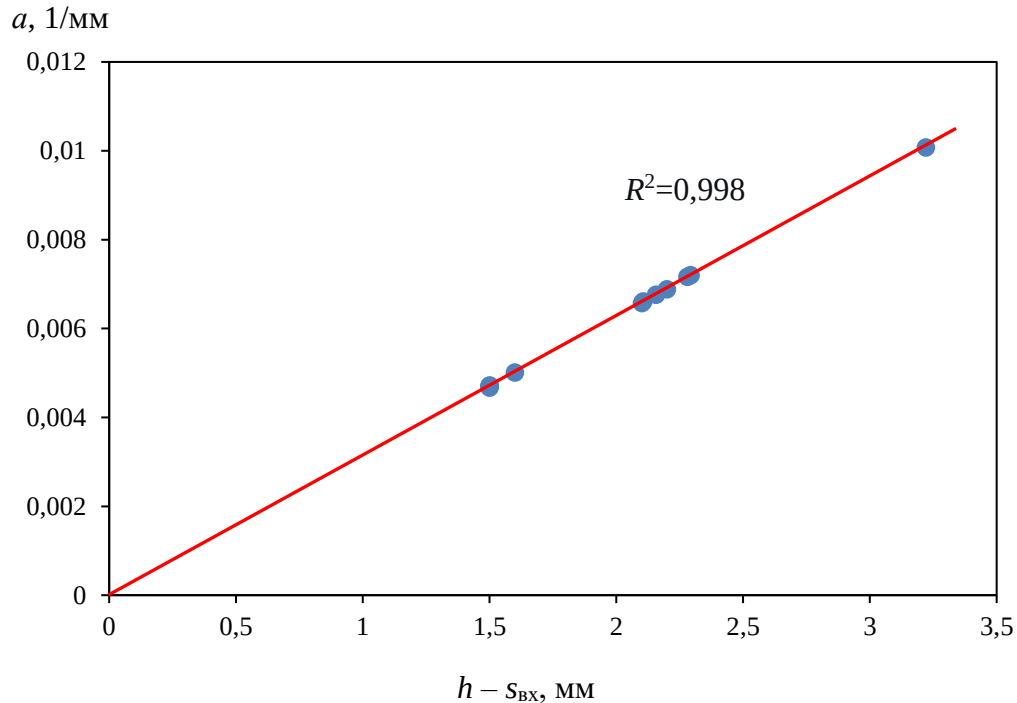


Рисунок 4.2 – Зависимость кривизны изгиба a от параметра $(h - s_{BX})$. Точки – экспериментальные данные, линия – линейная регрессия ($\alpha = 0,003135 \text{ мм}^{-2}$, $R^2 = 0,998$)

Для оценки эффективности правки используется степень пластической проработки сечения. На основе обобщения результатов работ [75, 122] она определяется по формуле:

$$k_{pl} = \left(1 - \frac{2\sigma_T}{a \cdot E \cdot h} \right) \cdot 100\%, \quad (4.2)$$

где $a = 1/\rho$ – кривизна изгиба полосы в нейтральном слое, мм^{-1} ; ρ – радиус кривизны полосы в нейтральном слое, мм; σ_T – предел текучести полосы, МПа; E – модуль продольной упругости, принимаемый равным $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; h – толщина полосы, мм.

Подставляя (4.1) в (4.2), можно выразить фактическую пластическую деформацию через настройки и свойства металла:

$$k_{pl} = \left(1 - \frac{2\sigma_T}{\alpha(h - s_{bx})E \cdot h} \right) \cdot 100\%. \quad (4.3)$$

Формула (4.3) наглядно демонстрирует, что при фиксированной настройке s_{bx} величина k_{pl} пропорциональна пределу текучести. Следовательно, разброс σ_T от рулона к рулону приводит к неконтролируемому изменению степени проработки металла, что и является причиной нестабильности качества правки.

4.2 Разработка статистической модели прогнозирования предела текучести по данным предшествующих переделов

Для получения значения предела текучести непосредственно перед настройкой агрегата разработана линейная регрессионная модель, использующая данные химического состава и технологических параметров всех предшествующих переделов: горячей прокатки, холодной прокатки, отжига и дрессировки.

Исходная выборка включала 15352 рулона, прошедших полный технологический цикл в условиях ПАО «Северсталь».

Процесс построения модели включал ряд последовательных этапов. На первом этапе выполнена предобработка данных: удаление пропусков и выбросов, заполнение пропусков по химическим элементам медианными значениями. Нормализация числовых признаков не проводилась, использовался метод линейной регрессии, который не требует приведения признаков к единому масштабу – коэффициенты модели автоматически компенсируют разницу в размерностях. С целью оценки силы и направления взаимосвязей между отдельными признаками и целевой переменной σ_T проведен корреляционный анализ с использованием коэффициента Пирсона,

что позволило предварительно оценить значимость факторов. Далее исходная выборка была разделена на обучающую (80 %, 12282 рулонов) и тестовую (20%, 3070 рулонов) для последующей проверки обобщающей способности модели. На заключительном этапе осуществлено построение модели линейной регрессии, реализованной на языке Python.

После построения первоначальной модели была проведена проверка статистической значимости каждого коэффициента по t -критерию Стьюдента. Факторы, для которых p -значение превышало 0,005 (т.е. вероятность ошибочно считать влияние значимым была выше пороговой), исключались из модели. В результате в окончательный вариант модели вошли 18 факторов, перечисленных в таблице 4.2. В частности, были исключены элементы Ni, Cu, B, V, а также ряд параметров отжига (температура газа в конце 1-й и 2-й ступени, продолжительность 2-й ступени, максимальный вес рулона в садке) и обжатие при дрессировке, как статистически незначимые.

Полученное уравнение регрессии имеет вид:

$$\begin{aligned} \sigma_T = & 276,43 + 9,61 \cdot h - 0,00352 \cdot b - 101,62 \cdot [\text{Al}] + 322,39 \cdot [\text{C}] + \\ & + 131,96 \cdot [\text{Si}] + 61,80 \cdot [\text{Mn}] + 1189,51 \cdot [\text{P}] - 603,04 \cdot [\text{S}] + 45,52 \cdot [\text{Cr}] + \\ & + 3010,29 \cdot [\text{N}] - 326,78 \cdot [\text{Ti}] + 1478,28 \cdot [\text{Mo}] + 68,19 \cdot \varepsilon_{\text{хп сумм}} - 0,1579 \cdot T_{\text{кп}} + \\ & + 0,0997 \cdot T_{\text{см}} - 0,1785 \cdot T_{\text{отж max}} - 0,00625 \cdot \tau_{\text{отж1}} + 0,0517 \cdot P_{\text{др ср}}, \end{aligned} \quad (4.4)$$

где σ_T – предел текучести, МПа; h – толщина холоднокатаной полосы, мм; b – ширина полосы, мм; $[\text{Al}]$, $[\text{C}]$, $[\text{Si}]$, $[\text{Mn}]$, $[\text{P}]$, $[\text{S}]$, $[\text{Cr}]$, $[\text{N}]$, $[\text{Ti}]$, $[\text{Mo}]$ – массовая доля соответствующих элементов, %; $\varepsilon_{\text{хп сумм}}$ – суммарное обжатие при холодной прокатке, %; $T_{\text{кп}}$ – температура конца прокатки, °С; $T_{\text{см}}$ – температура смотки, °С; $T_{\text{отж max}}$ – максимальная температура газа при отжиге, °С; $\tau_{\text{отж1}}$ – продолжительность первой ступени отжига, мин; $P_{\text{др ср}}$ – среднее усилие дрессировки, т.

В таблице 4.2 приведены диапазоны входных параметров и коэффициенты регрессионной модели β_i . Коэффициенты регрессии β_i

позволяют оценить вклад каждого фактора в предел текучести. Из-за разной размерности признаков абсолютные значения коэффициентов несопоставимы, однако их знак указывает направление влияния.

Таблица 4.2 – Диапазон входных параметров и коэффициенты регрессионной модели

№	Признак	Диапазон	β_i
-	Свободный член β_0	–	276,43
1.	Толщина холоднокатаной полосы, мм	0,25 – 3,2	9,61
2.	Ширина холоднокатаной полосы, мм	780 – 1655	–0,00352
3.	Al, %	0,006 – 0,082	–101,62
4.	C, %	0,003 – 0,7	322,39
5.	Si, %	0,002 – 1,09	131,96
6.	Mn, %	0,08 – 1,41	61,80
7.	P, %	0,003 – 0,094	1189,51
8.	S, %	0,0002 – 0,027	–603,04
9.	Cr, %	0,007 – 0,9	45,52
10.	N, %	0,0005 – 0,013	3010,29
11.	Ti, %	0,001 – 0,078	–326,78
12.	Mo, %	0,0003 – 0,02	1478,28
13.	Суммарное обжатие при холодной прокатке, %	25 – 87	68,19
14.	Температура конца прокатки, °C	790 – 950	–0,1579
15.	Температура смотки, °C	480 – 850	0,0997
16.	Максимальная температура газа при отжиге, °C	600 – 810	–0,1785
17.	Продолжительность 1-ой ступени отжига, мин	160 – 1000	–0,00625
18.	Усилие дрессировки (среднее), т	120 – 450	0,0517

Анализ знаков коэффициентов согласуется с известными металловедческими закономерностями [123]. Положительный вклад вносят основные упрочнители феррита – углерод, марганец и кремний, а также суммарное обжатие при холодной прокатке и усилие дрессировки,

отражающие наклеп. Влияние микролегирующих элементов (титан, молибден) проявляется через механизмы карбонитридного упрочнения и регулирования размера зерна. Высокие значения коэффициентов для азота, фосфора, серы, молибдена объясняются их низким абсолютным содержанием (тысячные и сотые доли процента), метод наименьших квадратов автоматически компенсирует разницу в масштабах признаков. Эти элементы включены для полноты учета технологических факторов. Параметры термической обработки (температура конца прокатки, максимальная температура отжига, продолжительность 1-й ступени) закономерно снижают прочность, так как интенсифицируют рекристаллизацию и рост зерна.

Для оценки качества построенной регрессионной модели использованы стандартные статистические критерии (таблица 4.3). Коэффициент детерминации R^2 составил 0,835, что означает, что модель объясняет 83,5% дисперсии предела текучести. Статистическая значимость модели подтверждена F -критерием Фишера ($p < 0,001$). Это означает, что зависимость между факторами и пределом текучести неслучайна с вероятностью более 99,9%. Анализ p -значений для всех включенных в модель признаков показал, что они удовлетворяют принятому уровню значимости 0,005. Для большинства ключевых факторов (углерод, марганец, кремний, параметры термической обработки) $p < 0,001$, что свидетельствует об их особо высокой статистической значимости.

Таблица 4.3 – Метрики качества регрессионной модели

Метрика	Значение
Коэффициент детерминации R^2	0,8354
Скорректированный R^2	0,8351
F -статистика	2880,0
p -значение F -критерия	менее 0,001
Средняя абсолютная ошибка, МПа	16,42
Средняя относительная ошибка, %	7,58
Максимальное отклонение, %	72,7
Число наблюдений	15352
Число переменных	18

Средняя абсолютная ошибка прогноза на тестовой выборке (3070 рулонов) составила 16,42 МПа, средняя относительная ошибка – 7,58%. При среднем уровне предела текучести в исследованной выборке (300–350 МПа) относительная погрешность 7–8% является приемлемой для инженерных расчетов. Максимальное отклонение 72,7% связано с единичными выбросами и не оказывает существенного влияния на общую точность.

Для дополнительной проверки разработанной модели проведено сравнение прогнозных значений предела текучести с результатами лабораторных испытаний на выборке из 12676 рулонов сталей с пределом текучести до 300 МПа в диапазоне толщин 1,2–3,0 мм. Средняя абсолютная ошибка на этой выборке составила 2,74 МПа, средняя относительная ошибка – 5,68%, что хорошо согласуется с общими показателями модели и ожидаемо, так как на сталях с меньшим разбросом прочностных свойств модель дает более точный прогноз. Коэффициент корреляции Пирсона между измеренными и расчетными значениями на этой выборке составил $R = 0,91$ (рисунок 4.3), что свидетельствует о сильной положительной связи и подтверждает адекватность модели.

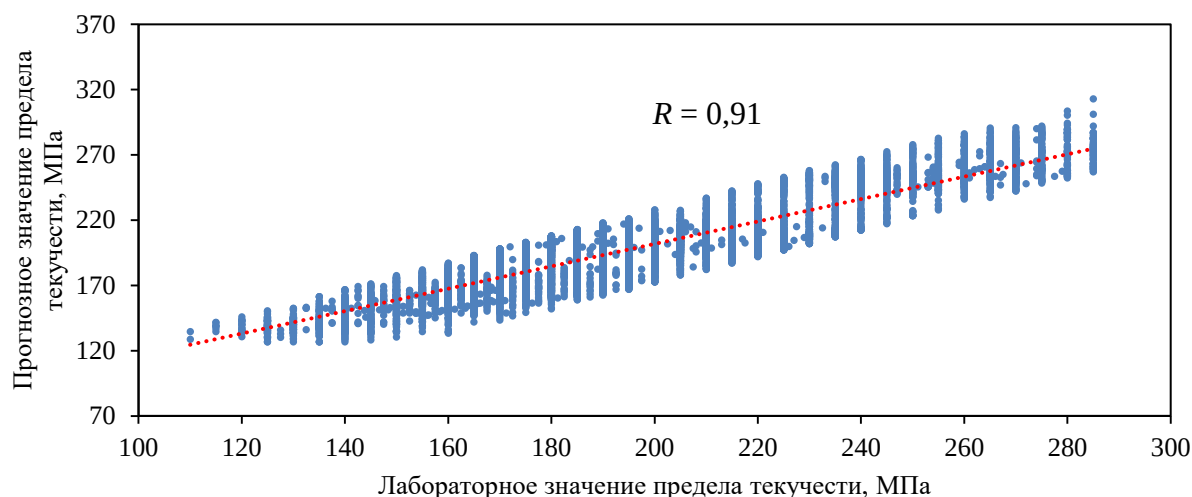


Рисунок 4.3 – Сопоставление прогнозных и лабораторных значений предела текучести

Таким образом, разработанная модель (4.4) позволяет для каждого рулона по данным его технологической истории рассчитать индивидуальное значение предела текучести с точностью, достаточной для практического использования в задачах настройки правильного оборудования.

4.3 Метод расчета оптимальных настроек роликовой правильной машины, промышленная апробация и анализ его эффективности

Для обеспечения стабильного качества правки холоднокатаных полос согласно рекомендациям производителя машины и результатам промышленных исследований целесообразно поддерживать пластическую деформацию на уровне 70%. Такая степень проработки сечения признана оптимальной для устранения типовых дефектов плоскостности (волнистость, коробоватость) без создания избыточных остаточных напряжений. Из формулы (4.2) требуемая для этого кривизна составляет:

$$a_{70} = \frac{2\sigma_T}{0,3E \cdot h}. \quad (4.5)$$

Приравнявая a_{70} к эмпирической зависимости (4.1), после подстановки $\alpha=0,003135 \text{ мм}^{-2}$ и $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ получается формула для оптимального входного перекрытия:

$$s_{\text{вх}}^{\text{opt}} = h - \frac{\sigma_{\text{т}}}{98,75h}. \quad (4.6)$$

Значение $\sigma_{\text{т}}$ в (4.6) подставляется из прогнозной модели (4.4). Выходное перекрытие $s_{\text{вых}}$ для каждой толщины принимается постоянным ($s_{\text{вых}} \approx 0,9h$), поскольку оно не влияет на максимальную кривизну, но обеспечивает устойчивый выход полосы. Наклон верхней кассеты определяется как $\Delta = s_{\text{вых}} - s_{\text{вх}}$.

Предлагаемый метод реализуется в следующей последовательности:

1. Для очередного рулона, поступающего в обработку, из базы данных цеха извлекаются фактические значения химического состава и технологических параметров всех предшествующих переделов (горячая прокатка, холодная прокатка, отжиг, дрессировка).

2. По формуле (4.4) рассчитывается прогнозное значение предела текучести $\sigma_{\text{т}}$.

3. По формуле (4.6) с использованием прогнозного $\sigma_{\text{т}}$ и известной толщины полосы h определяется оптимальное входное перекрытие $s_{\text{вх}}^{\text{opt}}$.

4. Рассчитанное значение передается оператору (на первом этапе внедрения) или непосредственно в систему автоматического управления РПМ для установки требуемого положения верхней кассеты.

Для оценки эффективности предложенного метода был проведен анализ промышленных данных по правке полос различной толщины и прочности. В таблице 4.4 для ряда режимов сопоставлены фактические значения входного перекрытия $s_{\text{вх}}^{\text{факт}}$, применявшиеся операторами, и рассчитанные по формуле (4.6) оптимальные значения $s_{\text{вх}}^{\text{opt}}$, обеспечивающие

пластическую деформацию 70%. Также приведена разность $\Delta s = s_{\text{вх}}^{\text{opt}} - s_{\text{вх}}^{\text{факт}}$, показывающая необходимую корректировку настройки.

Таблица 4.4 – Сравнение фактических и оптимальных настроек входного перекрытия

№ режима	h , мм	$\sigma_{\text{т}}$, МПа	$s_{\text{вх}}^{\text{факт}}$, мм	$k_{\text{pl}}^{\text{факт}}$, %	$s_{\text{вх}}^{\text{opt}}$, мм (для 70%)	$\Delta s = s_{\text{вх}}^{\text{opt}} - s_{\text{вх}}^{\text{факт}}$, мм
1	1,2	218	-0,906	73,8	-0,64	+0,27
2	1,2	465	-2,02	63,4	-2,72	-0,7
3	1,4	234	-0,799	76,9	-0,29	+0,51
4	1,5	231	-0,601	77,7	-0,06	+0,54
5	2,0	223	-0,156	84,3	+0,87	+1,03
6	2,5	218	+0,207	88,5	+1,62	+1,41
7	3,0	227	+0,72	89,9	+2,23	+1,51

Из таблицы 4.4 следует, что для режимов с пределом текучести 218–234 МПа фактическая пластическая деформация составляет 73–90%, что в большинстве случаев превышает рекомендуемый уровень 70%. Для правки высокопрочной стали ($\sigma_{\text{т}} = 465$ МПа) деформация, напротив, оказывается ниже целевой (63,4%). Рассчитанные оптимальные перекрытия отличаются от фактических: для низких $\sigma_{\text{т}}$ они требуют уменьшения перекрытия или увеличения зазора (сдвиг в положительную сторону), а для высокопрочных – более глубокого перекрытия (отрицательный Δs). Величина необходимой коррекции достигает 1,5 мм, что подтверждает значимость индивидуальной настройки.

Для более детального анализа влияния разброса предела текучести на эффективность правки в таблице 4.5 приведены данные по полосам толщиной 1,2 мм с различными значениями $\sigma_{\text{т}}$. Для каждого рулона указаны фактическая настройка $s_{\text{вх}}^{\text{факт}}$, наклон верхней кассеты Δ , достигнутая пластическая деформация $k_{\text{pl}}^{\text{факт}}$ и рассчитанное оптимальное перекрытие $s_{\text{вх}}^{\text{opt}}$ для 70%.

Таблица 4.5 – Оценка фактических режимов правки для полос толщиной 1,2 мм

№ режима	σ_T , МПа	$s_{вх}^{факт}$, мм	Δ , мм	$k_{pl}^{факт}$, %	$s_{вх}^{opt}$, мм (для 70%)
1	310	-1,08	2,27	65,58	-1,42
2	210	-0,906	2,076	74,76	-0,57
3	173	-1,27	2,45	82,27	-0,26
4	201	-1,2	2,41	78,80	-0,51
5	423	-0,99	2,02	51,10	-2,37
6	450	-1,78	2,51	61,77	-2,60
7	465	-2,02	3,21	63,44	-2,72
8	450	-1,19	2,39	52,33	-2,60
9	201	-0,79	1,97	74,43	-0,50

Анализ данных таблицы 4.5 показывает:

- При фиксированной для данной толщины типовой настройке (ориентированной на среднюю прочность около 300 МПа) фактическая пластическая деформация изменяется в широких пределах – от 51 до 82%. Это подтверждает, что использование усредненных справочных данных не позволяет гарантировать оптимальный режим правки.

- Зависимость оптимального перекрытия от предела текучести существенна: для низкопрочных сталей ($\sigma_T = 173$ МПа) требуемое $s_{вх}^{opt}$ составляет -0,26 мм, тогда как для высокопрочных ($\sigma_T = 465$ МПа): -2,72 мм. Диапазон изменения достигает 2,5 мм, что существенно превышает точность ручной настройки.

- Фактические перекрытия в выборке варьируются от -0,79 до -2,02 мм, но не всегда соответствуют оптимальным. Для низкопрочных рулонов они часто излишне большие ($k_{pl} > 80\%$), для высокопрочных – недостаточны ($k_{pl} < 65\%$).

Для оценки влияния погрешности прогноза предела текучести на точность настройки выполнен следующий расчет. При средней абсолютной

ошибке прогноза $\Delta\sigma_T = 16,4$ МПа и типичной толщине $h = 1,5$ мм погрешность определения оптимального перекрытия из формулы (4.6)

$$\text{составляет: } \Delta s_{\text{вх}} = \frac{\Delta\sigma_T}{98,75h} = \frac{16,4}{98,75 \cdot 1,5} = 0,11 \text{ мм.}$$

Полученная величина находится в пределах допустимой точности позиционирования роликов современных правильных машин и не оказывает существенного влияния на достигаемую пластическую деформацию. Таким образом, точность разработанной прогнозной модели вполне достаточна для практического использования.

Практическая реализация разработанного подхода запланирована в рамках модернизации системы управления агрегатом поперечной резки № 2 цеха отделки металла № 3 ПАО «Северсталь». Прогнозная модель предела текучести будет загружена в систему управления качеством продукции, что позволит в автоматизированном режиме рассчитывать для каждого рулона рекомендуемое входное перекрытие. На первом этапе рассчитанные значения будут выдаваться оператору в качестве рекомендации. В перспективе, при обеспечении технической возможности передачи данных с верхнего уровня управления L3 в автоматизированную систему уровня L2 и далее в контроллеры машины L1, предлагаемый алгоритм может быть полностью интегрирован в контур автоматического управления.

Использование предложенного метода гарантирует, что пластическая деформация для каждого рулона будет близка к 70%, что является значительным улучшением по сравнению с унифицированными настройками, ориентированными на усредненные справочные данные. Это создает основу для перехода к полностью адаптивному управлению процессом правки, снижению эксплуатационных затрат и повышению выхода годного проката.

Выводы по главе 4

1. На основе экспериментальных данных, полученных для 15-роликовой правильной машины, установлена линейная зависимость кривизны изгиба нейтрального слоя полосы от параметра, определяемого сочетанием толщины полосы и величины входного перекрытия. Коэффициент пропорциональности составил $0,003135 \text{ мм}^{-2}$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,998$. Полученная зависимость справедлива для всего исследованного диапазона толщин 1,2–3,0 мм и позволяет непосредственно рассчитывать фактическую пластическую деформацию сечения.

2. Получено уравнение регрессии для прогнозирования предела текучести холоднокатаных сталей, учитывающее химический состав, геометрические параметры полосы и технологические режимы всех предшествующих переделов (горячая прокатка, холодная прокатка, отжиг, дрессировка). Уравнение построено на массиве данных из 15352 рулонов и обеспечивает среднюю относительную ошибку прогноза 7,6% при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,835$, что достаточно для практического использования в задачах настройки оборудования для правки.

3. Анализ промышленных данных подтвердил, что при существующей практике настройки, ориентированной на усредненные справочные значения предела текучести, фактическая пластическая деформация может отклоняться от рационального уровня в диапазоне от 50 до 90% в зависимости от реальной прочности металла. Использование индивидуального прогноза предела текучести позволяет устранить этот разброс и гарантированно достигать требуемой степени проработки сечения для каждого рулона.

4. Обоснован рациональный уровень пластической деформации (70%), обеспечивающий устранение дефектов плоскостности, и получены аналитические выражения для расчёта входного перекрытия роликовой

правильной машины, базирующиеся на комбинации установленной зависимости кривизны и прогнозируемого значения предела текучести.

5. Полученные зависимости и аналитические выражения создают основу для автоматизированной системы поддержки принятия решений при настройке правильных машин, что способствует стабилизации качества плоскостности холоднокатаного проката, сокращению времени переналадок и снижению доли продукции с отклонениями геометрической формы.

Глава 5. Промышленная апробация и внедрение методов прогнозного управления и цифровой аттестации плоскостности холоднокатаных полос

5.1 Апробация и внедрение способа прогнозной настройки систем CVC и WRB для обеспечения плоскостности холоднокатаных полос

На основе комплексного анализа совместного регулирования систем CVC и WRB, а также установленных в главе 3 закономерностей влияния параметров горячекатаного подката на формирование плоскостности, был разработан способ прогнозной настройки систем регулирования для класса высокопластичных IF-сталей. Данный способ базируется на использовании интегрального показателя качества подката X и регрессионных зависимостей для расчета уставок осевого смещения валков в предпоследней и последней клетях, а также усилия гидроизгиба в последней клетке. Для оценки эффективности разработанного способа прогнозной настройки систем регулирования CVC и WRB при прокатке полос из высокопластичных IF-сталей в период с марта по май 2022 г. на 4-клетевом стане 2100 ПАО «Северсталь» была выполнена промышленная апробация. Оценивалась стабильностью обеспечения плоскостности полос и снижение доли продукции, отбракованной по геометрическим дефектам. Сортамент полос из IF-сталей: толщина 0,59–0,70 мм, ширина 1400–1640 мм. Интеграция алгоритма в АСУ ТП уровня L2 позволила для каждого рулона автоматически, на основе данных о геометрии подката и режимах горячей прокатки, рассчитывать индивидуальные уставки S_{CVC3} , S_{CVC4} и F_{WRB4} . В клетях № 1 и № 2, согласно выработанной стратегии, диапазон осевых сдвижек был ограничен значениями ± 10 мм для сохранения унаследованной геометрии подката. В ходе испытаний с использованием прогнозной настройки было прокатано 830 рулонов. Контроль качества осуществлялся

по данным стресс-ролика за клетью № 4 и результатам выборочной инспекции на агрегатах цинкования.

В таблице 5.1 приведены сводные данные для трех характерных рулонов опытной группы, демонстрирующие взаимосвязь между входными параметрами подката и уставками, рассчитанными по формулам (3.5)–(3.7), и достигнутым результатом – отклонения от плоскостности не превысили 10 *I*-Unit.

Таблица 5.1 – Параметры подката, прогнозные уставки для рулонов опытной группы

№	b , мм	$\delta w_{\text{лmin}}$, мм	$\delta w_{\text{прmin}}$, мм	$y_{\text{hсmax}}$, мм	$T_{\text{кпер}}$, °С	$T_{\text{смсп}}$, °С	X	S_{CVC3} , мм	S_{CVC4} , мм	F_{WRB4} , кН
1	1579	0,003	0,014	-75,07	896	675	1294	2	-15	-218
2	1534	-0,004	0,000	16,52	934	753	1257	2	-15	-211
3	1337	-0,009	-0,009	0,00	939	682	1096	2	-13	-180

Представленные в таблице 5.1 данные свидетельствуют о том, что разработанный способ обеспечивает стабильное получение годной продукции даже при значительных вариациях геометрии подката, например, существенное смещение вершины профиля $y_{\text{hсmax}}$ в варианте № 1. Характерно, что рассчитанные уставки находятся в узких, технологически обоснованных диапазонах: S_{CVC4} изменяется в пределах от –15 мм до –13 мм, а F_{WRB4} от –218 кН до –180 кН. Это подтверждает воспроизводимость и устойчивость предложенного алгоритма.

На рисунках 5.1 и 5.2 в качестве иллюстрации представлены 2D-карты напряжений со стресс-ролика за клетью № 1 и клетью № 4 для двух рулонов из таблицы 5.1. Видно, что на всей протяженности полос значения находятся в «зеленой» зоне, что соответствует стабильному обеспечению требуемой плоскостности (менее 10 *I*-Unit).

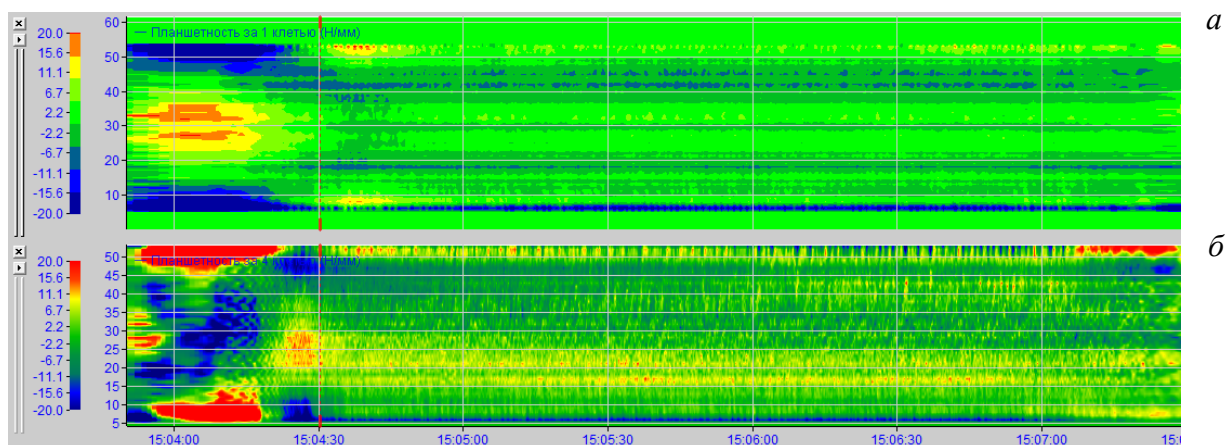


Рисунок 5.1 – 2D-карта напряжений полосы после клетки № 1 – *а* и после клетки № 4 – *б* для рулона № 1 таблицы 5.1

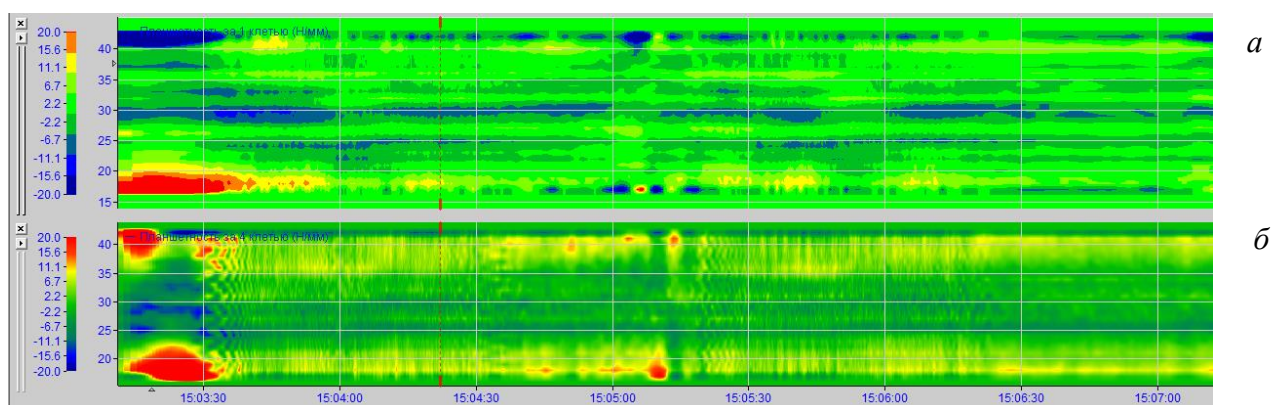


Рисунок 5.2 – 2D-карта напряжений полосы после клетки № 1 – *а* и после клетки № 4 – *б* для рулона № 2 таблицы 5.1

По результатам успешных испытаний способ прогнозной настройки с июня 2022 г. внедрен в промышленную эксплуатацию на стане 2100 для всего сортамента IF-сталей. Программный модуль, реализующий расчет показателя X и уставок по формулам (3.5)–(3.7), интегрирован в контур АСУ ТП.

Эффективность внедрения подтверждается анализом производственных показателей (таблица 5.2). Применение разработанного

способа позволило практически полностью исключить отсортировку по дефектам плоскостности для данного класса сталей.

Таблица 5.2 – Экономическая эффективность внедрения способа прогнозной настройки

Показатель	Единица измерения	До внедрения	После внедрения
Доля неплоскостности в общем объеме брака и несоответствующей продукции	%	1,95	0,11
Снижение несоответствующей продукции	т	–	365
Потери от несоответствующей продукции	руб. / т	–	11318
Экономический эффект	млн руб./год	–	4,1

Применение данного способа позволило повысить выход годного холоднокатаного оцинкованного проката для производства автолиста, а также сократить время на доработку рулонов. Справка об экономическом эффекте и акт внедрения в действующее производство представлены в приложениях А и Б соответственно.

5.2 Совершенствование алгоритма цифровой аттестации плоскостности холоднокатаных полос

Разработанные методы прогнозного управления системами CVC и WRB, как показано в главе 3 и разделе 5.1, обеспечивают стабильное получение холоднокатаных полос с требуемой плоскостностью. Однако для полноценного контроля качества и оперативного выявления отклонений необходима объективная система оценки плоскостности, работающая в

реальном времени и формирующая обратную связь для управления процессом. С этой целью на 4-клетевом стане 2100 ПАО «Северсталь» была внедрена система цифровой аттестации плоскостности [124], реализующая технологический цикл «измерение – оценка». Внедрение системы позволило перейти от эпизодического визуального контроля к непрерывному мониторингу остаточных напряжений и формированию цифрового заключения для каждого прокатанного рулона.

Система цифровой аттестации построена на базе стресс-ролика, установленного за клетью № 4, и включает два основных функциональных блока (рисунок 5.3).

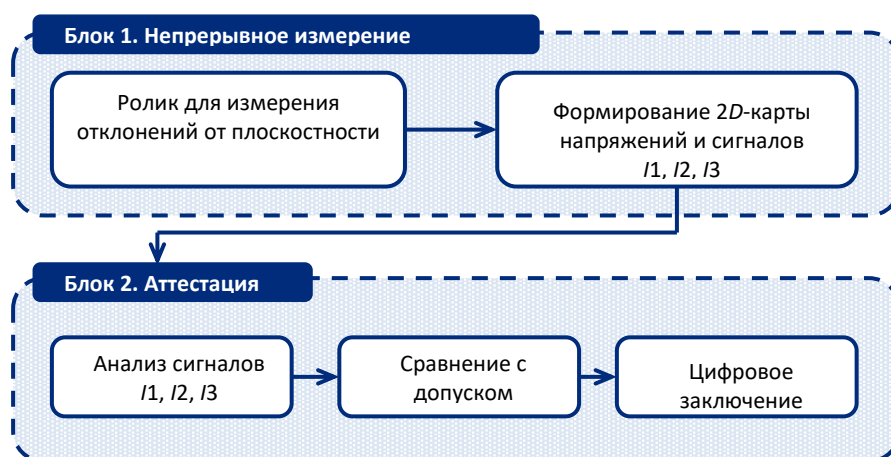


Рисунок 5.3 – Структурная схема системы цифровой аттестации плоскостности, реализующая цикл «измерение – оценка»

В рамках блока непрерывного измерения, стресс-ролик с 60 независимыми измерительными секциями регистрирует распределение контактных усилий по ширине полосы, на основе чего рассчитывается поле остаточных продольных напряжений. После оцифровки и пространственно-временной привязки данных формируется 2D-карта распределения напряжений (Н/мм^2), визуализирующая поле остаточных напряжений по

длине и ширине полосы. Эта карта представляет собой детальный цифровой двойник плоскостности всего рулона.

На рисунке 5.4 в качестве примера представлен начальный участок полосы длиной 1639 м из общей длины рулона 2935 м. Верхняя часть карты, соответствующая правой кромке полосы, имеет красный цвет, что свидетельствует о значительных напряжениях в этой области. В зоне, отмеченной прямоугольником, расположен сварной шов, вызывающий локальный выброс регистрируемых параметров.

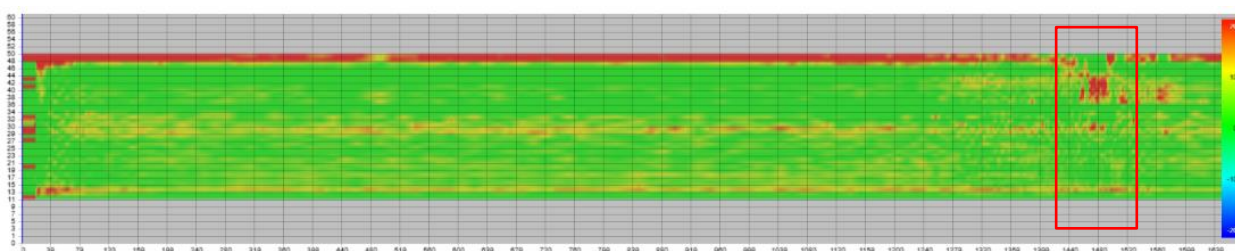


Рисунок 5.4 – 2D-карта распределения остаточных напряжений – цифровой двойник плоскостности

Параллельно система генерирует стандартизированные обобщенные сигналы в *I-Unit* для кромок (I_1 , I_2) и середины (I_3) полосы. Эти сигналы являются исходными данными для блока 2 – аттестации. На этом этапе алгоритмы в реальном времени анализируют поток сигналов I_1 , I_2 , I_3 . Происходит автоматическое сравнение с технологическими допусками и классификация качества с использованием трехуровневой цветовой индикации:

- зеленый уровень – значение сигнала находится в оптимальном диапазоне (0–10 *I-Unit*). Плоскостность соответствует нормативным требованиям;

- желтый уровень – сигнал достиг пограничных значений (10-15 *I-Unit*). Качество допустимо, но требует повышенного внимания;

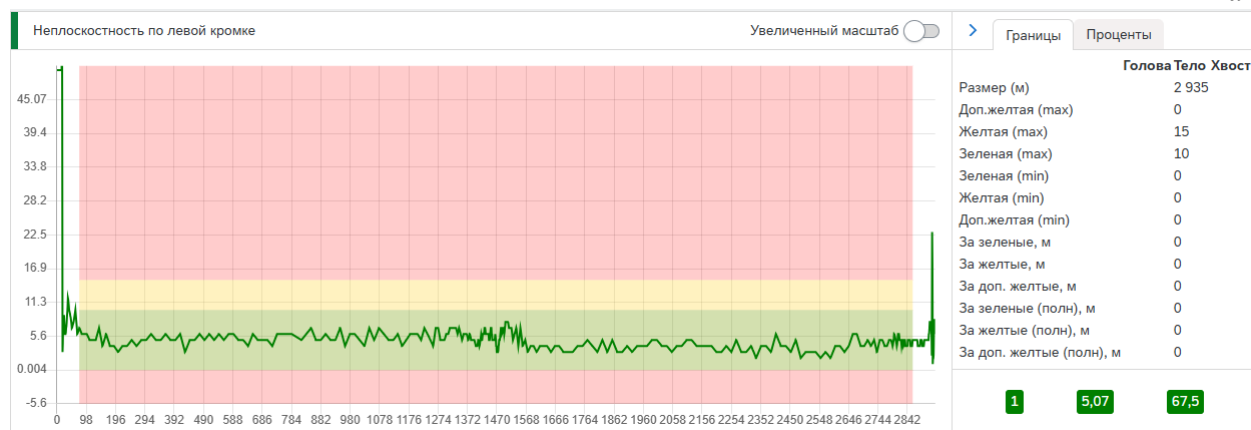
– красный уровень – сигнал превысил критический порог (более 15 *I*-Unit). Фиксируется неудовлетворительная плоскостность, требующая регистрации и корректирующих действий.

На рисунке 5.5 представлен результат автоматизированной аттестации по сигналам *I1*, *I2* и *I3* для центральной части рулона (тело). Головные и хвостовые участки были исключены из анализа, поскольку при порулонной задаче полосы на переднем и заднем концах отсутствуют стабильные натяжения и регуляторы управления плоскостностью не работают. Для оперативного контроля используются усредненные показатели по длине тела рулона.

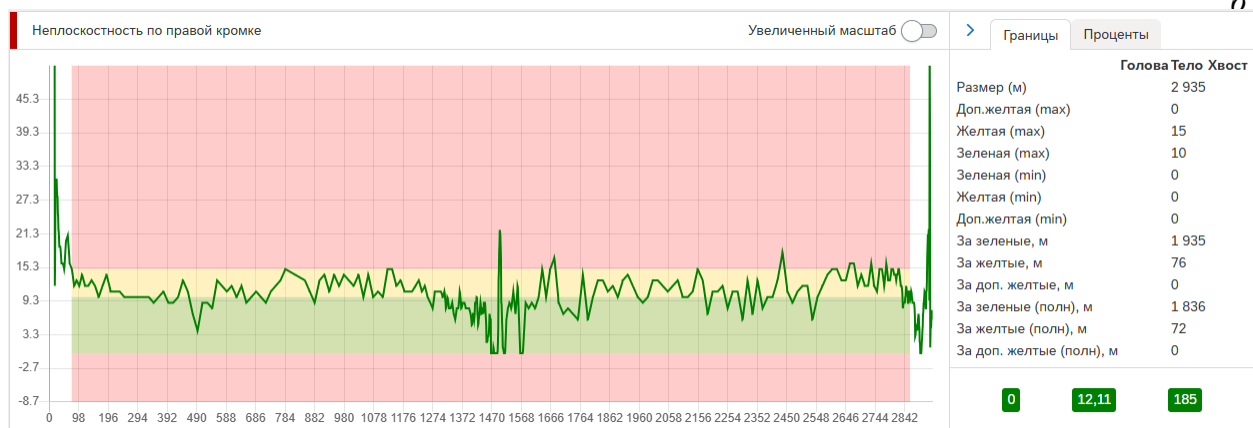
В данном случае среднее значение по правой кромке (*I2*) составляет 12,11 *I*-Unit, что соответствует желтому уровню (требующему внимания). При этом средние значения для левой кромки (*I1*) и центра (*I3*) находятся в зеленой зоне (менее 10 *I*-Unit). Такой подход позволяет оценить общий характер неплоскостности, игнорируя локальные кратковременные отклонения.

Пример таких отклонений можно видеть на рисунке 5.5, *б* и *в*: пиковые значения сигналов связаны с прохождением зоны сварного шва, расположенной на расстоянии 1480 м от начала полосы. Данный технологический фактор вызвал кратковременные возмущения, зафиксированные датчиками правой кромки и середины полосы.

а



б



в

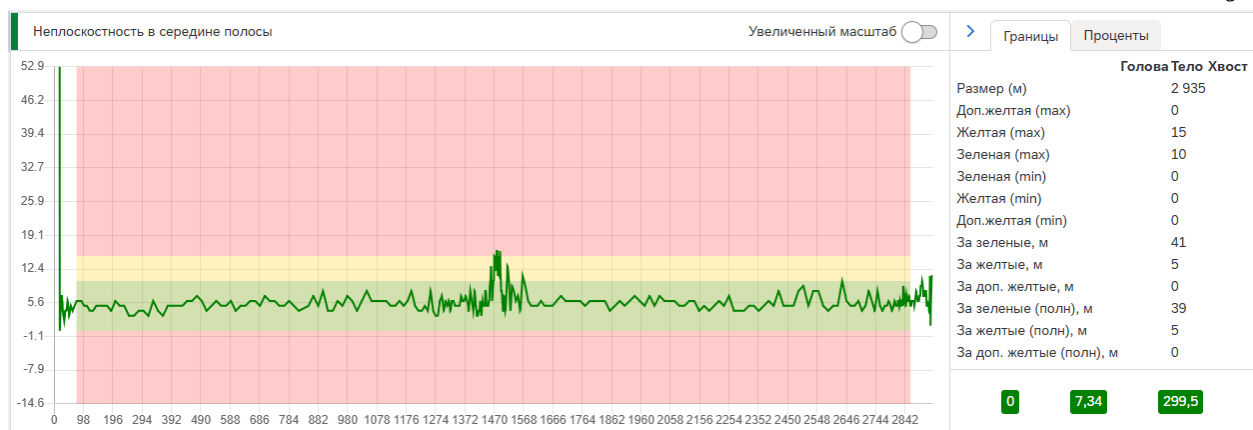


Рисунок 5.5 – Оценка плоскостности на этапе аттестации

Результатом работы блока 2 является формализованное цифровое заключение, содержащее классификацию дефекта, его количественные параметры. Однако анализ промышленных данных показал, что стандартный

подход к формированию сигналов I_1 , I_2 , I_3 , основанный на усреднении показаний по фиксированным группам зон, обладает рядом ограничений. В частности, наблюдается чувствительность к краевым эффектам, когда в формировании сигнала кромки участвуют зоны, лишь частично перекрываемые полосой, что вносит шум. Сигнал центральной зоны, формируемый усреднением по всем внутренним зонам без учета их фактической активности, «размывает» локальные дефекты и становится чувствительным к изменению ширины полосы. Отсутствие адаптации к реальной ширине проката снижает достоверность диагностики для всего сортамента.

Для преодоления указанных недостатков был разработан усовершенствованный алгоритм обработки данных. Схема алгоритма представлена на рисунке 5.6. Ключевое отличие заключается в динамическом формировании анализируемых групп зон на каждом рулоне.

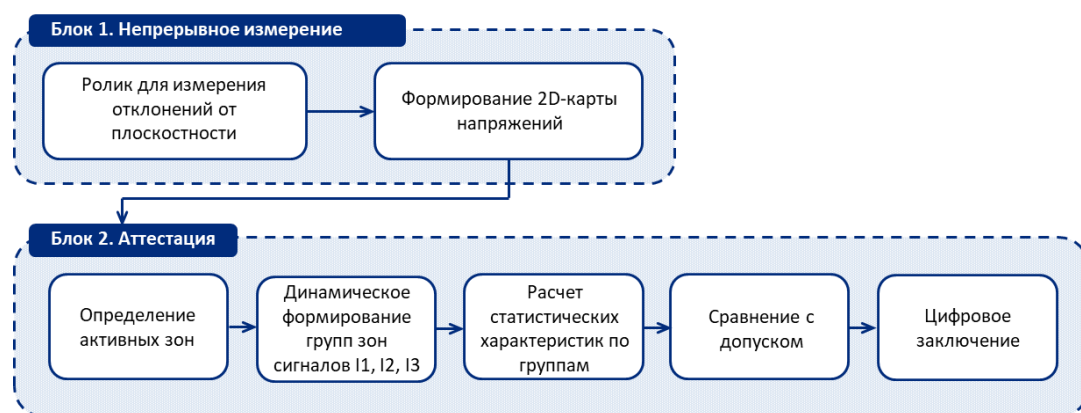


Рисунок 5.6 – Схема разработанного алгоритма цифровой аттестации плоскостности

Математически алгоритм может быть описан следующей последовательностью этапов.

1. Определение активных зон. Если множество всех измерительных зон стресс-ролика обозначить $Z = \{1, 2, \dots, 60\}$, то для обрабатываемого рулона

по всей его длине фиксируется множество активных зон $A = \{z \in Z\}$, где z – зона, где присутствует ненулевой сигнал на протяжении всей длины рулона. Зоны, не вошедшие в A , исключаются из дальнейшей обработки, что обеспечивает привязку к фактической ширине полосы и устраняет шум от нерабочих датчиков.

2. Динамическое формирование групп для сигналов $I1, I2, I3$. Активные зоны упорядочиваются слева направо: $a_1, a_2, \dots, a_{|A|}$.

– Левая кромка (сигнал $I1$) формируется из пяти зон, начиная со второй активной зоны:

$$I1 = \{a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\}. \quad (5.1)$$

Исключение первой активной зоны a_1 позволяет избежать влияния неустойчивого контакта кромки.

– Правая кромка (сигнал $I2$) формируется из пяти зон, заканчивая предпоследней активной зоной:

$$I2 = \{a_{|A|-5}, a_{|A|-4}, a_{|A|-3}, a_{|A|-2}, a_{|A|-1}\}. \quad (5.2)$$

Симметричное исключение крайней зоны $a_{|A|}$ фильтрует краевые искажения.

– Внутренняя область между кромочными группами (сигнал $I3$):

$$I3 = A \setminus (I1 \cup I2). \quad (5.3)$$

Сигнал $I3$ делится на три равные части (по количеству зон) или пропорционально ширине – в зависимости от конфигурации ролика. В общем случае задаются границы p_1 и p_2 ($1 < p_1 < p_2 < I3$), , тогда:

$$\begin{aligned} I3_{\text{л.пер.}} &= \{a_7, \dots, a_{p_1}\}; \\ I3_{\text{цент}} &= \{a_{p_1+1}, \dots, a_{p_2}\}; \\ I3_{\text{пр.пер.}} &= \{a_{p_2+1}, \dots, a_{|A|-6}\}. \end{aligned} \quad (5.4)$$

В представленной реализации для равномерного разбиения по числу зон принято деление на три равные части.

Таким образом, формируются пять непересекающихся групп:

$$G_1 = I1, G_2 = I2, G_3 = I3_{\text{цент}}, G_4 = I3_{\text{л.пер.}}, G_5 = I3_{\text{пр.пер.}}. \quad (5.5)$$

3. Расчет статистических характеристик по группам. Для каждой точки по длине полосы l на основе измеренных напряжений $\sigma_z(l)$ в зонах вычисляются:

– среднее арифметическое (диагностический сигнал):

$$I_{G_k}(l) = \frac{1}{|G_k|} \sum_{z \in G_k} \sigma_z(l), \quad k = 1, \dots, 5; \quad (5.6)$$

– максимум и минимум внутри группы:

$$\max_{z \in G_k} \sigma_z(l), \quad \min_{z \in G_k} \sigma_z(l), \quad (5.7)$$

позволяющие выявлять кратковременные критические всплески, например, при прохождении сварного шва.

4. Сравнение с допуском и формирование цифрового заключения. Для итоговой аттестации качества рулона, в соответствии с принятой на стане методикой, формируются три диагностических сигнала: $I1$ – по группе левой кромки; $I2$ – по группе правой кромки; $I3$ – по центральной группе $I3_{\text{цент}}$. По результатам сравнения формируется цифровое заключение с классификацией качества рулона (зеленый, желтый и красный уровни). Дополнительно информация о состоянии переходных зон ($I3_{\text{л.пер.}}$ и $I3_{\text{пр.пер.}}$) используется для углубленного анализа, локализации дефекта по ширине полосы и выбора корректирующих воздействий, но не изменяет формата итогового заключения, что обеспечивает совместимость с существующей системой аттестации.

Эффективность разработанного алгоритма продемонстрирована на примере прокатки рулона из стали 08пс толщиной 0,8 мм и шириной 1610 мм. На рисунке 5.7, а представлена 2D-карта распределения остаточных напряжений, построенная по данным стресс-ролика. В центральной части

карты преобладает синий цвет, что соответствует зонам пониженного контакта. Участки с сочетанием синего и красного цветов визуализируют области наиболее выраженной неоднородности напряжений, что свидетельствует о значительной неплоскостности полосы.

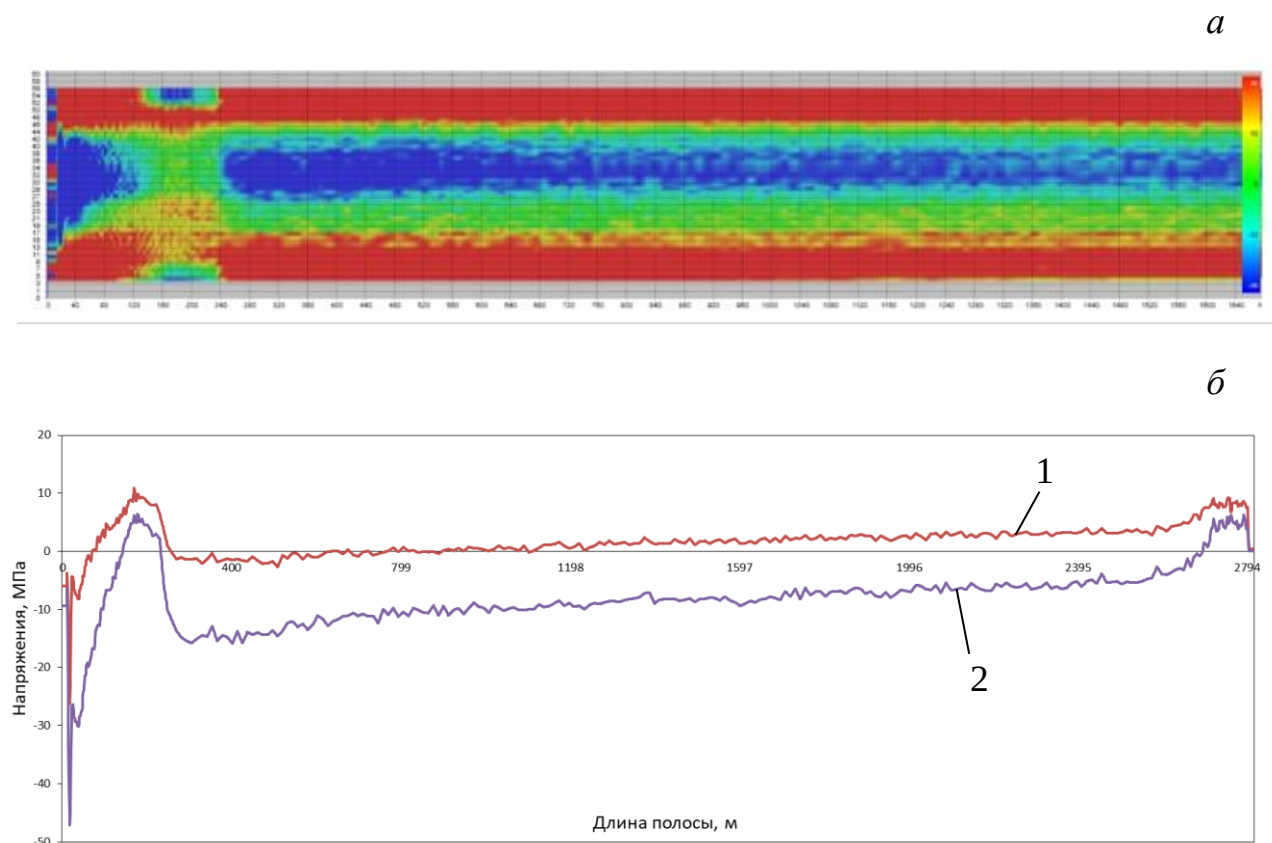


Рисунок 5.7 – Результаты анализа проблемного рулона: *а* – 2D-карта напряжений, МПа; *б* – сравнение результатов сигнала напряжений центральной зоны, построенных: 1 – базовый вариант алгоритма I_3 ; 2 – разработанный алгоритм $I_{3\text{цент}}$

На рисунке 5.7, *б* приведено сравнение сигнала центральной зоны I_3 , рассчитанного двумя способами:

- кривая 1 – базовый алгоритм, где центральная группа I_3 формируется как все активные зоны между левой и правой кромками (в данном случае 39 зон шириной 1274 мм);

– кривая 2 – разработанный алгоритм, в котором центральная зона выделена динамически $I_{3\text{цент}}$ (13 зон шириной 598 мм) после исключения переходных участков.

Из графиков видно, что при использовании базового подхода (кривая 1) сигнал I_3 находится вблизи нулевых значений (в среднем 2,44 МПа по модулю) и лишь в 22% точек фиксируется отрицательное значение. Это объясняется тем, что в усреднение попадают не только центральные зоны со сжатием, но и прилегающие переходные участки, где напряжения могут иметь противоположный знак (растяжение). В результате реальный дефект размывается, и создается ложное впечатление об отсутствии неплоскостности.

Разработанный алгоритм (кривая 2) благодаря выделению центральной зоны без переходных областей позволяет получить информативный сигнал: среднее абсолютное значение возрастает до 8,62 МПа, отрицательные значения регистрируются в 92,5% точек, а минимальное напряжение достигает $-47,09$ МПа. Такое поведение полностью соответствует визуальной картине 2D-карты, где в центре полосы четко прослеживаются устойчивые зоны сжатия.

Кроме того, разделение внутренней области на переходные зоны и центр позволяет локализовать дефект. На характерном участке 62 м от начала рулона базовый алгоритм показывает $I_3 = -0,6$ МПа. Детальный анализ сигналов по отдельным зонам в рамках разработанного алгоритма (не отраженный на рисунке 5.7, б) выявляет следующее: в левой переходной зоне фиксируются напряжения растяжения $I_{3\text{л.пер.}} = +13,43$ МПа, в центре – сжатие $I_{3\text{цент}} = -24,19$ МПа и в правой переходной зоне – растяжение $I_{3\text{л.пер.}} = +8,96$ МПа. Это однозначно указывает, что потеря устойчивости формируется именно в центральной части полосы, а переходные участки работают в противоположном знаке, что при трехгрупповом разбиении ширины приводило бы к ошибочному занижению оценки.

Таким образом, внедрение усовершенствованного алгоритма цифровой аттестации с разделением на пять диагностических зон позволяет: адаптировать анализ к фактической ширине полосы и исключить влияние краевых эффектов; устранить размывание сигнала центральной зоны за счет отделения переходных участков; повысить чувствительность к локальным дефектам и корректно локализовать неплоскостность по ширине полосы; сформировать детализированное цифровое заключение, отражающее реальное распределение напряжений.

Представленный алгоритм с пятигрупповым разбиением позволяет не только получать достоверные значения сигналов для кромок и центра, но и дополнительно контролировать переходные зоны, что особенно важно для анализа асимметричных дефектов и выбора корректирующих воздействий, например, при настройке систем регулирования CVC и WRB.

Выводы по главе 5

1. Для обеспечения стабильной плоскостности холоднокатаных полос из высокопластичных IF-сталей внедрен способ прогнозной начальной настройки систем CVC и WRB на четырехклетевом стане 2100. Промышленная апробация на 830 рулонах подтвердила его эффективность: доля неплоскостности в объеме брака и несоответствующей продукции снизилась с 1,95 % до 0,11%, а экономический эффект составил 4,1 млн руб./год.

2. Для объективной оценки качества проката в реальном времени разработан усовершенствованный алгоритм цифровой аттестации плоскостности, основанный на динамическом выделении активных зон и формировании пяти диагностических групп (левая кромка, левая переходная зона, центр, правая переходная зона, правая кромка). Такой подход позволяет исключить размывание сигнала центральной зоны, повысить

чувствительность к локальным дефектам и достоверно локализовать источник неплоскостности по ширине полосы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая проблема обеспечения стабильной плоскостности стальных холоднокатаных полос на основе выявленных закономерностей формирования геометрической формы на основных этапах производства – прокатке на непрерывном стане с системами CVC и WRB и правке на роликовых правильных машинах. Разработанные методы прогнозного управления позволили реализовать переход от традиционного регулирования по отклонению к предиктивной настройке оборудования, учитывающей технологическую наследственность горячекатаного подката и индивидуальные механические свойства каждого рулона.

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Установлены закономерности совместного регулирования профиля и плоскостности системами осевой сдвижки CVC и гидроизгиба рабочих валков WRB на непрерывном 4-клетевом стане холодной прокатки 2100. Впервые раскрыт физический механизм возникновения дефекта «диагональная волна», заключающийся в асимметричном диагональном перераспределении давления в очаге деформации при временной несогласованности между геометрическим воздействием CVC и силовым откликом WRB в процессе динамического регулирования. Обоснованы и внедрены технологические правила, ограничивающие автономную корректировку осевой сдвижки в клетях № 2 и № 3, расширяющие диапазоны регулирования гидроизгиба и обеспечивающие пространственно-временную синхронизацию воздействий систем по длине стана.

2. Выявлены и количественно оценены влияния геометрических параметров горячекатаного подката на формирование плоскостности холоднокатаных полос из высокопластичных IF-сталей. Установлено, что ключевое влияние оказывают асимметрия поперечного профиля

(клиновидность кромок, смещение вершины профиля) и температурные режимы конца прокатки и смотки. На основе этих результатов обоснован интегральный показатель качества подката X , количественно характеризующий его технологическую наследственность и включающий пять значимых параметров: минимальный левый клин, максимальное смещение вершины профиля, минимальный правый клин, ширину полосы и разность температур конца прокатки и смотки. Статистическая значимость полученных зависимостей подтверждена коэффициентом детерминации $R^2 = 0,88$ при уровне значимости $p < 0,01$.

3. Обоснован принцип прогнозной компенсации технологической наследственности подката при холодной прокатке IF-сталей, заключающийся в иерархическом распределении корректирующих воздействий систем SVC и WRB по клетям непрерывного стана. Установлены количественные соотношения, связывающие интегральный показатель качества подката X с рациональными уставками осевого смещения валков в предпоследней и последней клетях и усилием гидроизгиба в последней клетке. Промышленная апробация на 830 рулонах шириной до 1640 мм подтвердила эффективность предложенного подхода: обеспечена стабильная плоскостность полос при различных сочетаниях клиновидности кромок и смещения вершины профиля, включая случаи с высокой асимметрией. Новизна технического решения защищена патентом РФ на изобретение № 2827016.

4. Установлена линейная зависимость кривизны изгиба полосы от ее толщины и величины входного перекрытия роликовой правильной машины для диапазона толщин 1,2–3,0 мм. Обоснован рациональный уровень пластической деформации (70%), обеспечивающий устранение дефектов плоскостности для каждого рулона. Получены аналитические выражения для расчета входного перекрытия, интегрирующие данные химического состава и технологических параметров всех предшествующих переделов (горячая прокатка, холодная прокатка, отжиг, дрессировка). Достоверность

полученных зависимостей подтверждена на массиве из 15 352 рулонов при средней относительной ошибке прогноза предела текучести 7,6% и коэффициенте детерминации $R^2 = 0,84$.

5. Осуществлена промышленная апробация и внедрение разработанных технических и технологических решений в условиях действующего производства ПАО «Северсталь». Способ прогнозной настройки систем SVC и WRB для IF-сталей внедрен в промышленную эксплуатацию на непрерывном 4-клетевом стане 2100. Доля несоответствующей продукции по дефектам плоскостности снизилась с 1,95% до 0,11%, годовой экономический эффект составил 4,1 млн руб. Для объективной оценки качества проката в реальном времени внедрен усовершенствованный алгоритм цифровой аттестации плоскостности, основанный на динамическом выделении активных зон стресс-ролика и формировании пяти диагностических групп: левая кромка, левая переходная зона, центр, правая переходная зона, правая кромка. Алгоритм обеспечивает непрерывный мониторинг остаточных напряжений, автоматическую трехуровневую классификацию качества и формирование структурированного цифрового заключения для каждого рулона.

Разработанные методы прогнозного управления плоскостностью создают основу для дальнейшего повышения точности геометрии холоднокатаных полос и стабильности их производства при прокатке широких полос из различных марок стали, включая высокопрочные.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Железнов Ю.Д., Коцарь С.Л., Абиев А.Г. Статистические исследования точности тонколистовой прокатки. – М.: Металлургия, 1974. – 240 с.
2. Железнов Ю.Д., Кузнецов Л.А., Рокотян Г.Г. Настройка, стабилизация и контроль процесса тонколистовой прокатки. – М.: Металлургия, 1975. – 376 с.
3. Настич В.П., Божков А.И. Управление качеством холоднокатаных полос. – М.: Интермет Инжиниринг, 2006. – 216 с.
4. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Босхамджиев Н.Ш. Производство планшетных полос при прокатке. – М.: Теплотехник, 2008. – 336 с.
5. Бельский С.М., Мазур И.П., Лежнев С.Н., Панин Е.А. Формоизменение полосы при тонколистовой прокатке. – Темиртау: КГИУ, 2016. – 161 с.
6. Гарбер Э.А. Станы холодной прокатки (теория, оборудование, технология). – М: Черметинформация; Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ, 2004. – 416 с.
7. Гарбер Э.А. Производство проката: Справочное издание. Том 1. Книга 1. Производство холоднокатаных полос и листов (сортамент, теория, технология, оборудование). – М.: Теплотехник, 2007. – 368 с.
8. Ginzburg V.B., Ballas R. Flat Rolling Fundamentals. – CRC Press: Marcel Dekker, 2000. – 850 p.
9. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория прокатки. – Москва: Металлургия, 1980. – 318 с.
10. Румянцев М.И., Завалищин А.Н., Колыбанов А.Н., Есипова О.Н. Обоснование натяжения полосы в цифровом двойнике стана холодной прокатки // Черные металлы. – 2021. – № 11. – С. 55-60.

11. Румянцев М.И., Завалищин А.Н., Колыбанов А.Н., Ахмадиев К.Р. Особенности натяжения полосы на различных участках стана холодной прокатки и их отображение в цифровом двойнике // Теория и технология металлургического производства. – 2022. – №1(40). – С. 19-24.
12. Wang X., Yang Q., Jiang Z., Xu J. Research on the improvement effect of high tension on flatness deviation in cold strip rolling // Steel Research International. – 2014. – Vol. 85. – Iss. 11. – P. 1560-1570.
13. Василев Я.Д., Самокиш Д.Н., Замогильный Р.А., Железнов Д.В. Экспериментальное исследование влияния натяжения на силу прокатки и кривые пластичности при холодной прокатке // Обработка материалов давлением. – 2017. – Т. 44. – № 1. – С. 192-198.
14. Зенченко Ф.И., Ноговицын А.В., Мазур В.Л. и др. Эффективная технология холодной прокатки тонколистовой стали на непрерывных станах // Сталь. – 1985. – № 1. – С. 43-48.
15. Tarnopolskaya T., Yuen W.Y.D. Analysis of the effect of tension at the entry of cold rolling mill on the stability of strip tracking // ISIJ International. – 2005. – Vol. 45. – № 9. P. 1316-1321.
16. Божков А.И., Настич В.П. Плоскостность тонколистового проката. – М.: СП «Интермет инжиниринг», 1998. – 264 с.
17. Мазур В.Л., Ноговицын А.В. Теория и технология тонколистовой прокатки (численный анализ и технические приложения). – Днепропетровск: РВА «Дніпро-VAL», 2010. – 500 с.
18. Харламов И.А., Болобанова Н.Л., Юсупов В.С. Формирование плоскостности холоднокатаных полос: физические закономерности и практика регулирования на промышленном стане // Прокатное производство. Приложение к журналу «Технология металлов». – 2025. – № 24. – С.1-9.
19. Wang D.C., Liu H.M., Liu J. Research and development trend of shape control for cold rolling strip // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 30. – P. 1248-1261.

20. Прживара Й., Шпрайтцхофер Г., Дюммлер А. Новый бесконтактный способ измерения плоскостности для реверсивных клеток холодной прокатки // Черные металлы. – 2004. – № 1. – С. 31-33.

21. Приходько И.Ю., Чернов П.П., Разносилин В.В., Сергеенко А.А., Трусилло С.В., Агуреев В.А., Соболев А.И., Парсенюк Е.А., Цуканов Ю.А. Система автоматического регулирования плоскостности полос и температуры с использованием бесконтактных методов // Сталь. – 2009. – № 3. – С. 41-45.

22. Синицкий О.В., Полецков П.П. Элементы современных технологических систем для обеспечения геометрии и формы листового проката // Калибровочное бюро. – 2015. – Вып. 6. – С. 72-99.

23. Робертс В. Холодная прокатка стали. – М.: Металлургия, 1982. – 524 с.

24. Джексон Д. Ряды Фурье и ортогональные полиномы. – М.: ГИИЛ, 1948. – 260 с.

25. Божков А.И., Гуляев Н.И., Белов В.С., Бояршинов О.А. Влияние некоторых технологических факторов на плоскостность холоднокатаных полос // Тонколистовая прокатка: межвузовский сборник. – Воронеж, 1983. – С. 109-115.

26. Третьяков В.А., Барышев В.В., Кудинов С.В. Методика расчета упругих деформаций четырех- и шестивалковых систем с осевой сдвижкой валков // Технология машиностроения: сб. науч. тр. – Липецк, 1996. – С. 83-93.

27. Ромашкевич Л.Ф., Масальский Я.С., Божко Ю.П. Управление профилем и формой горячекатаных полос и листов за рубежом // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической информации. – 1987. – № 13. – С. 20-30.

28. Шкарин А.Н. Формирование плоскостности холоднокатаных полос с учетом особенностей профиля поперечного сечения горячекатаного

подката: дис. ... канд. техн. наук: 2.6.4. – Липецкий государственный технический университет, Липецк, 2021. – 115 с.

29. Григорян Г.Г., Железнов Ю.Д., Черный В.А., Кузнецов Л.А., Журавский А.Г. Настройка, стабилизация и контроль процесса тонколистовой прокатки. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.

30. Третьяков А.В., Гарбер Э.А., Давлетбаев Г.Г. Расчет и исследование прокатных валков. – М.: Металлургия, 1976. – 256 с.

31. Будакова А.А., Коновалов Ю.В., Ткалич К.Н., Качалка З.Г., Паргамонов Е.А. Профилирование валков листовых станов. – К.: Техника, 1986. – 190 с.

32. Николаев В.А. Профилирование и износостойкость листовых валков. – Киев: Техника, 1992. – 158 с.

33. 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.

34. 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.

35. Салганик В.М., Виер И.В., Полецков П.П., Румянцев М.И. Развитие валковых систем SVC на основе математического моделирования для повышения качества холоднокатаного проката и стойкости валков // Труды V конгресса прокатчиков. – М.: Черметинформация. – 2004. – С. 146-150.

36. Виер И.В. Моделирование профилировки валков клетей кварто для расширения диапазона регулирования плоскостности холоднокатаных полос и повышения стойкости инструмента: автореферат дис. ...канд. техн. наук: 05.16.05. – МГТУ им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2004. – 25 с.

37. Болобанова Н.Л., Антонов П.В., Котов К.А., Юсупов В.С. Моделирование и исследование формообразования стального листового проката и совершенствование процессов его производства: монография. – Череповец: ЧГУ, 2023. – 264 с.

38. Liu G.M., Di H.S., Chang A. Discussion on design of CVC roll contour and its equivalent crown // Journal of Northeastern University (Natural Science). – 2008. – Vol. 29. – No. 10. – P. 1443-1446.

39. Liu G.M., Li Y.G., Huang Q.X., Yang X. Axial force analysis and roll contour configuration of four-high CVC mill // Mathematical Problems in Engineering. – 2018. – Vol. 2018, 7527402.

40. Belskiy S., Shopin I., Cherkashin V. Calculation of the coefficients of the CVC working roll profiling equation // Proceedings of the 2025 7th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). – Lipetsk, 2025. – P. 304-307.

41. Seilinger A., Nopp G., Finstermann G., Djumlija G. Design and performance of tandem cold-rolling mills with 6-high and 4-high technology / // Труды 9-ой Международной и 4-ой Европейской конференции «Steel Rolling 2006». – Париж, 2006. – С. 219-226.

42. Финстерманн Г., Селлингер А., Нопп Г., Джумлиа Г. Сравнение четырех- и шестивалковых станов холодной прокатки / // Черные металлы. – 2007. – № 3. – С. 33-40.

43. Гарбер Э.А. Математическое обеспечение модернизации широкополосных станов холодной прокатки // Труды II Конгресса прокатчиков. – М. Ин-т «Черметинформация». – 1998. – С. 219-227.

44. Пелькинг Х.-Й., Шиллинг Т. Улучшение качества холоднокатаных полос путем внедрения высокотехнологичного оборудования // Труды II Конгресса прокатчиков. – М.: Институт «Черметинформация». – 1998. – С. 153-157.

45. Пелькинг Х.-Й. Новейшие технологии холодной прокатки // Труды III Конгресса прокатчиков. – М.: Институт «Черметинформация». – 2000. – С. 152-154.

46. Матвеев Б.Н. Совершенствование технологии и оборудования для холодной прокатки полос // Производство проката. – 2003. – №2. – С. 19-23.

47. Горбасев Н.И., Оратовский Е.Л., Сафонова М.К. Применение шестивалковых клеток на широкополосных станах // Черная металлургия. – М.: Ин-т «Черметинформация». – 1985. – № 24. – С. 3-13.

48. Linghu K., Jiang Z., Li F., Zhao J., Yu M., Wang Y. FEM analysis of profile control capability during rolling in a 6-high CVC cold rolling mill // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 988. – P. 257-262.

49. Пименов В. А., Бельский С. М., Кузнецова Е. В., Шкарин А. Н. Математическая модель идентификации формы профиля поперечного сечения горячекатаных полос и распределения вытяжек по ширине холоднокатаных полос. Сообщение 1 // Производство проката. – 2018. – № 1. – С. 11-15.

50. Пименов В. А., Бельский С. М., Кузнецова Е. В., Шкарин А. Н. Математическая модель идентификации формы профиля поперечного сечения горячекатаных полос и распределения вытяжек по ширине холоднокатаных полос. Сообщение 2 // Производство проката. – 2018. – № 6. – С. 9-14.

51. Бельский С.М. Параметры оценки формы профиля поперечного сечения горячекатаных стальных полос. Сообщение 1. Коэффициент детерминации // Черные металлы. – 2017. – № 10. – С. 65-70.

52. Бельский С.М. Параметры оценки формы профиля поперечного сечения горячекатаных стальных полос. Сообщение 2. Коэффициент седловидности // Черные металлы. – 2017. – № 11. – С. 42-47.

53. Бельский С.М., Шопин И.И. Применение коэффициента седловидности для оценки качества горячекатаной полосы // Черные металлы. – 2019. – № 9. – С. 9-13.

54. Бельский С.М., Пименов В.А., Шкарин А.Н. Оценка фактической формы контура профиля поперечного сечения горячекатаного подката. Сообщение 1. Геометрические параметры // Черные металлы. – 2020. – № 8. – С. 25-28.

55. Бельский С.М., Пименов В.А., Шкарин А.Н. Оценка фактической формы контура профиля поперечного сечения горячекатаного подката. Сообщение 2. Классификатор профилей // Черные металлы. – 2020. – № 12. – С. 33-37

56. Шкарин А. Н., Бельский С. М., Пименов В. А. Влияние формы профиля поперечного сечения горячего подката на формирование эпюры удельных натяжений холоднокатаных полос // Metallurg. – 2020. – № 7. – С. 85-90.

57. Бельский С.М., Пименов В.А., Шкарин А.Н. Об адекватности параметров профиля поперечного сечения полосы. Сообщение 1. Предсказательный интервал // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 1. – С. 7-13.

58. Бельский С.М., Пименов В.А., Шкарин А.Н. Об адекватности параметров профиля поперечного сечения полосы. Сообщение 2. Локальные утолщения и утонения // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 3. – С. 171-177.

59. Шалаевский Д. Л., Корепина К. П. Исследование влияния поперечного профиля холоднокатаных полос на возникновение дефектов планшетности / Черные металлы. – 2022. – № 3. – С. 56-59.

60. Ковалев Д.А., Пименов В.А., Дагман М.А., Бельский С.М., Мазур И.П. Разработка математической модели прогнозирования поперечного

профиля холоднокатаных полос из динамной стали. Сообщение 2 // Черные металлы. – 2023. – № 3. – С. 25-28.

61. Дегтев С.С., Филиппев С.Н., Божков А.И., Владимиров А.Д., Морозов А.В., Черномырдин В.И., Жданов П.А. Исследование формирования плоскостности тонколистового проката // Сталь. – 2024. – № 10. – С. 8-14.

62. Шаталов Р.Л. Развитие теории расчета силовых показателей прокатки по длине тонких полос и лент // Черные металлы. – 2023. – № 11. – С. 23-28.

63. Shatalov R.L., Maksimov, E.A. Development and application of the theory of rigid ends in thin-sheet rolling // Metallurgist. – 2021. – Vol. 64. – No. 9-10. – P. 1035-1042.

64. Shatalov R.L., Kulikov M.A. Influence of outer parts of a strip on the deformation and force parameters of thin-sheet rolling // Metallurgist. – 2020. – Vol. 64. – No. 7-8. – P. 687-698.

65. Шаталов Р.Л., Максимов Е.А. Уточнение метода расчета критических напряжений и показателей плоскостности полосы при тонколистовой прокатке // Сталь. – 2016. – № 4. – С.26-30.

66. Shan X., Liu H., Jia C., Sun J. Flatness and profile integration control model for tandem cold mills // Journal of Iron and Steel Research International. – 2012. – Vol. 19. – No. 3. – P. 31-37.

67. Zhao J., Li J., Qie H., Wang X., Shao J., Yang Q. Predicting flatness of strip tandem cold rolling using a general regression neural network optimized by differential evolution algorithm // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 126. – P. 3219-3233.

68. Zhou X., Li L., Wang S., Xiong Q. Research on dynamic flatness feedback control strategy based on IGWO control efficiency identification for cold tandem rolling mill. International Journal of Machine Learning and Cybernetics. – 2025. – Vol. 16. – Iss. 9. – P. 5397-5417.

69. Song M., Liu H., Wang D., Xu Y. Decoupling strategy and dynamic decoupling model of flatness control in cold rolling strip // ISIJ International. – 2020. – Vol. 60. – No. 2. – P. 286-296.

70. Wang F., Liu C., He A., Song Y., Shao J., Yao C., Qiang Y., Liu H., Ma B. An optimization framework for hot-rolled strip crown control based on model-driven digital twin // Journal of Iron and Steel Research International. – 2025. – Vol. 32. – P. 1920-1939.

71. Chen Y., Feng P., Zhou J., Peng L., Li C. An improved method for calculating roll deformation of six-high rolling mill: enhances computation speed and accuracy // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2024. – Vol. 130. – P. 3755-3770.

72. Целиков А.И., Полухин П.И., Гребеник В.М., Иванченко Ф.К., Тылкин М.А., Королев А.А., Лопухин В.П., Сторожик Д.А., Павленко Б.А., Целиков А.А., Елинсон И.М., Зюзин В.И. 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.

73. Королев А.А. Упруго-пластический изгиб полосы при правке ее на многороликовой машине // Материалы сборника статей «Прокатные станы и технология прокатки. – М.: Машгиз, 1957. – С. 57-76.

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

75. Королев А.А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов. – М.: Металлургия, 1985. – 376 с.

76. Слоним А.З., Сонин Л.А. Машины для правки листового и сортового проката. – М.: Металлургия, 1981. – 232 с.

77. Недорезов И.В. Моделирование процессов правки проката на роликовых машинах. – Екатеринбург: АКВА-пресс, 2003. – 255 с.

78. Недорезов И.В. Основные подходы к моделированию процессов правки проката на роликовых машинах // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Непрерывные процессы обработки давлением». – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – С. 179-184.

79. Шелест А.Е., Юсупов В.С., Перкас М.М., Шефтель Е.Н., Просвирнин В.В., Акопян К.Э. Разработка методики определения геометрических и деформационных параметров правки металлических листов на роликоправильных машинах // Производство проката. – 2016. – №. 7. – С. 2-8.

80. Шелест А.Е., Юсупов В.С., Перкас М.М., Шефтель Е.Н., Акопян К.Э., Просвирнин В.В. Знакопеременная упруго-пластическая деформация как инструмент воздействия на механические свойства листового металла// Институт металлургии материаловедения им. А.А. Байкова РАН – 80 лет. Сборник научных трудов. – М.: Интерконтакт Наука, 2018. – С. 187-216.

81. Шинкин В.Н., Барыков А.М. Расчет технологических параметров холодной правки стального листа на девятироликовой листоправильной машине SMS Siemag металлургического комплекса стан-5000 // Производство проката. –2014. – № 5. – С. 7-15.

82. Шинкин В.Н. Расчет технологических параметров правки тонкой стальной полосы на пятнадцатироликовой листоправильной машине фирмы Fagor Arrasate // Молодой ученый. – 2015. – № 10. – С. 361-366.

83. Шинкин В.Н. Расчет сил и моментов семироликовой правильной машины при предварительной правке стального листа // Известия Высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2017. – Т. 59. – №. 12. – С. 870-874.

84. Шинкин В.Н. Приближенные методы расчета $(2n+1)$ -роликовой листоправильной машины. Часть 1. Первое приближение // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2017. – № 2–1. – С. 40-44.

85. Шинкин В.Н. Приближенный метод расчета кривизны листа при правке на семироликовой машине // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2017. – № 1-3. – С. 44-47.

86. Shinkin V.N. Arithmetical method of calculation of power parameters of 2N-roller straightening machine under flattening of steel sheet // CIS Iron and Steel Review. – 2017. – Vol. 14. – P. 22-27.

87. Maksimov E.A., Shatalov R.L. A Study of the parameters for hot straightening of thick steel plates on a roller straightening machine // Metallurgist. – 2018. – Vol. 62 (1-2). – P. 132-137.

88. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л. Повышение качества листов из строительных сталей путем правки на роликовой правильной машине // Черные металлы. – 2018. – № 6. – С. 49-55.

89. Chen W. A 2.5-dimensional analytical model of cold leveling for plates with transverse wave defects // Journal of Iron and Steel Research International. – 2015. – Vol. 22. – No. 8. – P. 664-671.

90. Madej L., Muszka K., Perzyński K., Majta J., Pietrzyk M. Computer aided development of the levelling technology for flat products // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2011. – Vol. 60. – P. 291-294.

91. Behrens B.A., El Nadi T., Krimm R. Development of an analytical 3D-simulation model of the levelling process // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – Vol. 211. – No. 6. – P.1060-1068.

92. Behrens B.-A., Krimm R. Controlled sheet metal straightening // Supplemental Proceedings 3, TMS. – 2008. – P. 129-136.

93. Silvestre E., Sáenz de Argandoña E., Galdós L., Mendiguren J. Testing and modeling of roll levelling process // Key Engineering Materials. – 2014. – Vol. 611–612. – P. 1753-1762.

94. Behrens B.-A., Nadi T.El., Krimm R. Development of an analytical 3D-simulation model of the levelling process // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – Vol. 211. – No. 6. – P.1060–1068.

95. Grüber M., Hirt G. Numerical investigation of a process control for the roller levelling process based on a force measurement // Materials Science Forum. Trans Tech Publications. – 2015. – Vol. 854. – P. 249-254.

96. Grüber M., Oligschläger M., Hirt G. The effect of the initial stress and strain state in sheet metals on the roller levelling process // Key Engineering Materials. Trans Tech Publications. – 2015. – Vol. 651. – P. 1023-1028.

97. Grüber M., Hirt G. A strategy for the controlled setting of flatness and residual stress distribution in sheet metals via roller levelling // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 207. – P. 1332-1337.

98. Грибков Э.П., Завгородний А.В., Гаврильченко Е.Ю., Горбенко А.С. Программное обеспечение для проектирования технологических параметров настройки многороликовых листопрямильных машин // Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. – 2015. – № 2. – С. 33-38.

99. Барабаш А.В., Гаврильченко Е.Ю., Грибков Э.П., Марков О.Е. Моделирование процесса правки на листопрямильных машинах с исправлением дефекта волнистости проката // Сталь. – 2014. – № 12. – С. 62-66.

100. Котов К.А. Исследование и совершенствование процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05. – Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, 2020. – 139 с.

101. Василев Я.Д. Математические модели предела текучести углеродистых и легированных сталей в диапазоне дорекристаллизационных температур деформации // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59. – № 6. – С. 385-391.

102. Лукин Ю.С., Бахтин С.В., Лукин А.С. Закономерности формирования механических свойств в IF-сталях // Производство проката. – 2011. – № 5. – С. 9-13.

103. Родионова И.Г., Мишнев П.А., Адигамов Р.Р., Быкова Ю.С., Жиленко С.В., Мельниченко А.С. Особенности формирования структуры и свойств холоднокатаных низкоуглеродистых сталей для автомобилестроения в зависимости от степени обжатия при холодной прокатке // Технология колесных и гусеничных машин. – 2013. – № 2. – С. 20-28.

104. Шкатов В.В., Шкатов В.В. Применение нейронных сетей для прогнозирования характеристик пластичности горячекатаных листовых сталей // Современные материалы, техника и технологии. – 2018. – № 3. – С. 42-46.

105. Окишев К.Ю., Гафаров М.Ф., Павлова К.П., Маковецкий А.Н., Гафарова Е.А. Построение и анализ моделей предсказания пределов текучести трубных сталей после термической обработки с помощью методов машинного обучения // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2022. – № 10. – С. 10-17.

106. Румянцев М.И., Шубин И.Г., Митасов В.С., Насонов В.В. Сравнение методов прогнозирования деформационного упрочнения металла при автоматизированном проектировании режимов холодной прокатки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2012. – № 2. – С. 39-42.

107. Бельский С. М., Мазур И. П., Дождиков В. И., Васильев В. Б. Регулирование плоскостности прокатываемых полос на базе математической модели распределения продольных напряжений // Вестник ТГУ. 2013. Т. 18. Вып. 1. С. 17-22.

108. Антонов П.В. Разработка и исследование новых методов воздействия на поперечный профиль холоднокатаных полос и повышения качества их поверхности: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05. – Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, 2019. – 100 с.

109. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Антонов П.В. Новые методы воздействия на поперечный профиль и качество поверхности стальных холоднокатаных полос: Монография. – Череповец: Череповецкий гос. ун-т, 2021. – 81 с.

110. Бинум М. Л., Хакебейл Г. А., Харт У. Э., Лэрд К. Д., Николсон Б. Л., Сиирола Д. Д., Уотсон Ж.-П., Вудраф Д. Л. Pyomo. Моделирование оптимизации на Python / пер. с англ. А. А. Слинкина. – М.: ДМК Пресс, 2023. – 230 с.

111. Allen B. Downey Modeling and Simulation in Python. Version 3.4.3 – 2017. – Needham, Massachusetts: Green Tea Press. – 228 p.

112. Инженерия данных в Python: Основы анализа данных с помощью Pandas, NumPy и Scikit-learn / пер. с англ. А. Ю. Гинько. – М.: ДМК Пресс, 2025. – 528 с.

113. Tibshirani R. Regression Shrinkage and Selection via the Lasso // Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological). – 1996. – Vol. 58. – No. 1. – P. 267-288.

114. Харламов И.А., Болобанова Н.Л. Влияние совместного регулирования систем CVC и гидроизгиба валков на точность геометрии холоднокатаных полос // Сталь. 2025. № 7. С. 14-17.

Kharlamov I. A., Bolobanova N.L. Influence of Combined Control of CVC Systems and Hydro-Bending of Rolls on the Accuracy of Geometry of Cold Rolled Strips // Steel in Translation. – 2025. – Vol. 55. – № 8. – P. 793-797. (перевод).

115. Харламов И.А., Благовещенская И.И., Болобанова Н.Л. Исследование параметров горячекатаного подката и определение условного показателя качества для управления плоскостностью холоднокатаных полос // Заготовительные производства в машиностроении. – 2025. – № 11. – С.515-522.

116. Takechi H. Metallurgical aspects on interstitial free sheet steel from industrial viewpoints // ISIJ International. – 1994. – Vol. 34. – No. 1. P. 1-8. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.34.1>.

117. Родионова И.Г., Углов В.А., Зайцев А.И., Протасов А.В., Мишнев П.А., Адигамов Р.Р., Павлов С.И., Ласьков С.А., Николаев О.А., Кирюшин А.А., Тихонов А.К., Рябчиков В.Г. Разработка и освоение высококачественных экономичных автолистовых сталей нового поколения // Сталь. – 2016. – № 1. – С. 46-54.

118. Способ производства холоднокатаного проката. Патент на изобретение № 2827016, Российская Федерация, МПК В21В28/02 – 2023123453; заявл. 11.09.2023; опубл. 20.09.2024. Бюл. № 26. / Харламов И.А., Благовещенская И.И., Купрейчик И.С., Иванов С.В., Аралов А.И., Малов В.Ю., Стрекин А.Г.

119. Харламов И.А., Болобанова Н.Л. Способ предварительной настройки параметров CVC и WRB многоклетового стана холодной прокатки для обеспечения плоскостности полос из IF-стали // Черные металлы. – 2026. – № 2. – С. 36-43.

120. Харламов И.А., Болобанова Н.Л. Подход к прогнозной настройке систем CVC и WRB для обеспечения плоскостности холоднокатаных полос // Metallurg. – 2026. – № 2. – С. 57-63.

121. Котов К.А., Болобанова Н.Л., Нуштаев Д.В. Разработка режимов правки горячекатаных полос в целях получения проката для высокотехнологичной обработки // Черные металлы. – 2021. – № 2. – С. 16–21.

122. Салганик В.М., Зайцев Д.А. Математическое описание процесса холодной правки толстых листов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2016. – Т. 1. – № 1. – С. 56-59.

123. Барабошкин К.А., Адигамов Р.Р., Юсупов В.С., Кожевникова И.А., Карлина А.И. Термомеханическая прокатка при производстве обсадных труб

(обзор исследований) // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 3. – С. 24-51.

124. Харламов И.А., Болобанова Н.Л. Цифровой подход к аттестации плоскостности холоднокатаных полос // Сталь. – 2026. – № 3. – С.20-26.

Приложение А

Справка об экономическом эффекте

СПРАВКА ОБ ЭКОНОМИЧЕСКОМ ЭФФЕКТЕ

Настоящая справка подтверждает экономический эффект от реализации результатов диссертационной работы Харламова Игоря Анатольевича в условиях действующего металлургического производства ПАО «Северсталь».

В ходе выполнения и внедрения работ были реализованы следующие основные решения:

1. Разработка и применение модели условного показателя качества горячекатаного подката X для оценки влияния технологической наследственности на формирование плоскостности холоднокатаных полос;

2. Разработка и промышленное использование способа прогнозной начальной настройки систем осевой сдвижки CVC и гидроизгиба WRB на непрерывном 4-клетевом стане холодной прокатки 2100;

3. Внедрение технологических правил согласованного регулирования CVC и WRB при производстве холоднокатаного проката для автолиста.

Целью выполненных работ являлось обеспечение стабильной плоскостности холоднокатаных полос из IF-сталей и снижение отсортировки по дефектам, связанным с неплоскостностью, за счет перехода от корректировки по факту к прогнозному назначению уставок систем CVC и WRB по параметрам горячекатаного подката.

Экономический эффект сформирован за счет повышения выхода годного автолиста по дефектам неплоскостности и по ее вине (царапины, дросс, порезы с печи), сокращения объема несоответствующей продукции и уменьшения потребности в доработке рулонов.

По данным расчета экономической эффективности установлено:

– выход годного увеличился с 78,7 % до 93,5 %;

– объем продукции, отсортированной по дефектам вызванным «неплоскостностью», снизился с 450,25 т до 5,6 т;

– доля неплоскостности в объеме НП+брака снизилась с 1,95 % до 0,11 %.

Период разработки и внедрения решений – ноябрь–декабрь 2021 г. Оценка экономического эффекта выполнена сравнением производственных результатов за 12 месяцев до внедрения (2021 г.) и за 12 месяцев после внедрения (2022 г.).

По результатам выполненного расчета экономический эффект от внедрения составил 4,1 млн руб.

Научно-технической основой внедренных решений являются результаты диссертационной работы, а также техническое решение, получившее правовую охрану по патенту РФ № 2827016 «Способ производства холоднокатаного проката».

Настоящая справка выдана для представления по месту требования в составе материалов кандидатской диссертации.

Директор по техническому развитию и
качеству



Р.Р. Адигамов

Приложение Б

Акт внедрения



АКТ ВНЕДРЕНИЯ результатов диссертационной работы

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Харламова Игоря Анатольевича использованы в условиях действующего металлургического производства ПАО «Северсталь» при совершенствовании технологии производства холоднокатаных полос для автолиста.

Основание внедрения – выполнение диссертационного исследования, направленного на разработку технологических решений по управлению плоскостностью холоднокатаных полос на непрерывном стане холодной прокатки с системами осевой сдвижки рабочих валков CVC и гидроизгиба рабочих валков WRB.

В рамках внедрения выполнены и использованы следующие результаты:

1. Разработана и применена модель условного показателя качества горячекатаного подката X, учитывающая клиновидность кромок, смещение вершины поперечного профиля, ширину полосы, температуру конца прокатки и температуру смотки;
2. Разработан способ прогнозирования начальной настройки систем CVC и WRB на непрерывном 4-клетевом стане холодной прокатки 2100 с определением рациональных уставок осевого смещения валков в последней и предпоследней клетях и усилия гидроизгиба в последней клетке на основе рассчитанного показателя X;
3. Приняты к использованию технологические правила согласованного регулирования систем CVC и WRB, направленные на предупреждение дефектов плоскостности, в том числе дефекта «диагональная волна», и на обеспечение стабильной плоскостности полос из IF-сталей шириной до 1640 мм;
4. Подготовлены рекомендации по практическому использованию способа при производстве холоднокатаного и холоднокатаного оцинкованного проката для автолиста.

В результате внедрения указанные решения приняты к практическому использованию в технологической настройке непрерывного 4-клетевого стана холодной прокатки 2100 ПАО «Северсталь» при производстве автолиста. Применение разработанного способа обеспечило снижение доли несоответствующей продукции по дефектам плоскостности с 1,95 % до 0,11 %.

Научно-техническая основа внедрения получила правовую охрану патентом Российской Федерации на изобретение № 2827016 «Способ производства холоднокатаного проката» (заявка № 2023123453 от 11.09.2023, дата регистрации патента 20.09.2024).

Период разработки и фактического внедрения решений – ноябрь-декабрь 2021 г. Результаты внедрения подтверждены производственными показателями за 12 месяцев после внедрения (2022 г.).

Настоящим подтверждается, что результаты диссертационной работы Харламова И.А. внедрены в производственную практику и приняты к использованию в ПАО «Северсталь».

Начальник управления

Е.С. Федотов