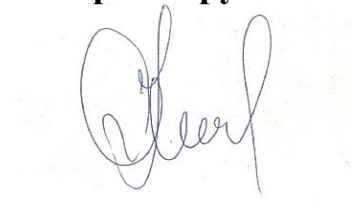


На правах рукописи



ХАРЛАМОВ Игорь Анатольевич

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

Специальность 2.6.4. Обработка металлов давлением

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

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

Научный – доктор технических наук, доцент, заведующий
руководитель кафедрой металлургии, машиностроения и
технологического оборудования Череповецкого
государственного университета **Болобанова
Наталья Леонидовна**

Официальные – **Шаталов Роман Львович**
оппоненты доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Обработка материалов давлением и
аддитивные технологии», федеральное
государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Московский
политехнический университет»
– **Мунтин Александр Вадимович**, кандидат
технических наук, АО «Выксунский
металлургический завод», Инженерно-технический
центр, директор

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

Защита состоится «23» декабря 2026 года в 14:00 часов на заседании
диссертационного совета 24.1.078.02 (Д.002.060.02), созданного на базе
федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт
металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук
(ИМЕТ РАН), по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 49, БКЗ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИМЕТ РАН, а также
на официальном сайте ИМЕТ РАН <http://www.imet.ac.ru/> и на сайте ВАК РФ
<https://vak.minobrnauki.gov.ru/main>.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных
печатью, с указанием почтового адреса и контактного телефона) просьба
отправлять по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский пр., д. 49,
Диссертационный совет 24.1.078.02 (Д.002.060.02). Копии отзывов в
электронном виде направлять по e-mail: andreev.imet.dis@mail.ru.

Автореферат диссертации разослан « »

2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук



Андреев В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 сдвижка 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 SVC 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 SVC 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 прогнозному 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость, методология и методы исследования, степень достоверности результатов, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен анализ современного состояния и перспективных направлений исследований в области обеспечения плоскостности холоднокатаных полос.

Выполненный литературный обзор показал, что определяющий вклад в развитие теории плоскостности и ее регулирования на непрерывных станах внесли работы Ю.Д. Железнова, С.Л. Коцаря, Л.А. Кузнецова, Г.Г. Рокотяна, В.П. Настича, А.И. Божкова, Р.Л. Шаталова, С.М. Бельского и других исследователей. В зарубежной литературе активно развиваются методы статистического анализа больших данных и гибридные модели, интегрирующие физические принципы прокатки с алгоритмами машинного обучения. При этом установлено, что недостаточно изученным остается совместное влияние систем осевой сдвижки SVC и гидроизгиба рабочих валков WRB на формирование плоскостности холоднокатаных полос. Это приводит к возникновению сложных дефектов пространственной неустойчивости, в том числе дефекта «диагональная волна» (рисунок 1), особенно при прокатке высокопластичных IF-сталей и в переходных режимах. Кроме того, показано, что отсутствует способ прогнозной настройки этих систем до начала прокатки, учитывающий индивидуальные параметры подката.

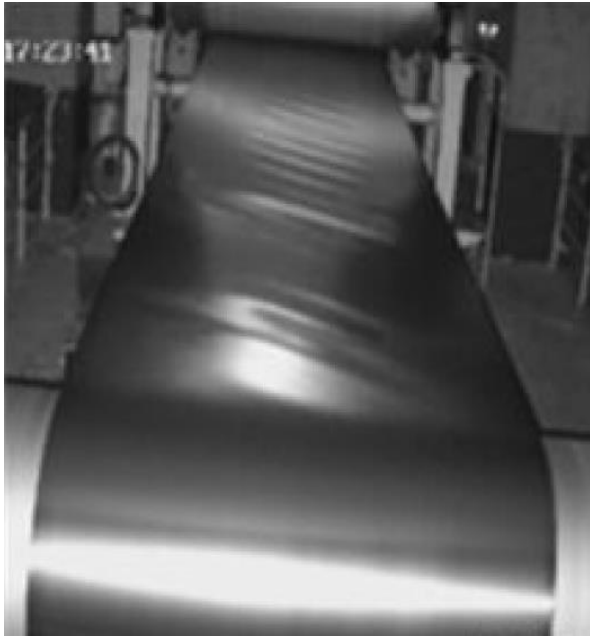


Рисунок 1 – Холоднокатаная полоса с дефектом «диагональная волна»

Анализ существующих теоретических подходов к расчету режимов правки в работах А.А. Королева, И.В. Недорезова, В.Н. Шинкина, Р.Л. Шаталова, А.Е. Шелеста и других показал важность точного задания предела текучести как входного параметра. Однако в промышленной практике настройка роликовых правильных машин ведется по усредненным справочным данным, без учета индивидуальной технологической истории рулона. Несмотря на наличие исследований по прогнозированию предела текучести, они либо ориентированы на узкие

классы сталей, либо не охватывают всю совокупность технологических переделов (горячую и холодную прокатку, отжиг, дрессировку), влияющих на конечные свойства холоднокатаной полосы. Решение этой проблемы требует разработки метода прогнозирования предела текучести по данным всех предшествующих переделов и установления зависимости между настройками машины и достигаемой пластической деформацией.

Отмечено, что в области оценки и аттестации плоскостности в условиях высокоавтоматизированного листопрокатного производства также имеются нерешенные проблемы. Показано, что недостаточно формализованы алгоритмы цифровой аттестации плоскостности на основе данных стресс-роликов, что ограничивает интеграцию информации о качестве в автоматизированные системы управления.

Таким образом, решение перечисленных научно-технических проблем направлено на развитие теоретических основ управления плоскостностью холоднокатаных полос, совершенствование методов прогнозной настройки систем воздействия CVC и WRB, разработку подходов к индивидуальному расчету режимов правки с учетом технологической наследственности, а также создание алгоритмов цифровой аттестации качества. Реализация этих решений обеспечивает повышение точности геометрических параметров проката и стабильности производства широких стальных холоднокатаных полос для высокотехнологичных отраслей.

Во второй главе приведено описание объектов, материалов и методик

экспериментальных и промышленных исследований. Основными объектами исследования являлись непрерывный 4-клетевой стан холодной прокатки 2100, оснащенный системами осевой сдвижки валков CVC, гидроизгиба рабочих валков WRB и роликами для измерения отклонений от плоскостности (стресс-роликами), а также агрегат поперечной резки с 15-роликовой правильной машиной, используемый для завершающей операции правки. Для исследования процесса прокатки выбраны высокопластичные IF-стали, чувствительные к неравномерности деформации; для разработки модели настройки правки использован весь сортамент холоднокатаной продукции.

Представлена комплексная методика сбора и обработки промышленных данных, включающая формирование массивов данных из систем АСУ ТП стана горячей прокатки 2000, стана холодной прокатки 2100, агрегата поперечной резки, а также результатов профилометрии, механических испытаний и показаний стресс-роликов. Обработка данных осуществлялась с применением методов математической статистики (корреляционный и факторный анализ) и машинного обучения (линейная регрессия с L1-регуляризацией LASSO, градиентный бустинг) в среде Python. Описаны методики лабораторных испытаний механических свойств на универсальной испытательной машине Zwick/Roell по ГОСТ 11701, а также порядок проведения промышленных экспериментов в условиях действующего производства ПАО «Северсталь».

В **третьей главе** представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований, направленных на создание методов прогнозного управления плоскостностью на непрерывном стане холодной прокатки.

На первом этапе проведен анализ совместной работы систем осевой сдвижки CVC и гидроизгиба рабочих валков WRB на четырехклетевом стане холодной прокатки 2100. Построена геометрическая модель зоны регулирования в координатах «осевая сдвижка S_{CVC} – усилие гидроизгиба F_{WRB} » – ромб (рисунок 2). Угловым точкам модели соответствуют экстремальные сочетания: $S_{CVC} = \pm 100$ мм, $F_{WRB} = -350...+500$ кН и различные типы поперечного профиля полосы (выпуклый, вогнутый, с прикромочными утолщениями или утонениями). Анализ переходных процессов между угловыми точками ромба при регулировании позволил раскрыть физический механизм возникновения дефекта «диагональная волна». Установлено, что дефект является следствием несогласованного динамического взаимодействия CVC и WRB. Механизм реализуется, например, при резком переходе из точки 3 в точку 1 ромба, осуществляемом для устранения центрального короба путем увеличения обжатия кромок. В точке 3 ($S_{CVC} = +100$ мм, $F_{WRB} = +500$ кН) формируется выпуклый профиль валков, что при прокатке приводит к центральному коробу – повышенной вытяжке середины полосы. В точке 1

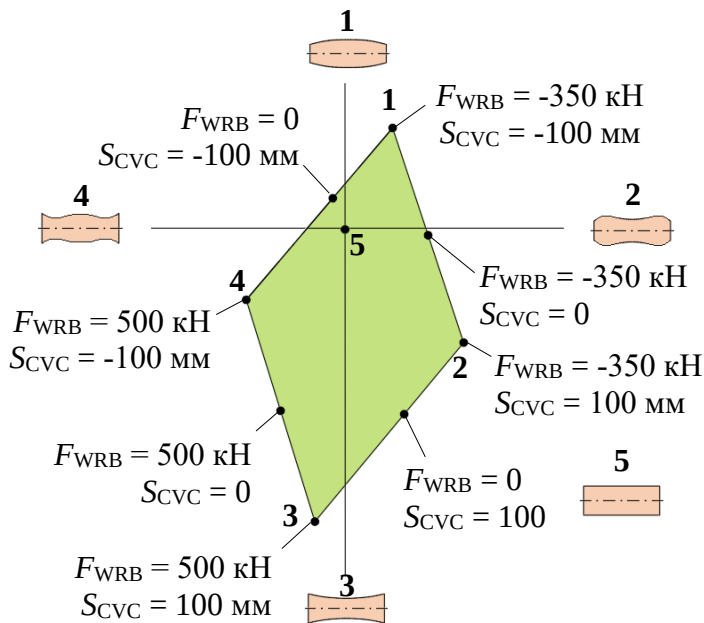


Рисунок 2 – Геометрическая модель (ромб) зоны совместного регулирования профиля полосы системами CVC и WRB

($S_{CVC} = -100$ мм, $F_{WRB} = -350$ кН) реализуется дополнительный изгиб, увеличивающий обжатие кромок. При резком перемещении CVC из положительной в отрицательную область на фоне фактического ограниченного диапазона регулирования WRB геометрия межвалкового зазора изменяется быстрее, чем успевает отреагировать система гидроизгиба. Это вызывает асимметричное диагональное перераспределение давления в очаге деформации, в результате чего зона максимального обжатия смещается по диагонали, а исходная центральная вытяжка

трансформируется в диагональную волну. Таким образом, дефект является следствием динамического перехода между точками ромба, а не установившегося режима.

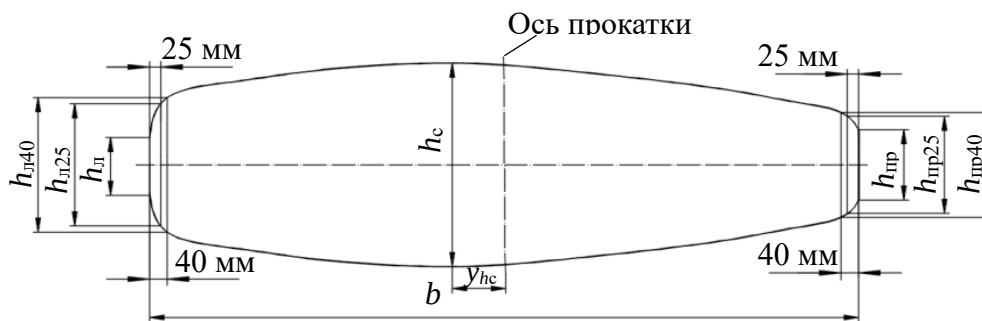
На основе этого обоснован новый принцип управления плоскостностью, заключающийся в пространственно-временной синхронизации воздействий CVC и WRB с состоянием подката, что исключает асимметричное нагружение очага деформации при динамическом регулировании.

Для практической реализации данного принципа разработаны технологические правила, учитывающие выявленный механизм. Основные изменения сфокусированы в клетях № 2 и № 3, где ранее возможна была автономная коррекция CVC. Установлен дискретный шаг изменения осевой сдвижки 4 мм, ограничивающий скорость изменения геометрии межвалкового зазора. Расширены диапазоны регулирования гидроизгиба: лимит противоизгиба увеличен до 500 кН (в 1,4–2 раза), дополнительного изгиба – до –350 кН (до 3,5 раза). Функция автоматической компенсации изменения CVC соответствующим изменением усилия WRB сохранена только в клетях № 2 и № 3, где происходит основная стабилизация напряжений, и отключена в последней клетке № 4. Внедрение этих правил позволило синхронизировать воздействия систем по длине стана и практически исключить появление диагональной волны при прокатке широких холоднокатаных полос.

На следующем этапе выполнен комплексный анализ влияния

геометрических параметров горячекатаного подката на формирование плоскостности холоднокатаных полос из IF-сталей.

С использованием методов математической статистики и машинного обучения на массиве промышленных данных, включающем свыше 500 параметров геометрии подката, режимов горячей и холодной прокатки, а также показателей плоскостности, установлено, что ключевое влияние на формирование плоскостности оказывают асимметрия поперечного профиля, в частности клиновидность левой и правой кромок и смещение вершины профиля, а также температурные режимы конца прокатки и смотки. На рисунке 3 приведена схема поперечного профиля горячекатаной полосы с указанием используемых геометрических параметров.



b – ширина полосы; y_{hc} – смещение вершины профиля от оси прокатки; h_c – толщина полосы в середине с учетом смещения вершины профиля; $h_{л25}$ и $h_{пр25}$ – толщины у левой и правой кромок на расстоянии 25 мм от каждой кромки; $h_{л40}$ и $h_{пр40}$ – толщины у левой и правой кромок на расстоянии 40 мм от каждой кромки; $h_{л}$ и $h_{пр}$ – толщины левой и правой кромок полосы

Рисунок 3 – Параметры поперечного профиля горячекатаной полосы, мм

На основе выявленных зависимостей между указанными параметрами и плоскостностью разработана регрессионная модель интегрального показателя качества подката X , количественно характеризующего технологическую наследственность. Модель отражает физические механизмы, описанные в работах по исследованию плоскостности широких холоднокатаных полос. Учет клиновидности и смещения вершины профиля обоснован теорией неравномерности деформации, а разность температур конца прокатки и смотки учитывает влияние термомеханической обработки на структурное состояние металла.

Модель имеет вид:

$$X = -0,7947 - 10,5704 \cdot \delta w_{лmin} + 0,0024 \cdot y_{hcmax} - 2,5099 \cdot \delta w_{прmin} + 0,82 \cdot b + 0,0007(T_{кпр} - T_{смср}), \quad (1)$$

где $\delta w_{лmin}$ – минимальный левый клин полосы ($\delta w_{л} = h_{л40} - h_{л25}$), мм; y_{hcmax} –

максимальное смещение вершины поперечного профиля полосы, мм; $\delta w_{\text{прmin}}$ – минимальный правый клин полосы ($\delta w_{\text{пр}} = h_{\text{пр40}} - h_{\text{пр25}}$), мм; b – ширина полосы, мм; $T_{\text{кпср}}$ – средняя температура конца прокатки, °C; $T_{\text{смср}}$ – средняя температура смотки, °C.

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,88$ при уровне значимости $p < 0,01$ подтверждает высокую статистическую значимость и адекватность модели. 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.

Далее на основе показателя X был разработан формализованный способ прогнозной начальной настройки систем CVC и WRB для IF-сталей. Способ базируется на физической иерархии клеток непрерывного стана: в клетях № 1 и № 2 осевая сдвигка ограничена диапазоном ± 10 мм для сохранения унаследованной геометрии подката; в клетке № 3 (предпоследней) выполняется предварительная коррекция профиля; в клетке № 4 (последней) с минимальным обжатием – окончательная коррекция остаточных напряжений, непосредственно определяющая плоскостность.

На основе анализа промышленных данных (180 рулонов IF-стали) получены иерархические регрессионные зависимости, связывающие показатель X с рациональными уставками осевого смещения валков в клетях № 4 S_{CVC4} и № 3 S_{CVC3} , а также с усилием гидроизгиба F_{WRB4} в последней клетке:

$$S_{\text{CVC4}} = (0,64 - 0,94 \cdot X) / 81,1, \quad (2)$$

$$S_{\text{CVC3}} = (0,22 - 0,00007 \cdot X + 0,0078 \cdot S_{\text{CVC4}}) / 0,0077, \quad (3)$$

$$F_{\text{WRB4}} = (-0,07 - 0,00003 \cdot X + 0,0033 \cdot S_{\text{CVC3}} + 0,0033 \cdot S_{\text{CVC4}}) / 0,0007. \quad (4)$$

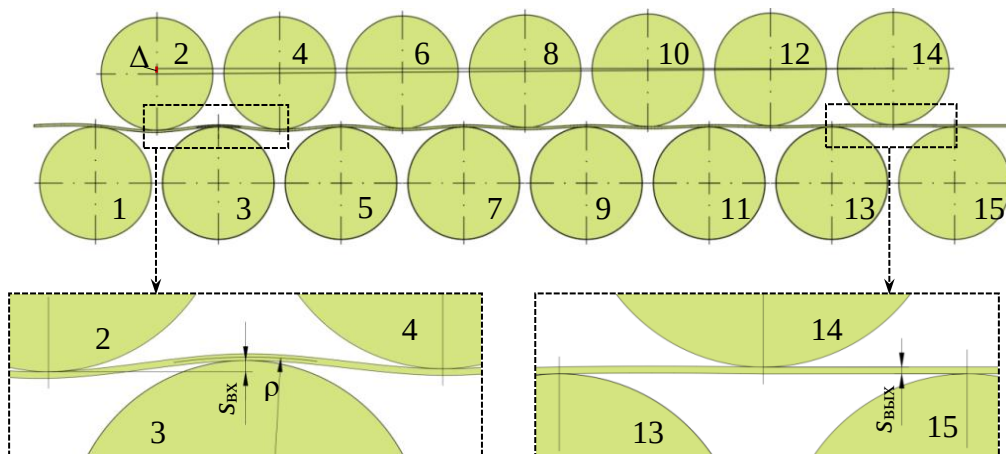
Все регрессионные модели (1)–(4) статистически значимы и работают в единой логической связке, отражающей физическую соподчиненность клеток. Последовательность расчета строго определена: сначала по (1) вычисляется X , затем по (2) – S_{CVC4} , затем по (3) – S_{CVC3} и наконец по (4) – F_{WRB4} . Это обеспечивает предварительную, до начала прокатки рулона, настройку стана с учетом реальной геометрии подката, что ранее отсутствовало.

Промышленная апробация разработанного способа в условиях действующего производства подтвердила его эффективность: обеспечена стабильная плоскостность полос IF-стали шириной до 1640 мм при различных сочетаниях клиновидности кромок и смещения вершины профиля, включая случаи с высокой асимметрией. Новизна технического решения защищена патентом РФ на изобретение № 2827016. Разработанный способ создает основу для распространения прогнозного управления на другие классы сталей с

использованием методов машинного обучения, но при этом сохраняет физическую интерпретируемость.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований процесса правки холоднокатаных полос на роликовых правильных машинах (РПМ), направленные на создание метода индивидуальной настройки оборудования, учитывающего реальные механические свойства каждого рулона.

На первом этапе выполнены экспериментальные исследования на 15-роликовой правильной машине агрегата поперечной резки (рисунок 4).



$s_{вх}$ – перекрытие на входе; $s_{вых}$ – зазор на выходе; $\Delta = s_{вых} - s_{вх}$ – величина, характеризующая наклон верхней кассеты роликов; ρ – наименьший радиус кривизны полосы при правке (под роликом № 3)

Рисунок 4 – Схема 15-роликовой правильной машины

На основе геометрического моделирования и промышленных данных установлена линейная зависимость кривизны изгиба нейтрального слоя полосы a ($a = 1/\rho$) от параметра $(h - s_{вх})$, где h – толщина полосы, $s_{вх}$ – входное перекрытие:

$$a = \alpha \cdot (h - s_{вх}). \quad (5)$$

Эмпирический коэффициент $\alpha = 0,003135 \text{ мм}^{-2}$ определен методом наименьших квадратов. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,998$, что подтверждает высокую точность аппроксимации для диапазона толщин 1,2–3,0 мм. Коэффициент α постоянен для данной конструкции машины и не зависит от толщины полосы и ее механических свойств.

Однако для определения фактической пластической деформации при правке, наряду с геометрическими параметрами настройки, необходимо знать значение предела текучести σ_t каждого рулона. С этой целью на втором этапе создана статистическая модель прогнозирования предела текучести холоднокатаных сталей, интегрирующая данные всех предшествующих

переделов: химический состав, параметры горячей прокатки, холодной прокатки, отжига и дрессировки. Исходная выборка – 15352 рулона.

Методом линейной регрессии с последующей проверкой статистической значимости каждого фактора (по t -критерию Стьюдента) отобраны 18 наиболее информативных предикторов.

Полученное уравнение регрессии имеет вид:

$$\begin{aligned} \sigma_T = & 276,43 + 9,61 \cdot h - 0,00352 \cdot b - 101,62 \cdot [Al] + 322,39 \cdot [C] + \\ & + 131,96 \cdot [Si] + 61,80 \cdot [Mn] + 1189,51 \cdot [P] - 603,04 \cdot [S] + 45,52 \cdot [Cr] + \\ & + 3010,29 \cdot [N] - 326,78 \cdot [Ti] + 1478,28 \cdot [Mo] + 68,19 \cdot \varepsilon_{хп\ сумм} - 0,1579 \cdot T_{кп} + \\ & + 0,0997 \cdot T_{см} - 0,1785 \cdot T_{отж\ max} - 0,00625 \cdot \tau_{отж1} + 0,0517 \cdot P_{др\ ср}, \end{aligned} \quad (6)$$

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

Коэффициент детерминации модели $R^2 = 0,84$, F -статистика = 2880 при $p < 0,001$. Средняя абсолютная ошибка прогноза на тестовой выборке (3070 рулонов) составила 16,4 МПа, средняя относительная ошибка – 7,6%. Для марок сталей с пределом текучести до 300 МПа ошибка снижается до 5,7% вследствие меньшего разброса прочностных свойств. Знаки коэффициентов полностью соответствуют известным металлургическим закономерностям: углерод, марганец, кремний, суммарное обжатие и усилие дрессировки повышают предел текучести; температура конца прокатки, температура отжига и продолжительность выдержки – снижают.

На основе комбинации геометрической модели кривизны и прогнозного предела текучести предложен метод расчета входного перекрытия $s_{вх}^{opt}$, обеспечивающего целевую пластическую деформацию 70%, что является оптимальным уровнем для устранения дефектов плоскостности. Итоговое расчетное выражение имеет вид:

$$s_{вх}^{opt} = h - \frac{\sigma_T}{98,75h}. \quad (7)$$

Выходное перекрытие $s_{вых}$ для каждой толщины принимается постоянным $s_{вых} \approx 0,9h$ и обеспечивает устойчивый выход полосы.

В отличие от традиционного подхода, при котором настройка роликовых правильных машин выполняется по усредненным справочным данным, применение разработанного метода позволяет для каждого рулона

индивидуально определить рациональные настройки, обеспечивающие стабильное устранение дефектов плоскостности.

Предложенный метод, включая определение текучести и входного перекрытия, создает основу для автоматизированной системы поддержки принятия решений при настройке РПМ, позволяя стабилизировать качество правки, сократить время переналадок и снизить долю продукции с отклонениями геометрической формы. Внедрение метода запланировано в рамках модернизации системы управления агрегатом поперечной резки ПАО «Северсталь».

В пятой главе приведены результаты промышленной апробации и внедрения разработанных технологических решений в условиях действующего производства ПАО «Северсталь».

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. Оценивались стабильность обеспечения плоскостности и снижение доли брака по геометрическим дефектам при прокатке полос из IF-сталей толщиной 0,59–0,70 мм и шириной 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 выработанному подходу, 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 1 приведены сводные данные для трех характерных рулонов опытной группы, демонстрирующие взаимосвязь между входными параметрами подката и уставками, рассчитанными по формулам (1)–(4), и достигнутым результатом – отклонения от плоскостности не превысили 10 I-Unit по данным стресс-ролика.

Таблица 1 – Параметры подката, прогнозные уставки для рулонов опытной группы

№	b , мм	$\delta w_{\text{лmin}}$, мм	$\delta w_{\text{прmin}}$, мм	$y_{\text{нmax}}$, мм	$T_{\text{кпрс}}$, °C	$T_{\text{смср}}$, °C	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 1 данные свидетельствуют о том, что разработанный способ обеспечивает стабильное получение годной продукции даже при значительных вариациях геометрии подката, например, существенное смещение вершины профиля $y_{h\max}$ 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.

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 (1)–(4), интегрирован в контур АСУ ТП.

Экономическая эффективность внедрения подтверждена анализом производственных показателей: 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 на 4-клетевом стане 2100 внедрена система цифровой аттестации плоскостности, реализующая цикл «измерение – оценка». Система построена на базе стресс-ролика за клетью № 4 и включает формирование 2D-карты распределения остаточных напряжений (цифрового двойника плоскостности), а также автоматическую трехуровневую классификацию качества (зеленый, желтый, красный уровни) по сигналам I-Unit.

В ходе эксплуатации выявлены ограничения базового подхода, основанного на усреднении сигналов по фиксированным зонам центра, левой и правой кромок: это вызывало чувствительность к краевым эффектам и размывание локальных дефектов. В связи с этим разработан усовершенствованный алгоритм цифровой аттестации, основанный на динамическом выделении активных зон стресс-ролика с привязкой к фактической ширине полосы и формировании пяти диагностических групп: левая кромка, левая переходная зона, центр, правая переходная зона, правая кромка. Это позволило исключить размывание сигнала центральной зоны, повысить чувствительность к локальным дефектам и достоверно локализовать источник неплоскостности по ширине полосы.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

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 CVC 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 клети. 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. 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).

2. 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.

3. 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.

Статьи в журналах RSCI

4. 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.

5. 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.

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

7. Харламов И.А., Болобанова Н.Л. Повышение точности настройки роликовой правильной машины агрегата поперечной резки холоднокатаных полос на основе прогнозирования предела текучести // Metallurg. – 2026. – № 6. – С. 30-36.

Патенты

8. 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.

9. Способ производства холоднокатаного проката. Патент на изобретение № 2834541, Российская Федерация, МПК С21D8/02– 2024121920; заявл. 01.08.2024; опубл. 11.02.2025. Бюл. № 5. / Глухов П.А., Смирнов В.И., Гринько

Е.Н., Тарасов А.Г., Кадулин А.М., Смирнов К.С., Савенков Д.В., Измайлов А.М., Иванов С.В., Харламов И.А., Байдин В.В.

Публикации в трудах конференций

10. Харламов И.А. Технологические возможности повышения плоскостности высокопрочного холоднокатаного стального проката // Материалы 39-ой Международной научно-технической конференции «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» «Технология – Оборудование – Инструмент – Качество». Под редакцией Шелег В.К. – Минск: Бизнесофсет, 2025. – С. 115-117.

11. Харламов И.А., Болобанова Н.Л. Технологические аспекты управления плоскостностью холоднокатаных полос из IF-сталей // Материалы 3-й Международной научно-технической конференции «Современное перспективное развитие науки, техники и технологий» – Воронеж: ЗАО «Университетская книга», 2025. – С. 412-414.

12. Харламов И.А., Болобанова Н.Л. Практическая реализация совместного регулирования систем CVC и WRB на промышленном стане // Тезисы докладов 40-ой Международной научно-технической конференции «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» «Технология – Оборудование – Инструмент – Качество» / под ред. Шелег В.К. – Минск: Бизнесофсет, 2026. – С. 92-94.

13. Харламов И.А., Болобанова Н.Л. Диагональная волна как особый вид неплоскостности при холодной прокатке: механизм и методы управления // Тезисы докладов 84-й международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» – тезисы докладов 84-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2026. – Т.1. – С. 183.

14. Харламов И.А., Болобанова Н.Л. Повышение эффективности контроля плоскостности холоднокатаных полос на основе скоординированной работы систем CVC и WRB // Материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Перспективы развития, совершенствования и автоматизации высокотехнологичных производств» – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2026. – С. 264-267.

Подписано к печати 2026 г. Формат 60×84 1/16.

Усл. п. л. 1. Тираж 100 экз.

Отпечатано в ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет»

162600 г. Череповец, пр. Луначарского, 5