

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова  
Российской академии наук

На правах рукописи



**БОЛОБАНОВА Наталия Леонидовна**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА  
СТАЛЬНОГО ЛИСТОВОГО ПРОКАТА НА ОСНОВЕ  
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕГО  
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ**

Специальность 2.6.4 – Обработка металлов давлением

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН).

- Научный консультант – доктор технических наук, заведующий лабораторией пластической деформации металлических материалов ИМЕТ РАН **Юсупов Владимир Сабитович**
- Официальные оппоненты – **Шаталов Роман Львович**  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии», федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет»
- **Филатов Александр Андреевич**  
доктор технических наук, директор ООО «Строительные и металлургические машины»
- **Бельский Сергей Михайлович**  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Обработка металлов давлением», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет»
- Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Защита состоится «15» февраля 2024 г. 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](mailto:andreev.imet.dis@mail.ru).

Автореферат диссертации разослан «17» октября 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук



Андреев В.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Темпы развития машиностроения и других отраслей промышленности формируют все возрастающие потребности в высококачественных конструкционных материалах. В первую очередь это относится к листовому прокату. На всех этапах его производства от прокатки слябов до правки форма и размеры листового проката имеют решающее значение для реализации всех остальных свойств. Приобретает особую актуальность получение геометрии проката, соответствующей высшему мировому уровню и применимости для лазерной или плазменной обработки. Требуется уменьшать поперечную разнотолщинность широких стальных полос и обеспечивать минимальное отклонение деталей от плоскостности после лазерной или плазменной резки. Такие высокие конкурентные качества достигаются совершенствованием технологий производства стального листового проката, главным образом, за счет повышения эффективности его формообразования.

Под формообразованием понимается получение заданной формы и размеров стального листового проката на основе деформации, как путем воздействия на технологические режимы, так и за счет влияния формы и размеров основного деформирующего инструмента – листопркатных валков.

Проблемы формообразования стального листового проката на различных этапах его производства охватывают широкий круг сложных и многообразных процессов и для решения новых практических и научных задач по совершенствованию технологий листопркатного производства весьма важным является дальнейшее изучение закономерностей взаимосвязи и взаимообусловленности факторов формообразования. При этом по-прежнему не теряют важности проблемы снижения расходного коэффициента металла и прокатных валков с обеспечением бесперебойной работы оборудования и одновременным увеличением объемов производства.

Перечисленное позволяет сделать вывод, что раскрытие новых закономерностей формообразования листового проката на всех этапах производства от прокатки слябов до правки горячекатаного стального листового проката с разработкой комплекса технических и технологических решений по повышению качественных показателей широкой стальной листовой продукции, стойкости деформирующего рабочего инструмента и экономии материальных ресурсов представляют собой актуальную задачу.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблемы формообразования стального листового проката на различных этапах его производства являются весьма многоплановыми и многие аспекты изучены недостаточно глубоко и комплексно. К наиболее существенным проблемам можно отнести следующие.

1. Известные методы описания формообразования при горячей прокатке сляба в вертикальных и горизонтальных валках широкополосного стана не позволяют прогнозировать величину смещения поверхностных дефектов от кромок раската в направлении середины ширины, и вопросы разработки новых режимов прокатки и использования имеющихся резервов стана по уменьшению боковой обрезки широких стальных полос требуют дальнейшего развития.

2. Несмотря на большое внимание исследователей на проблему повышения точности формирования поперечного профиля широких стальных полос и листов при прокатке, требуется дальнейшее изучение вопросов в этом направлении. Существующие методы теоретических исследований формообразования поперечного профиля листового проката, основанные на применении различных моделей расчета валковых систем при прокатке, не позволяют в полной мере учитывать все возможности технологического оборудования прокатных станов и профилирования валков. Необходимо дальнейшее развитие теоретических исследований формообразования поперечного профиля листового

проката для синтеза эффективного решения по профилированию валковых систем и обеспечению их стойкости.

3. Существующее состояние теории упругопластического изгиба горячекатаной полосы на завершающей стадии производства при правке на многораликовой машине в условиях знакопеременного деформирования не позволяет производить исследования и расчет технологических режимов правки с установлением взаимосвязи воздействий на листовой прокат при правке и плоскостностью деталей, получаемых при раскрое широких горячекатаных стальных листов лазером или плазмой.

Актуальность решения перечисленных проблем, направленных на повышение эффективности формообразования листового проката, обусловлена высокой важностью достижения конкурентного качества по поперечному профилю и плоскостности широких стальных полос и листов, в том числе после переработки такими методами, как плазменная или лазерная резка. При этом значимым остается вопрос обеспечения высокой стойкости валков, определяющих процесс формообразования при прокатке.

**Цель работы.** Развитие теоретических положений по формообразованию стального листового проката на этапах от прокатки слябов до правки широких полос с разработкой и внедрением комплекса технических и технологических решений по совершенствованию процессов листопрокатного производства на основе повышения эффективности воздействий на форму, размеры проката и стойкость валков.

#### **Задачи работы.**

1. Теоретические и экспериментальные промышленные исследования закономерностей формоизменения металла при горячей прокатке сляба в вертикальных и горизонтальных валках широкополосного стана и перемещения поверхностных дефектов металла от кромок раската в направлении середины ширины для уменьшения величины боковой обрезки полос.

2. Исследование формообразования поперечного профиля листового проката при толстолистовой прокатке, горячей и холодной прокатке на непрерывных широкополосных станах и разработка методики выбора и расчета профилировок валков, обеспечивающей повышение точности формирования поперечного профиля прокатываемых полос и листов и стойкости валковых систем.

3. Разработка нового научного подхода к анализу и оценке параметров состояния рабочего слоя валков непрерывных прокатных станов и нового способа эксплуатации валков, направленного на увеличение их стойкости, снижение их расхода и повышение эффективности технологического процесса непрерывной прокатки.

4. Комплексное исследование процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации для расширения возможностей воздействия на листовой прокат и обеспечения высокой плоскостности получаемых деталей при раскрое на установках лазерной или плазменной резки.

5. Апробирование и внедрение разработанных технологических и технических решений по повышению эффективности воздействий на форму, размеры проката и стойкость валков в действующее металлургическое производство.

#### **Научная новизна.**

1. Выявлены новые закономерности формообразования при горячей прокатке сляба в вертикальных и горизонтальных валках широкополосного стана. Установлено, что уменьшение перехода металла с узкой грани на широкую определяется только степенью деформации в горизонтальных валках, распределение обжатий между вертикальными валками существенного влияния на перемещение металла не оказывает. Уменьшение суммарного обжатия до 10 % в первых трех горизонтальных проходах приводит к уменьшению затекания металла с ребра на широкую грань после прокатки в черновой

группе стана до 20 %. Установлено, что выполнение на боковых ребрах сляба равносоставленных скосов размером, равным разнице между начальной шириной сляба и требуемой шириной полосы, существенно ограничивает переход металла с узкой грани на широкую: величина затекания точек скосов узкой грани сляба уменьшается в 2,5 раза и нижняя точка скоса на узкой грани сляба переходит на край полосы.

2. Разработана новая методика эффективного профилирования валков листопркатного производства, отличающаяся от известных применением пространственной конечной-элементной модели валковой системы и непрерывным описанием профиля бочки. Методика включает определение поперечного профиля листового проката на основе геометрического суммирования кривых упругих деформаций, профиля износа валков, теплового профиля и поиск профилировок валков с учетом исходной неплоскостности проката и возможностей регулирующих воздействий осевой сдвижки рабочих валков и их гидравлического изгиба. Методика позволяет исследовать и проектировать профилировки валковых систем для различных листовых станов по критериям обеспечения геометрических показателей качества листового проката и стойкости валков. Показано, что методика профилирования валков обеспечивает значение поперечной разнотолщинности широких полос не более 2 % от номинальной толщины без снижения стойкости валков.

3. Разработан новый научный подход к анализу и оценке параметров состояния основного деформирующего инструмента – листопркатных валков непрерывного стана. Подход состоит в определении длины прокатанных полос, межвалковой нагрузки, упрочнения, износа бочек валков после прокатной кампании и величины съема при шлифовке в зависимости от номера клетки непрерывного стана. Подход обоснован результатами исследований опорных валков непрерывного стана горячей прокатки. Показано, что содержательной характеристикой состояния опорного валка является деформационное упрочнение его бочки после прокатки. Получена закономерность деформационного упрочнения бочки при прокатке, описывающая влияние длины прокатанных полос и межвалковой нагрузки. Разработан новый способ определения величины съема при шлифовке опорного валка, основанный на учете роста приращения твердости бочки валка в 1,2–1,9 раза в клетях по ходу прокатки.

Практическая реализация разработанного подхода по определению параметров состояния валков непрерывного стана позволяет решать вопросы увеличения объема прокатных кампаний опорных валков и снижать их расход с обеспечением стойкости.

4. На основе комплекса теоретических и экспериментальных исследований процесса холодной правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации раскрыт механизм взаимосвязи технологических режимов правки и отклонений листового металла при последующей плазменной или лазерной резке. Установлено, что величина пластической деформации при правке и неоднородность распределения деформаций по толщине полосы определяют отклонение листового металла при раскрое лазером или плазмой. Выявлено, что уровень пластических деформаций в начале процесса правки не менее 90 % по толщине полосы гарантированно исключает искривление листов при резке и минимизирует влияние остаточных напряжений и накопленной потенциальной энергии упругих деформаций после правки.

Получена зависимость, описывающая влияние числа роликов, их шага, разницы перемещений по вертикали первого и последнего роликов верхней кассеты, толщины и условного предела текучести материала полосы на коэффициент проникновения пластической деформации по толщине при правке и позволяющая прогнозировать максимальную относительную деформацию поверхности полосы при знакопеременном изгибе. Показано, что параметрами, влияющими на величину пластической деформации при правке, в большей степени, являются число роликов и величина, характеризующая наклон

верхней кассеты. Увеличение числа роликов при правке в 1,5 раза без изменения остальных параметров процесса приводит к росту уровня пластических деформаций не менее, чем на 15 %. Возрастание в два раза величины, характеризующей наклон верхней кассеты, приводит к росту уровня пластических деформаций в 1,2 раза.

Разработана методика выбора режима правки, учитывающая неоднородность напряженно-деформированного состояния проката в условиях циклической знакопеременной деформации и обеспечивающая нахождение технологического режима правки, гарантирующего получение проката для лазерной или плазменной резки.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость работы состоит в раскрытии новых закономерностей формообразования листового проката на всех этапах его производства. Результаты моделирования и совокупность экспериментальных исследований вносят вклад в понимание физических процессов получения заданной формы и размеров стального листового проката, раскрывают новые аспекты теории формообразования и создают основу для разработки новых технических и технологических решений по совершенствованию процессов листопркатного производства для достижения точности геометрических показателей проката и стойкости деформирующего инструмента.

Практическая значимость работы заключается в следующем.

1. Предложены решения по усовершенствованию технологии горячей прокатки на непрерывном широкополосном стане 2000, направленные на ограничение смещения поверхностных дефектов от кромок раската в направлении середины ширины и минимизацию величины обреза кромок полос.

2. Разработаны и внедрены в производство профилировки валков непрерывных широкополосных станов горячей и холодной прокатки, обеспечивающие эффективное воздействие на поперечный профиль полосы и повышение стойкости валков.

3. Разработаны новые способы, направленные на повышение эксплуатационной стойкости опорных валков при производстве широких стальных полос и листов, на увеличение наработки рабочего слоя опорных валков без роста степеней наклепа и износа бочки с обеспечением снижения расхода валков. Новизна технических решений подтверждается патентами Российской Федерации на изобретения № 2585594 и № 2795664, а также свидетельством о регистрации государственной программы для ЭВМ, описывающей процессы функционирования валковой системы и прокатываемой полосы.

4. Разработан комплекс методик и алгоритмов, применение которых позволяет выдавать практические рекомендации для

- определения значений коэффициентов дифференцированного съема и величины съема при шлифовке опорных валков чистовой группы по актуальным данным за прокатную кампанию по клетям непрерывного широкополосного стана горячей прокатки 2000;

- прогнозирования величины износа и приращения твердости бочки опорных валков по клетям чистовой группы стана 2000 за прокатную кампанию.

На основе предложенных методик и алгоритмов разработан и внедрен программный инструмент в формате онлайн-приложения, позволяющего оперативно обрабатывать информацию об эксплуатации опорных валков чистовой группы за выбранный период и выдавать результаты обработки участку подготовки валков производства плоского проката листопркатного цеха № 2 ПАО «Северсталь» – значения коэффициентов съема по клетям и значения самих съемов при перешлифовке валков. Разработаны практические рекомендации по периодичности перевалки опорных валков чистовой и черновой групп непрерывного широкополосного стана горячей прокатки, направленные на увеличение объема производства на стане и снижение производственных затрат, связанных с эксплуатацией валков.

5. Разработаны, испытаны и внедрены технологические режимы правки на роликовых правильных машинах, установленных в линиях агрегатов поперечной резки № 3 и № 4 цеха отделки металла № 2 ПАО «Северсталь», обеспечивающие получение проката, пригодного для лазерной или плазменной резки.

6. Суммарный экономический эффект от внедрения новых технических и технологических решений, полученных по результатам работы, в условиях действующего промышленного производства составляет более 26 млн руб. в год.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе и при проведении научно-исследовательской работы студентов по направлению подготовки «Металлургия» в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования «Череповецкий государственный университет».

**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 математических методов моделирования, включая метод конечных элементов, реализованный в программных комплексах DEFORM и SIMULIA Abaqus, и статистических методов анализа. Лабораторные исследования механических свойств материала стальных горячекатаных полос при циклическом нагружении проводилось по стандартным методикам с использованием универсальной испытательной машины Galdabini Quasar 50. Исследование влияния высокотехнологичной обработки на изгиб листов производилось в промышленных условиях на машине плазменной резки SatroniK LS3000 и на установке лазерной резки BYSPRINT 3015. Промышленные эксперименты проводились на прокатных станах и роликовых правильных машинах в условиях действующего металлургического производства ПАО «Северсталь».

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Закономерности формообразования при горячей прокатке сляба в вертикальных и горизонтальных валках широкополосного стана и принципы снижения расхода металла за счет уменьшения величины смещения поверхностных дефектов от кромок раската в направлении середины ширины.

2. Методика профилирования валков листопркатного производства, основанная на методе формообразования поперечного профиля листового проката с применением пространственной конечно-элементной модели валков с непрерывным описанием профиля бочки и обеспечивающая достижение высоких геометрических показателей качества листового проката и повышение стойкости валков.

3. Новый подход к определению параметров состояния рабочего слоя опорных валков и величины съема при перешлифовке, учитывающий разную интенсивность работы валков по клетям непрерывного стана и обеспечивающий увеличение стойкости валков, снижение расхода валков и повышение эффективности технологического процесса непрерывной прокатки.

4. Теоретическое обоснование процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации, раскрывающее механизм взаимосвязи технологических режимов правки и отклонений листового металла при его последующей обработке лазером или плазмой, и методика поиска режимов правки горячекатаных широких полос на многороликовых правильных машинах для получения листового проката, пригодного для лазерной или плазменной резки.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов диссертационного исследования основана на применении математического описания, базирующегося на современных достижениях в области теории обработки металлов давлением, статистической обработке данных, подтверждается комплексом исследований и

экспериментов на действующих толстолистовом и широкополосном станах горячей прокатки, непрерывных станах холодной прокатки, различных роликовых правильных машинах и обеспечивается соответствием результатов теоретических исследований промышленным экспериментам.

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на различных международных научно-технических конференциях «Современная металлургия начала нового тысячелетия (г. Липецк, 2012 г.), «Научно-технический прогресс в черной металлургии» (г. Череповец, 2013 г., 2015 г., 2017 г., 2019 г.), «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования» (г. Вологда, 2015 г.), NUMISHEET 2018 – 11th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes (г. Токио, Япония, 2018 г.), «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (г. Москва, 2019 г.), «Павловские чтения» (г. Москва, 2021 г.), «Интеллектуально-информационные технологии и интеллектуальный бизнес» (г. Вологда, 2022 г.), «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки. Технология – Оборудование – Инструмент – Качество» (г. Минск, Республика Беларусь, 2023 г.), а также на Конгрессе прокатчиков (г. Выкса, 2019 г., г. Москва, 2022 г.).

**Личный вклад автора.** Научные положения и результаты работы, выносимые на защиту, основываются на исследованиях, выполненных непосредственно под руководством и с активным участием автора. Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследования, обоснованном выборе методов решения технических и технологических проблем, проведении лабораторных и промышленных экспериментальных исследований, анализе и обобщении результатов работы и обоснования всех положений, выносимых на защиту. Апробирование и внедрение в производство предложенных новых технических и технологических решений осуществлялось при непосредственном участии автора.

**Публикации.** Материалы диссертации представлены в 39 публикациях, в том числе 16 статей опубликовано в журналах, рекомендованных ВАК, 3 – в изданиях, входящих в наукометрические базы Web of Science и Scopus, 14 публикаций в сборниках трудов международных конференций; получено 2 патента на изобретения Российской Федерации и 1 свидетельство на регистрацию программы для ЭВМ; выпущено 2 монографии и 1 учебное пособие.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложения. Текст диссертации изложен на 299 страницах машинописного текста, иллюстрирован 128 рисунками, содержит 34 таблицы. Библиографический список включает 286 источников.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность работы, излагаются цель и задачи научного исследования, описываются подходы и методы исследования, сформулированы научная новизна и практическая ценность работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен анализ современного состояния и перспективных направлений исследований формообразования листового проката на этапах производства от прокатки сляба до правки проката на роликовых правильных машинах.

Выполненный литературный обзор показал, что определяющий вклад в развитие методов описания формообразования листового проката при прокатке в вертикальных и горизонтальных валках внесли известные работы И.М. Павлова, А.И. Целикова, М.М. Сафьяна, А.М. Мелешко, В.В. Мельцера, Г.Э. Аркулиса, П.И. Полухина, Р.Л. Шаталова, В.М. Салганика, И.П. Шабалова, А.М. Песина, И.П. Мазура. Тем не менее,



вопросы формирования ширины горячекатаной полосы с минимальным переходом металла с боковой грани сляба на широкую грань и уменьшением боковой обрезки при прокатке на непрерывном широкополосном стане требуют дальнейшего развития. Показано, что перспективным решением является применение численного моделирования и экспериментальных промышленных исследований формообразования сляба при прокатке во всех вертикальных и горизонтальных проходах черновой группы стана.

Отмечено, что получение высококачественной листовой металлопродукции, конкурентной по геометрическим показателям, определяется технологической возможностью уменьшения неравномерности распределения упругих деформаций прокатных валков по длине бочки в контакте с полосой под действием нестабильных факторов технологии. Несмотря на большое число опубликованных работ, посвященных исследованиям в области расчета валков листовых станов и их влияния на точность широких стальных полос и листов, таких известных ученых, как А.И. Целиков, П.И. Грудев, П.И. Полухин, Л.И. Боровик, В.П. Полухин, Г.Г. Григорян, Ю.Д. Железнов, А.В. Третьяков, Э.А. Гарбер, А.А. Будаква, Ю.В. Коновалов, В.В. Мельцер, В.М. Салганик, С.М. Бельский, П.П. Полецков, М.И. Румянцев и др., вопросы разработки новых технологических воздействий при формообразовании листового проката с одновременным повышением стойкости валков при прокатке требуют дальнейшего изучения. Это может быть реализовано за счет развития методов разработки профилировок валков, как существенного элемента теории формообразования листового проката, на основе применения пространственной конечно-элементной модели валковой системы с непрерывным описанием профиля бочки. Кроме того, эффективность процесса формообразования напрямую зависит от работоспособности дорогостоящего сменного оборудования – листопркатных валков. Поэтому задачи рациональной эксплуатации валков требуют первоочередного решения при разработке технологических режимов производства листового проката.

Анализ многочисленных исследований, направленных на повышение эффективности воздействий на форму листового проката, показал, что вопрос обеспечения высокой плоскостности широких листов при их дальнейшей резке лазером или плазмой за счет разработки технологических режимов обработки стальной полосы при ее производстве на металлургических предприятиях ранее не решался. Перед порезкой на листы и отправкой потребителю осуществляется холодная правка широких горячекатаных полос в условиях многократного знакопеременного изгиба в роликовых правильных машинах (РПМ). В развитие теории и технологии правки внесли работы А.А. Королева, А.И. Целикова, В.В. Смирнова, И.В. Недорезова, А.З. Слонима, Л.А. Сони́на, В.Н. Шинкина, Р.Л. Шаталова, А.Е. Шелеста, В.М. Салганика, M.Grüber, R. Kaiser и др. При этом в зарубежной технической литературе предпочтение отдается использованию метода конечных элементов. Тем не менее, вопросы разработки технологии правки широкого горячекатаного листового проката с обеспечением пригодности для высокотехнологичной обработки не решены и требуется дальнейшее развитие исследований в этом направлении.

Таким образом, решение перечисленных научно-технических проблем направлено на развитие теоретических аспектов формообразования листового проката для совершенствования, разработки и применения востребованных в области производства широких стальных полос и листов технологий, обеспечивающих повышение точности геометрических размеров проката и стойкости валков.

Во **второй главе** описана реализация модели процесса прокатки сляба в вертикальных и горизонтальных валках черновой группы непрерывного широкополосного стана горячей прокатки на основе применения программного комплекса конечно-

элементного моделирования DEFORM-3D и представлены результаты исследований формообразования раската.

Адекватность моделирования оценивалась путем сравнения измеренных и рассчитанных параметров формоизменения. Для этого был выполнен промышленный эксперимент в черновой группе стана 2000 – прокатка сляба толщиной  $H_{сл} = 247$  мм и шириной  $B_{сл} = 1317$  мм из марки стали 08пс с фиксацией технологических параметров процесса и измерением полученного недоката. С помощью недоката можно было оценить формоизменение металла в трех последних универсальных клетях черновой группы (рисунок 1). Расхождения между расчетными и измеренными величинами толщины и ширины раската не превысили 4 %. Расхождение смещения металла, измеренного только на выходе из черновой группы, с расчетным затеканием составило 1,9 мм (5 %). При этом средние значения погрешности расчета усилия прокатки в клетях не превысили 11 %. Исходя из полученных результатов, был сделан вывод, что реализация конечно-элементного моделирования с достаточной точностью определяет формоизменение раската в клетях черновой группы стана 2000 и может быть использована для оценки величины смещения металла с узких граней раската на широкие.

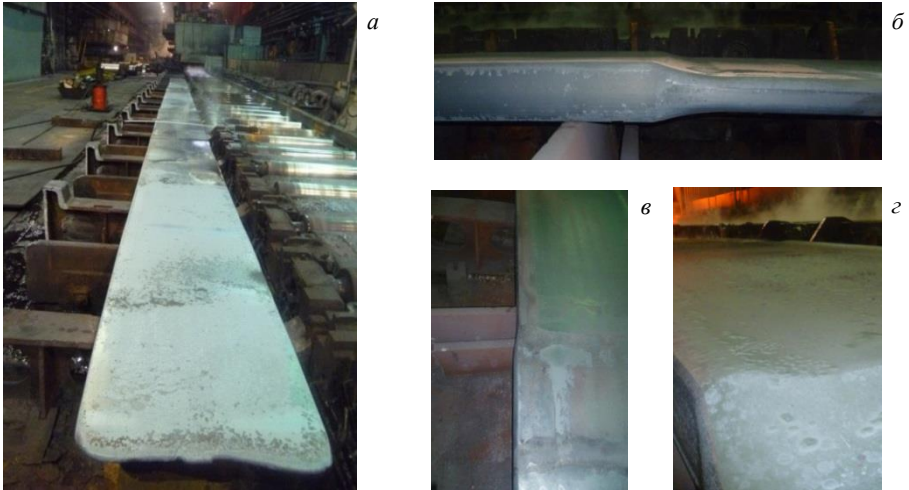


Рисунок 1 – Общий вид недоката в трех последних универсальных клетях черновой группы (а), вид сбоку (б) и фрагмент вида сверху (в) раската перед и после прокатки в горизонтальных валках клетки № 3, прикромочный наплыв после деформации раската в вертикальных валках клетки № 3 (з)

Выполненные численные исследования процесса прокатки в черновой группе стана 2000 при разнице между шириной сляба и шириной полосы не менее 50 мм показали, что величина перехода металла с узкой грани на широкую определяется только степенью деформации в горизонтальных валках, распределение обжатий между вертикальными валками существенного влияния на перемещение металла не оказывает. Для уменьшения затекания необходимо снижать деформацию в первых трех горизонтальных проходах. Уменьшение суммарного обжатия на 10 % в первых трех горизонтальных проходах приводит к уменьшению затекания металла с ребра на широкую грань после трех проходов на 40 %. Дальнейшая деформация в 4-ом и 5-ом проходах приводит к росту величины

затекания до 20 %. Получено подтверждение этих результатов опытно-промышленной прокаткой слябов с наплавленными на боковых гранях полосками из нержавеющей стали и измерениями их перехода на широкую грань после прокатки на стане. Был сделан окончательный вывод, что при разнице между начальной шириной сляба и шириной полосы от 50 мм и больше перераспределением обжатий между клетями черновой группы стана 2000 невозможно получить затекание менее 30 мм.

Моделированием также установлено, что прикромочный наплыв (рисунок 2) после прокатки в вертикальных валках характеризуется точкой P1, имеющей максимальное значение толщины, и точкой на боковом ребре раската P2, находящейся на уровне, соответствующем толщине раската  $h_0$  перед входом в вертикальные валки. Определено, что при последующем обжатии в горизонтальной клетке

– точка с максимальной толщиной напыла P1 смещается на 2–4 мм в сторону кромки раската в точку P1', при этом, большие значения смещения соответствуют обжатию раската в последних горизонтальных клетях черновой группы;

– нижняя точка напыла на боковом ребре раската P2 при последующей горизонтальной прокатке переходит в точку P2', находящуюся на кромке раската.

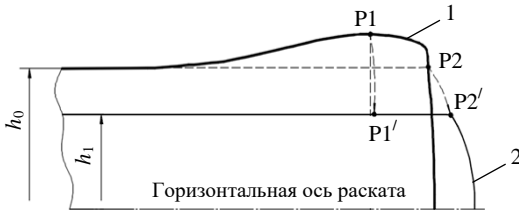


Рисунок 2 – Схема характерных точек напыла и их переходов:  
1 – профиль раската в зоне кромок после прокатки в вертикальных валках; 2 – профиль раската после прокатки в горизонтальных валках

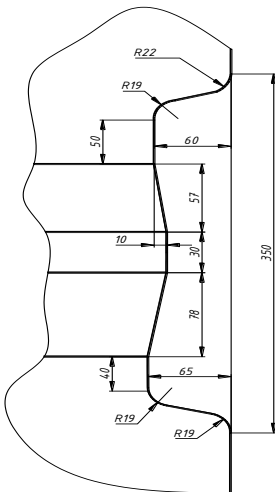


Рисунок 3 – Калибр вертикальных валков, принятый к использованию на стане 2000

Анализ течения металла в прикромочной области при последовательной прокатке в вертикальных и горизонтальных валках показал, что уменьшение выпуклости боковых граней раската после каждого прохода позволяет снизить переход металла с узкой грани на широкие грани раската. Полноценно воздействовать на форму боковой грани раската можно в вертикальных проходах на основе профилирования валков. Показано, что наиболее эффективным решением является использование профилей вертикальных валков, имеющих выступы типа «конус» и обеспечивающие получение вогнутой боковой грани раската при прокатке. Для практической реализации на стане и обеспечения стабильного положения раската по высоте вертикальных валков без увеличения затрат времени на подготовку валков вогнутые профилировки вертикальных валков первых трех проходов черновой группы стана 2000 изменены на профили, имеющие выступ, а бочку валка предложено выполнять с калибром (рисунок 3).

Вычислительными экспериментами определено, что при росте скорости горизонтальных

валков на 30 % в сравнении со скоростью вертикальных валков в универсальной клети за счет увеличения натяжения можно уменьшить переход металла с узкой грани на широкую до 10 %.

Анализ результатов моделирования процесса деформации в черновой группе позволил рассмотреть прокатку слэба, на котором предварительно выполнены скосы в переходах с узких граней на широкие. Установлено, что выполнение на боковых ребрах слэба равносторонних скосов размером, равным разнице между начальной шириной слэба и требуемой шириной полосы, существенно ограничивает переход металла с узкой грани на широкую. В этом случае величина затекания уменьшается в 2,5 раза и не превышает 15 мм.

В **третьей главе** с использованием метода конечных элементов решены связанные задачи моделирования формообразования поперечного профиля листового проката и профилирования валков листопркатного производства.

Поперечный профиль широкой стальной полосы при прокатке стремится сформировать выпуклой формы с минимальным значением поперечной разнотолщинности  $\delta h_{\text{поп}}$ , не превышающей 2 % от заданной толщины, что соответствует высшему мировому уровню качества. Для исследования и повышения точности формирования поперечного профиля предложено развитие метода его формообразования за счет применения пространственной конечно-элементной модели прокатных валков, позволяющей реализовать непрерывное описание профиля бочки при определении кривых упругих деформаций валков. Для определения упругих деформаций выполняется моделирование трехмерной валковой системы кварто в среде конечно-элементного анализа SIMULIA Abaqus.

Оконтчателный поперечный профиль получается геометрическим суммированием кривых упругих деформаций с кривыми износа и теплового расширения валков. При прогнозировании износа корректным следует считать подход, основанный на получении на каждом стане статистически достоверных профилограмм износа по длине бочки валков, а для определения тепловых профилей валков целесообразно использовать измерения температуры бочек валков тепловизионной камерой или модель теплового профиля валков, изложенную в работах д.т.н. Э.А. Гарбера.

Достоинством конечно-элементного моделирования валковой системы является реализация пространственной теории упругости с анализом напряженно-деформированного состояния валков с различными профилировками их бочек (выпуклыми, вогнутыми, цилиндрическими, выпукло-вогнутыми, с концевыми скосами) и различными исполнениями цапф под подшипниками. Некоторые возможности моделирования представлены на рисунках 4 и 5. Сравнение результатов численного моделирования напряжений и расчета на основе теоретических формул, базирующихся на теории контакта двух цилиндров, показало их соответствие. Расхождение значений максимальных напряжений не превышает 2 %.

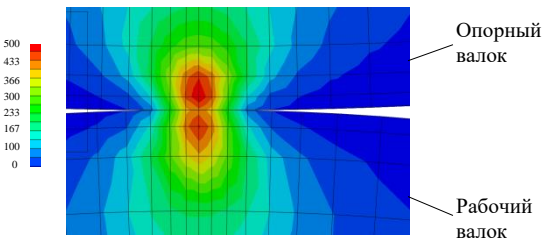


Рисунок 4 – Распределение напряжений, МПа в зоне контакта валков в клети № 12 при горячей прокатке полосы на стане 2000 шириной  $b = 1320$  мм с силой прокатки  $P = 10$  МН (диаметр бочки рабочего вала  $D_p = 800$  мм и опорного вала  $D_{оп} = 1500$  мм)

Моделирование формообразования поперечного профиля листового проката было выполнено для различных непрерывных широкополосных станов холодной прокатки 1700 и

2100, горячей прокатки 2000, а также толстолистого стана 5000. На рисунке 6 приведен пример геометрического суммирования кривых упругих деформаций 1 и теплового профиля 2 верхнего рабочего валка (кривая износа не учитывалась из-за незначительной наработки валков), а также получаемые поперечные профили двух полос при прокатке на стане 2100, оснащенный асимметричными выпукло-вогнутыми профилировками. Сравнение результатов расчета  $\delta h_{\text{поп расч}}$  и измерений  $\delta h_{\text{поп факт}}$  показало, что погрешности расчета находятся в диапазоне 3–6 %.

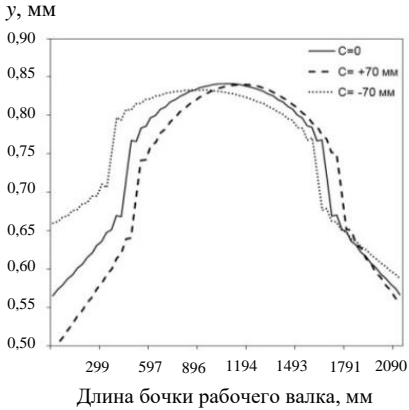


Рисунок 5 – Распределение по длине бочки верхнего рабочего валка упругих деформаций в вертикальной осевой плоскости в контакте с полосой в клети № 2 при холодной прокатке полосы шириной  $b = 1250$  мм с силой прокатки  $P = 10$  МН на стане 2100 с выпукло-вогнутыми профилировками валков и осевой сдвижкой рабочих валков ( $D_p = 455$  мм,  $D_{оп} = 1220$  мм;  $C$  – осевое смещение рабочего валка; при смещении в сторону привода значения положительные, в сторону обслуживания – отрицательные)

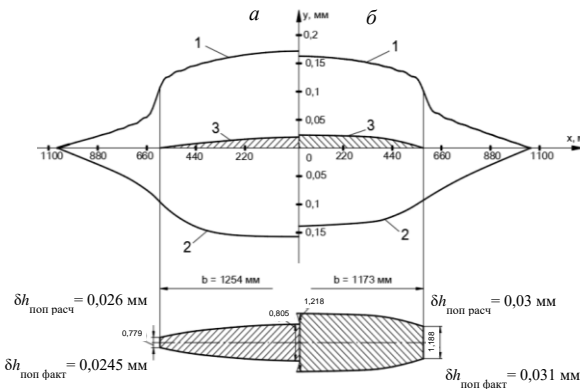


Рисунок 6 – Определение поперечного профиля полос из марки стали DX51D при холодной прокатке в последней клети стана 2100 на основе построения образующей верхнего рабочего валка 3 методом геометрического суммирования кривых упругих деформаций 1 и теплового профиля 2:  $a$  – размер полосы  $0,8 \times 1254$  мм ( $D_p = 480$  мм;  $P = 7,5$  МН;  $C = -20$  мм; значение противоизгиба  $F = +95$  кН; тепловая выпуклость на ширине полосы  $\Delta D_{\text{тепл.}b} = 0,12$  мм);  $б$  – размер полосы  $1,2 \times 1173$  мм ( $D_p = 480$  мм;  $P = 7,5$  МН;  $C = -8$  мм; значение дополнительного изгиба  $F = -72$  кН;  $\Delta D_{\text{тепл.}b} = 0,09$  мм)

Сравнение результатов расчета поперечной разнотолщинности и измерений по всем перечисленным выше станам показало, что отклонение средних расчетных значений  $\delta h_{\text{поп}}$  не превышает 8,5 % и предложенный метод формообразования поперечного профиля

может использоваться для совершенствования профилировок валковых систем и исследования влияния систем регулирования на геометрические показатели листового проката.

Выполненные теоретические и промышленные исследования позволили создать методику выбора профилировок валков (рисунок 7), учитывающую взаимосвязь между различными влияющими факторами и интегрирующую описанный метод моделирования формообразования поперечного профиля.

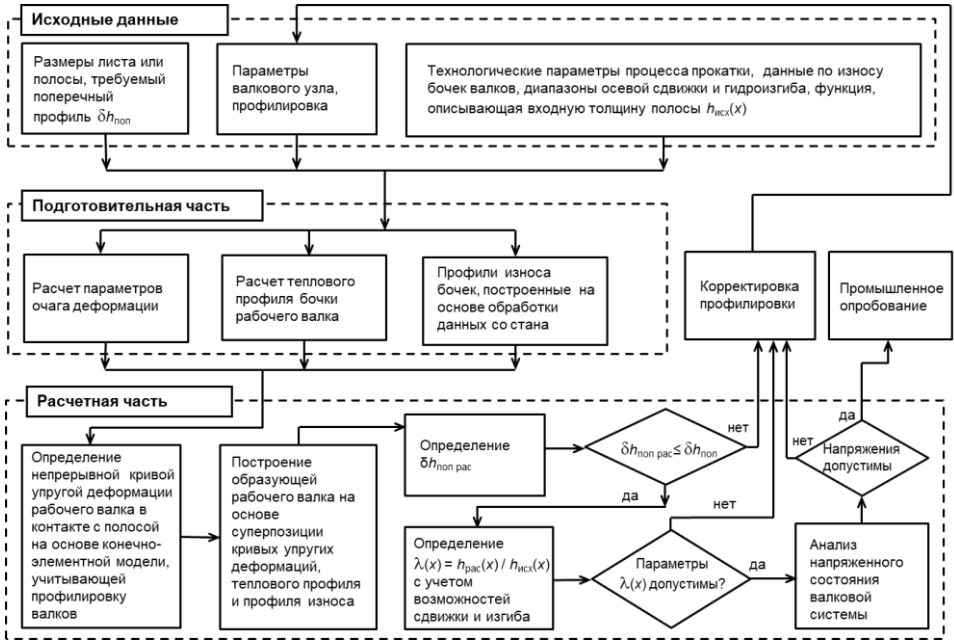


Рисунок 7 – Схема реализации методики выбора профилировок валковых систем

Варианты использования методики состоят в оценке существующих профилировок валковых систем по клетям стана и их усовершенствовании или в разработке новых профилировок валков, как для всего стана, так и для отдельных клетей на основе учета всего прокатываемого сортамента. В этом случае задается средняя ширина, толщина и средние значения регулирующих воздействий осевой сдвижки рабочих валков и их гидравлического изгиба.

Методика состоит из трех модулей, реализующих анализ и ввод исходных данных, подготовительные расчеты параметров очага деформации, теплового профиля, износа валков и основную расчетную часть.

Модуль «Исходные данные» включает описание размеров листа или полосы, требуемый поперечный профиль  $\delta h_{\text{пол}}$ , параметры валкового узла, применяемые профилировки, технологические параметры процесса прокатки (межклетевые натяжения, обжатия, скорости прокатки, температурные и энергосиловые параметры), данные по износу бочек валков, диапазоны осевой сдвижки и гидроизгиба, функцию, описывающие входную толщину полосы  $h_{\text{исх}}(x)$ , где  $x$  – произвольная координата по ширине полосы. Также может

задаваться исходная неплоскостность подката через функцию распределения вытяжек по ширине  $\lambda_{исх}(x)$ .

В модуле «Подготовительная часть» реализуются расчеты параметров очага деформации и теплового профиля бочки, определяются профили износа бочек, построенные на основе обработки данных со стана.

В модуле «Расчетная часть» определяется кривая упругой деформации рабочего вала в контакте с полосой на основе конечно-элементной модели, учитывающей профилировку валков, осуществляется построение кривой образующей бочки рабочего вала на основе геометрического суммирования кривых упругих деформаций, теплового профиля и профиля износа, определяется  $\delta h_{\text{поп рас}}$ . После расчета выполняется проверка на соответствие требуемой величине поперечного профиля. В случае положительной проверки определяется распределение вытяжек по ширине  $\lambda(x) = h_{\text{рас}}(x)/h_{\text{исх}}(x)$  с учетом возможностей сдвижки и изгиба и производится окончательная оценка напряженного состояния валковой системы при выбранных профилировках. Если по какому-либо параметру – поперечному профилю и вытяжкам по ширине – наблюдается невыполнение установленных требований, то принимаются соответствующие корректирующие меры по профилировкам и расчет повторяется. Также после анализа напряженного состояния валковой системы может быть принято решение о корректировке профилировок с их новым расчетом.

На основе разработанной методики профилирования прокатных валков были выполнены исследования и разработки профилировок валков с оценкой их влияния на формирование поперечного профиля прокатываемых полос и листов, а также стойкость валков.

В результате исследований валковых систем с асимметричными выпукло-вогнутыми профилировками валков установлено следующее.

– Диапазон осевой сдвижки рабочих валков позволяет уменьшать разность упругих деформаций на ширине полосы не менее чем на 30 %, гидравлическим изгибом обеспечивается широкий диапазон регулирования (до 75 %) поперечной разнотолщинности полосы.

– Имеется резерв регулирования поперечного профиля за счет корректировки выпуклости и вогнутости профилировки рабочего вала. Выпукло-вогнутые профилировки (рисунк 8) чаще всего описываются полиномом третьей степени:

$$R(x) = R_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3, \quad (1)$$

где  $x$  – текущая координата в осевом направлении вала;  $R(x)$  – радиус в точке  $x$ ;  $R_0$  – радиус в положении  $x = 0$ ;  $a_1, a_2, a_3$  – полиномиальные коэффициенты. Образующая верхнего опорного вала зеркально отображает образующую верхнего рабочего вала и

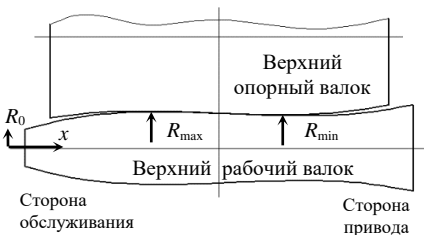


Рисунок 8 – Выпукло-вогнутые профилировки валков

максимальный радиус рабочего вала совпадает с минимальным радиусом опорного. В этом случае расширить возможность регулирования можно за счет уменьшения радиуса выпуклой и вогнутой части рабочего вала, не изменяя профилировку опорного вала и не увеличивая эксплуатационный парк опорных валков. Уменьшение радиусов выпуклости и вогнутости профилировки на 2,5 % приводит к уменьшению прогиба бочки рабочего вала на ширине полосы до 40 %, дальнейшее уменьшение радиусов приводит к росту

прогиба, в том числе и на ширине полосы, без существенного увеличения напряжений в валках.

Исследование валковых систем кварто с выпуклыми, вогнутыми и цилиндрическими профилировками для повышения стойкости опорных валков и снижения напряжений показало:

– При отсутствии скосов у опорных валков с цилиндрической профилировкой отмечается существенный рост напряжений в краевой зоне (до 30 %), что подтверждает необходимость выполнения скосов для разгрузки края бочки опорного валка. Увеличение длины скосов опорных валков приводит к снижению напряжений на краях бочки, а также к незначительному уменьшению напряжений в месте перехода гладкой бочки в скос. Вариант исполнения скосов со скруглением в месте перехода гладкой бочки в скос не снижает напряжения на краю бочки, но несколько снижает напряжения в начале скоса – до 5–10 %.

– Для существенного уменьшения опасных пиковых значений напряжений в межвалковом контакте и повышения стойкости опорных валков следует отказаться от

скосов на бочке опорного валка и выполнить профиль бочки выпуклым из отрезков парабол, плавно сопрягающихся между собой и с торцом бочки (рисунок 9). Выполнение профилировки в виде трех участков параболических кривых, имеющих в сопряжениях общие касательные, приводит к снижению неравномерности давлений в межвалковом контакте. Для валковой системы толстолистового стана 5000 были определены следующие диапазоны параметров профилировки: выпуклость средней части бочки  $f_{\text{ср}}$  = 3–5 мм, длина участка краевой параболы  $l_{\text{кр}}$  составляет 4–8 % от длины бочки, а  $f_{\text{кр}}$  = 5–10 мм. Новизна такого решения подтверждена патентом РФ на изобретение № 2585594.

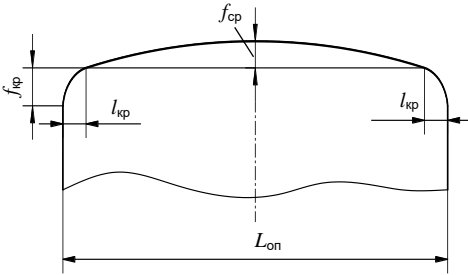


Рисунок 9 – Профилировка опорного валка:

- $L_{\text{оп}}$  – длина бочки опорного валка;
- $f_{\text{ср}}$  – выпуклость средней части бочки;
- $f_{\text{кр}}$  – выпуклость краевых парабол;
- $l_{\text{кр}}$  – длина участка краевой параболы

В четвертой главе для решения перспективных вопросов повышения эффективности формообразования широкого полосового проката при непрерывной прокатке разработан новый научный подход к оценке параметров состояния поверхностного слоя опорных валков, определяющих работоспособность рабочих. Подход включает четыре взаимосвязанные части по определению: 1) параметров технологии, позволяющих оценить особенности работы валка в соответствующей клети непрерывного стана; 2) деформационного упрочнения бочки после прокатной кампании в зависимости от клети стана; 3) износа бочки; 4) величины съема при шлифовке с учетом интенсивности работы опорного валка в клети стана. Представлены результаты реализации такого подхода для непрерывного широкополосного стана горячей прокатки 2000 ПАО «Северсталь».

Анализ регистрируемых автоматической системой измерения и контроля технологических данных процесса прокатки на непрерывном широкополосном стане 2000 ПАО «Северсталь» по каждой кампании опорных валков из марки стали AST70X с оценкой степени износа и упрочнения бочки по клетям стана показал, что интенсивность работы опорного валка за кампанию в клети непрерывного стана определяется числом контактов с рабочим валком и погонной нагрузкой, действующей на валок в межвалковом контакте. Учитывая, что число циклов нагружения зависит от массы прокатываемого металла за



кампанию, оценку интенсивности работы опорных валков можно также напрямую связать с длиной прокатываемых полос в каждой клетке непрерывного стана (таблица 1).

Таблица 1 – Средние значения параметров интенсивности работы опорных валков по клетям чистовой группы стана 2000 за 22 кампании со средней тоннажностью  $Q = 275$  тыс. т по данным из системы контроля производства

Номер клетки	Число циклов контакта с рабочим валком $N \cdot 10^6$	Длина прокатанных полос $L_n$ , км	Погонная нагрузка в контакте, т/мм
6	0,30	1441	1,14
7	0,50	2351	1,15
8	0,74	3502	0,94
9	1,03	4885	0,90
10	1,36	6496	0,81
11	1,60	7697	0,72
12	1,74	8280	0,49

Анализ средних значений твердости бочек валков по клетям стана перед шлифовкой по результатам 180 измерений сорока валков в пяти точках (рисунок 10) показал, что максимально упрочняется середина бочки валков и происходит повышение твердости бочек по клетям стана. Наибольшее приращение твердости характерно для клетки № 11, являющейся самой нагруженной клетью стана с точки зрения совместного влияния длины прокатанных полос и нагрузки в межвалковом контакте. Исследование измерений износа бочек опорных валков показало, что происходит различный износ бочек опорных валков, величина истирания бочки в среднем не превышает 0,2 мм на радиус в зоне максимального износа, соответствующего кромкам полос наибольшего объема прокатываемого металла. Максимальный износ характерен для последних клеток чистовой группы стана.

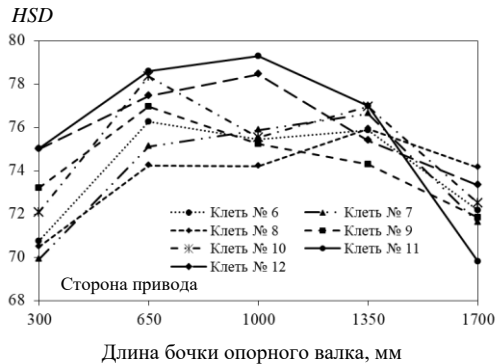


Рисунок 10 – Изменение средних значений твердости бочек валков по клетям стана перед шлифовкой по результатам 180 измерений

На основе промышленных данных со стана за все исследуемые кампании опорных валков были определены средние и максимальные значения силы прокатки по клетям стана при производстве полос разной ширины: 1000 мм, 1320 мм, 1640 мм и 1830 мм. Это позволило оценить напряжения в межвалковом контакте по клетям стана. Анализ полученных распределений максимальных эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв.макс}}$  и их глубины по клетям стана показал, что максимальные значения этих параметров отмечаются в валках первых двух клеток чистовой группы и на 20–35 % выше, чем в двух последних клетях стана. При этом  $\sigma_{\text{экв.макс}}$  в самых нагруженных клетях на 20 % меньше предела выносливости материала рабочего слоя опорных валков, равного 980 МПа. Все это, с учетом числа циклов контакта опорного валка с рабочим за прокатную кампанию  $N$  (таблица 1), позволило

рассматривать работу опорных валков чистой группы в условиях многоциклового деформации, приводящей к многоциклового усталости рабочего слоя.

Численное моделирование поверхностного деформационного упрочнения бочки опорного валка в зависимости от номера клетки было выполнено в 2D-постановке в системе SIMULIA Abaqus с разработкой модели бочки опорного валка, нагруженной нормальным давлением со стороны контакта с рабочим, распределенным на длине площадки контакта валков. Для реализации циклов контакта  $N$  по клетям чистой группы межвалковое давление задавалось в виде графика гармонических колебаний по закону косинуса:

$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (2)$$

где  $x$  – величина, характеризующая положение опорного валка в момент времени  $t$  относительно рабочего валка;  $A$  – амплитуда колебаний;  $\omega = 2\pi/T$  – циклическая частота;  $T$  – период колебаний или время полного оборота опорного валка;  $\varphi_0$  – начальная фаза.

После обработки результатов численного эксперимента с помощью обобщенного метода наименьших квадратов было получено выражение приращения твердости бочки валка в зависимости от работы в  $i$ -ой клетки чистой группы за прокатную кампанию:

$$\Delta HSD_i = -1,1158 + 0,0006926 \cdot L_{\text{чи}} + 3,0258 \cdot q_i, \quad (3)$$

где  $L_{\text{чи}}$  – длина прокатанной полосы в  $i$ -ой клетки, км;  $q_i$  – средняя погонная нагрузка в межвалковом контакте  $i$ -ой клетки, т/мм. Значение коэффициента корреляции составило  $r = 0,99$ . На рисунке 11 представлено изменение приращения твердости рабочего слоя опорных валков по клетям стана при разных объемах кампаний  $Q$ .

Для качественной оценки выбранного критерия и полученной зависимости приращения твердости была реализована дополнительная серия промышленных

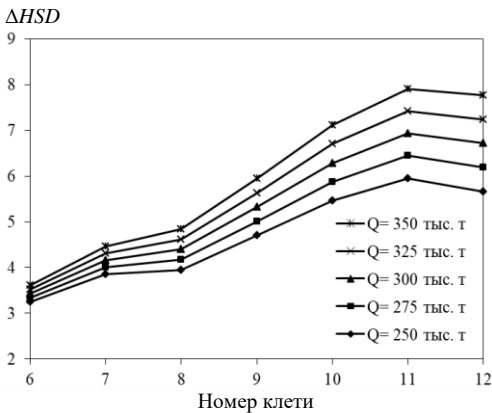


Рисунок 11 – Приращение твердости бочки опорного валка в зависимости от номера клетки и объема кампании

экспериментов по измерению твердости бочек опорных валков. Полученные значения степени соответствия фактического и рассчитанного приращения твердости бочки опорного валка по клетям стана  $R^2 = 87,2\%$  и средней погрешности –  $11,4\%$  показали, что модель приращения твердости (3) может использоваться для определения допустимого объема кампании опорных валков, учитывая необходимость обеспечения требований эксплуатации, основанных на рекомендации производителей валков о нежелательном превышении  $\Delta HSD$  более чем на 8 единиц.

Анализ результатов измерений радиального износа в 21-ой точке по длине бочки опорных валков позволил предложить оценку величины износа в трех основных зонах: краевых, размер которых до 299 мм от каждого края бочки опорного валка (зоны А), центральной зоне – середина валка длиной 800 мм (зона С) и зоны перехода между этими участками от 300 мм до 599 мм и 1401 мм до 1700 мм (зоны Б). Также выполнен учет верхнего и нижнего положений валков в клетях. Для верхнего и нижнего положений валков определены зависимости средней величины износа на участках А, Б, С от прокатываемого тоннажа  $Q$ , тыс. т и номера клетки

чистой группы. Эти зависимости имеют линейный характер. Сравнение расчетных значений износа с измеренными показало достигнувшую точность прогнозирования не ниже 85 %.

На основе выполненных теоретических и промышленных исследований деформационного упрочнения и износа опорных валков созданы алгоритмы оценки состояния поверхности рабочего слоя их бочек при прокатке.

Для снижения расхода и своевременного удаления рабочего слоя опорного валка, подвергшегося значительному числу циклов нагружения, предложено новое техническое решение по определению величины съема за прокатную кампанию с учетом интенсивности работы валка по клетям стана.

Величину съема при перешлифовке опорного валка  $\Delta_i$  после прокатной кампании в  $i$ -ой клетки предложено определять по формуле:

$$\Delta_i = k_i \cdot \Delta_{\text{баз}}, \quad (4)$$

где  $k_i$  – комплексный коэффициент съема металла для каждой  $i$ -ой клетки стана;  $\Delta_{\text{баз}}$  – величина съема в базовой клетки. Базовыми клетями являются последняя и/или предпоследняя клетки стана с высоким числом циклов нагружения и прокатываемым километражом. Для снятия поврежденного слоя опорных валков, эксплуатируемых в самых нагруженных клетях, необходимо и достаточно, как показала практика, величину съема при перешлифовках связывать с массой прокатываемого металла и выполнять за каждые прокатанные 80 тыс. т металла 1 мм съема.

Комплексный коэффициент съема металла  $k_i$  для каждой  $i$ -ой клетки стана равен

$$k_i = k_{L_{ni}} \cdot k_{q_i}. \quad (5)$$

Здесь  $k_{L_{ni}}$  – соотношение длины полосы  $L_{ni}$ , прокатанной в  $i$ -ой клетки, к длине полосы  $L_{\text{пбаз}}$  в самой нагруженной клетки непрерывного стана за прокатную кампанию и  $k_{q_i}$  – соотношение средней погонной нагрузки  $q_i$  в  $i$ -ой клетки к средней погонной нагрузке  $q_{\text{баз}}$  в самой нагруженной клетки непрерывного стана:

$$k_{L_{ni}} = L_{ni} / L_{\text{пбаз}}; k_{q_i} = q_i / q_{\text{баз}}. \quad (6)$$

Предложенное решение по определению величины съема позволяет своевременно удалять рабочий слой, имеющий значительные усталостные нагрузки, и гарантированно увеличивать наработку рабочего слоя опорного валка не менее чем на 10 % без увеличения степени наклепа и износа бочки, а также обеспечивает снижение расхода опорных валков в 1,2 раза с 0,089 кг/т до 0,074 кг/т. Новизна решения подтверждена патентом РФ на изобретение № 2795664.

Применение разработанного подхода к оценке рабочего слоя опорных валков позволяет решать вопросы обоснованного увеличения их прокатной кампании, снижения расхода, увеличения стойкости и разработки новых требований к их эксплуатации и может использоваться и на непрерывных станах холодной прокатки.

**В пятой главе** представлены результаты комплексного исследования, направленного на расширение возможностей воздействия на горячекатаный листовой прокат при правке на роликовой правильной машине (рисунок 12), для обеспечения высокой плоскостности получаемых деталей при раскрое листов по сложному контуру на установках лазерной или плазменной резки.

Моделирование процесса правки было реализовано в 2D-постановке с применением системы конечно-элементного анализа SIMULIA Abaqus для широкого диапазона полос толщиной 3–10 мм в РПМ с числом роликов  $n = 13$ –19, диаметром роликов  $D = 50$ –110 мм и величиной, характеризующей наклон верхней кассеты роликов  $\Delta = 1,5$ –7 мм. При этом учитывалось, что минимальный шаг роликов составляет  $t = 1,1D$ . В качестве материала полосы рассматривались марки стали – сталь 3 и 09Г2С и их аналоги S235MC и S355MC, как наиболее подходящие для всех видов резки, включая лазерную. Для изучения взаимосвязи

между показателями правки и изгибом листов после лазерной и плазменной резки, были выполнены промышленные эксперименты, включающие правку горячекатаных полос с последующей резкой.

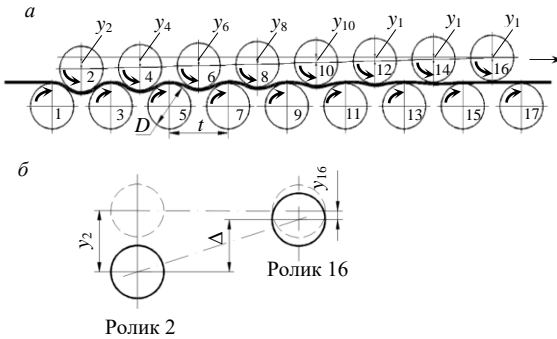


Рисунок 12 – Схема 17-роликовой правильной машины:

$a - y_2 \dots y_{16}$  – смещения осей верхних роликов по вертикали;  $D$  – диаметр роликов;  $t$  – шаг роликов;

$b$  – схема к определению разницы перемещений по вертикали первого и последнего роликов верхней кассеты  $\Delta$

Исследования процесса правки во взаимосвязи с отклонениями листов при последующей резке лазером и плазмой позволили ввести новые показатели правки, влияющие на плоскостность листов при раскрое высокотехнологичными методами:

– Коэффициент проникновения пластической деформации по толщине полосы  $k_{pl}$ , %, характеризующий процент толщины, достигший предела текучести. Предложена формула по его определению:

$$k_{pl} = \left( 1 - \frac{\varepsilon_{0,2}}{\varepsilon_{\max}} \right) \cdot 100 \% , \quad (7)$$

где  $\varepsilon_{0,2}$  – относительная деформация, соответствующая условному пределу текучести материала полосы;  $\varepsilon_{\max}$  – максимальная относительная деформация полосы при правке, определяемая на основе моделирования.

– Относительные пластические деформации при правке в начале процесса  $\varepsilon_n$  и в конце  $\varepsilon_k$ , %.

– Уровень остаточных продольных напряжений по толщине листа  $\sigma_{\text{прод}}$ , МПа.

– Остаточная потенциальная энергия правки  $U$ , Дж.

Анализ результатов, полученных после двух видов резки, показал, что наименьшие отклонения от плоскостности после порезки имели листы, прошедшие правку по режиму, которому по результатам моделирования соответствуют наибольшие значения коэффициента проникновения пластической деформации по толщине полосы  $k_{pl}$  и относительные пластические деформации в начале процесса  $\varepsilon_n$ , наименьшие значения деформации под последним верхним роликом  $\varepsilon_k$  и накопленной потенциальной энергии  $U$ , а также наименьшие остаточные напряжения  $\sigma_{\text{прод}}$  в сравнении с другими режимами.

Изучение закономерностей проникновения пластической деформации по толщине полосы и изменения относительных пластических деформаций при правке от параметров настройки РПМ позволило сформулировать следующие выводы:

– Механизм формирования остаточных напряжений и потенциальной энергии обусловлен величиной пластической деформации и неоднородностью распределения деформаций по толщине при правке. В контакте роликов поверхностные слои металла испытывают пластические напряжения, в средней части наблюдается участок с упругими

деформациями и накоплением потенциальной энергии. При выходе полосы из контакта с роликками потенциальная энергия расходуется на восстановление ее первоначального недеформированного состояния и происходит упругая разгрузка материала полосы, сопровождающаяся релаксацией напряжений в приповерхностных областях проката. В центральной части сечения полосы формируется область «стесненных» упругих напряжений, препятствием по высвобождению обратимой потенциальной энергии которых становятся приповерхностные слои с необратимой пластической деформацией. Отклонения от плоскостности листов при резке лазером или плазмой определяются величиной остаточных напряжений и накопленной энергией упругих деформаций по толщине полосы после правки.

– Максимальный уровень пластических деформаций в начале правки  $\epsilon_n$  с минимальным их уровнем на выходе  $\epsilon_k$  обеспечивает уменьшение значений остаточных напряжений и потенциальной энергии в листах после правки и отклонений от плоскостности листов при лазерной или плазменной резке.

Выполненные исследования процесса правки полос в условиях знакопеременного деформирования позволили создать методику выбора режима правки (рисунок 13), реализация которой направлена на разработку и применение настроек РПМ, устраняющих

исходное неоднородное напряженное состояние горячекатаной полосы и дефекты неплоскостности, с обеспечением минимального уровня остаточных напряжений и потенциальной энергии в готовом прокате. Последовательность методики включает три этапа.

На первом этапе производится сбор и анализ исходных данных, включая параметры роликковой правильной машины, требования к листовому горячекатаному прокату.

На втором этапе в подготовительной части первоначально определяются свойства материала полосы в условиях циклической знакопеременной деформации на универсальной испытательной машине и осуществляется настройка процесса моделирования в системе конечно-элементного анализа с размещением полосы между верхними и нижними роликками. В расчетной части второго этапа предложено в начале выполнять перемещение одновременно всех верхних роликков вниз до появления в поверхностных слоях полосы под последним верхним роликком  $n-1$  продольных напряжений  $\sigma_{n-1}$ ,

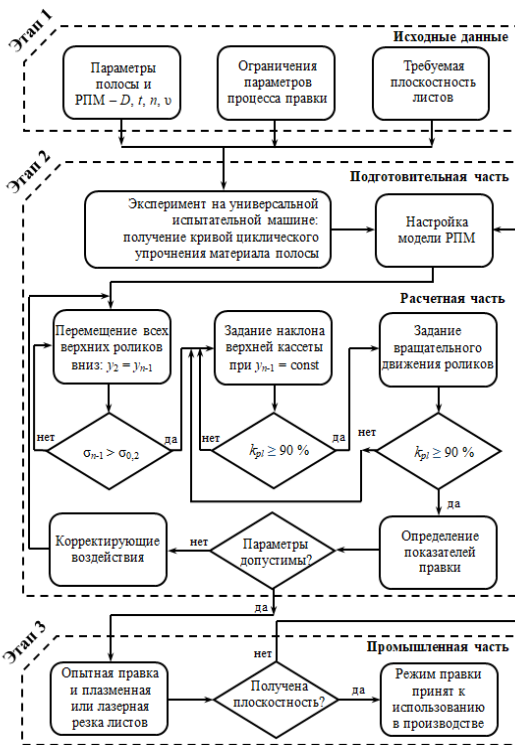


Рисунок 13 – Схема реализации методики выбора режима правки

превышающих условный предел текучести материала полосы  $\sigma_{0,2}$ . Численными экспериментами определено, что все верхние ролики должны перемещаться вниз на величину, не превышающую 15 % от толщины полосы. Далее рассматриваются варианты перемещения первого верхнего ролика  $y_2$  с шагом 1 мм при неподвижном последнем верхнем ролике ( $y_{n-1} = \text{const}$ ) для поиска  $k_{pl} = 90$  % по формуле (7). При задании вращательного движения роликов из-за смещения контактов роликов и полосы изменяется уровень ее деформации: при  $k_{pl} < 90$  % потребуются возврат на стадию увеличения значения наклона верхней кассеты до получения режима правки, обеспечивающего  $k_{pl} \geq 90$  %. Эффект от использования расчетной части состоит в снижении числа опытных правок полос в промышленных условиях с отбором листов и их порезкой на установках лазерной или плазменной резки.

Третий этап методики включает промышленное опробование с опытной правкой полос на роликовой правильной машине по разработанному режиму, отбором листов, порезкой их на машинах плазменной или лазерной резки на продольные полоски шириной 100 мм и определением величины фактического изгиба каждой полоски. Результаты промышленной части могут потребовать принятия решения о корректировке технологии.

Обоснование методики и ее реализация выполнена для правки полос из марки стали S355MC разной толщины в 13-, 15- и 17- роликовых правильных машинах, установленных в агрегатах поперечной резки № 3 (АПР-3) и № 4 (АПР-4) ПАО «Северсталь». Настройки РПМ и результаты моделирования представлены в таблице 2. Как после правки, так после плазменной резки у полученных листов и полосок не было отклонений от плоскостности более 2 мм. Результаты исследований позволили рекомендовать к использованию на производстве разработанные режимы правки полос из марки стали S355MC.

Таблица 2 – Режимы правки полос из марки стали S355MC и результаты моделирования

№ режима	$n$	$D$ , мм	$h$ , мм	$y_2$ , мм	$y_{n-1}$ , мм	$\Delta$ , мм	$k_{pl}$ , %	$\varepsilon_n$ , %	$\varepsilon_k$ , %	$\sigma_{\text{прод. max}}$ , МПа	$U$ , мДж
1	17	70	4	4,5	0,4	3,51	91,0	2,2	0,2	85	260
2	15	80	8	6,5	1,0	5,5	93,3	3,0	0,36	125	750
3	13	110	10	8,0	1,3	6,7	90,9	2,2	0,54	140	1000

Для определения коэффициента проникновения пластической деформации по толщине полосы при правке был выполнен множественный регрессионный анализ и разработана прогнозная модель, позволяющая определять параметр  $k_{pl}$ , % в зависимости от величины, характеризующей наклон верхней кассеты роликов  $\Delta$ , мм, толщины полосы  $h$ , мм, подвергаемой правке, числа роликов  $n$ , шага роликов  $t$ , мм и условного предела текучести полосы  $\sigma_{0,2}$ , МПа при скорости правки, равной 1 м/с:

$$k_{pl} = 31,96 + 6,26 \frac{\Delta}{\Delta_6} + 3,27 \frac{h}{h_6} + 26,92 \frac{n}{n_6} + 0,37 \frac{t}{t_6} - 2,02 \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{0,26}}. \quad (8)$$

Параметры, входящие в уравнение (8) с индексом «б» – базисные минимальные значения соответствующих параметров, коэффициент детерминации равен  $R^2 = 0,85$ .

Модель позволяет выдавать практические рекомендации по эффективности процесса правки на основе оценки влияния числа роликов, диаметров роликов, толщины полосы и ее материала на коэффициент проникновения пластической деформации по

толщине. Так,  $k_{pl}$  при правке одинаковой полосы в 19-роликовой машине в сравнении с 13-роликовой возрастет не менее чем на 15 %, а при правке полос различной толщины, например от 3 мм до 6 мм при одинаковом значении  $\Delta$ , процент толщины, достигшей предела текучести, увеличивается в среднем на 3 %. Учитывая взаимосвязь формул (7) и (8), можно прогнозировать и максимальную относительную деформацию поверхности полосы при правке. С использованием модели были разработаны рекомендации по дальнейшему совершенствованию технологии правки и модернизации действующих линий поперечной резки металла, установленных в цехе отделки металла № 2 ПАО «Северсталь». Было предложено для правки сортамента толщиной 3–4 мм установить роликовые правильные машины с диаметром роликов 50–70 мм и их числом не менее 19.

**В шестой главе** приведены результаты внедрения новых технических и технологических решений, направленных на достижение высоких показателей качества широких стальных полос, стойкости валков и экономии материальных ресурсов.

*Разработка и внедрение решения по уменьшению величины смещения поверхностных дефектов от кромок раската в направлении середины ширины.*

Анализ отсортировки металла с июля по декабрь 2010 г. при производстве холодного проката с привязкой к его ширине в условиях ПАО «Северсталь» показал, что наибольший уровень отсортировки соответствует ширине полос в диапазоне от 1350 мм до 1600 мм включительно. Для производства таких полос на широкополосном стане горячей прокатки 2000 ПАО «Северсталь» использовались непрерывно-литые заготовки шириной 1380 мм, 1450 мм, 1540 мм и 1630 мм. В этом случае общий объем проката с обжатием по ширине более 50 мм составлял 36,7 %, из которых 23,3 % приходилось на заготовку 1540 мм.

По результатам выполненных экспериментальных исследований и численного моделирования формообразования проката на стане 2000 ПАО «Северсталь» было предложено при получении непрерывно-литой заготовки дополнительно к существующим добавить кристаллизатор шириной 1490 мм. Это позволило уменьшить объем металла с суммарным обжатием более 50 мм по ширине до 13,4 % и снизить отсортировку металла, предназначенного для производства холоднокатаного проката шириной 1350–1600 мм, с 3,28 % до 1,87 %. Снижение суммарных вертикальных обжатий без превышения значения 50 мм дало возможность уменьшить величину затекания металла с узкой грани на широкую не менее, чем на 5 мм. Внедрение с 2011 г. в производство нового размера кристаллизатора позволило снизить общий расход металла шириной 1350–1600 мм с 1,14 % до 1,04 %.

*Разработка и внедрение в производство новых профилировок валков.*

Выполненное моделирование формообразования поперечного профиля с реализацией методики выбора профилировок валков позволило разработать и внедрить в производство новые профилировки для повышения точности формирования геометрии полосы и стойкости валков различных непрерывных широкополосных станов горячей и холодной прокатки.

Выпукло-вогнутая профилировка рабочего вала на четырехклетевом стане холодной прокатки 2100. С использованием методики профилирования валков листопрокатного производства разработано и предложено новое решение по асимметричной выпукло-вогнутой профилировке рабочих валков. В этом случае выпукло-вогнутая профилировка опорных валков остается без изменения, что позволяет не расширять эксплуатационный парк валков и не повышать затраты, связанные с их перешлифовкой. По результатам обширных вычислительных экспериментов на основе учета технологических параметров процесса прокатки, данных по износу бочек валков, диапазонов осевой сдвижки и гидроизгиба и их возможностей по корректировке вытяжек по ширине была предложена универсальная профилировка рабочих валков, выполненная по

зависимости (1) с полиномиальными коэффициентами:  $a_1 = 0,178211 \cdot 10^{-2}$ ;  $a_2 = -0,169989 \cdot 10^{-5}$ ;  $a_3 = 0,482081 \cdot 10^{-9}$ .

Первоначально предлагаемая профилировка прошла тестовые испытания на модели прокатки, реализованной в программном обеспечении 4-клетевого стана. Имитационное моделирование процесса прокатки показало возможность использования разработанной выпукло-вогнутой профилировки рабочих валков на стане. В цехе подготовки валков для станов холодной прокатки ПАО «Северсталь», оснащенном современными вальцешлифовальными станками (фирма Tenova S.p.A., дивизион Pomini (Castellanza, Италия)) с возможностью высокоточной обработки валков с допуском  $\pm 0,001$  мм, была отшлифована пара рабочих валков. Промышленное испытание новой профилировки включало установку этих валков в клеть № 2 стана 2100 в августе 2018 г. с контролем их состояния, а также неплоскостности прокатываемых полос. При этом увеличения износа бочек валков и ухудшения качественных показателей проката не отмечалось. Дальнейшие промышленные испытания профилировки во всех клетях стана подтвердили правильность сделанных выводов и полученных результатов моделирования по повышению эффективности работы осевой сдвижки и гидроизгиба рабочих валков. Резервы осевой сдвижки и усилий изгиба при новой профилировке увеличились до 20 % для всего производимого сортамента. Это позволило увеличить выход годной металлопродукции с высокими показателями качества по поперечной разнотолщинности и плоскостности холоднокатаных полос. По результатам испытаний новая профилировка была принята к использованию на стане.

Профилировки валков пятой клетки на непрерывном широкополосном стане холодной прокатки 1700 ПАО «Северсталь». Для устранения на листах автомобильного сортамента шириной свыше 1400 мм светлых прикромочных полос с шероховатостью поверхности  $R_a = 2,2-3,0$  мкм, превышающей допустимое значение  $R_a = 1,9$  мкм, было предложено отказаться от скосов по краям бочек опорных валков пятой клетки, скомпенсировав их увеличением выпуклости в середине бочки опорных валков. Выпуклость опорного валка варьировалась в диапазоне, установленном с учетом практического опыта:  $\Delta D_{ш.оп} = 0,3-0,6$  мм. Для каждого варианта  $\Delta D_{ш.оп}$  профили рабочих валков определялись согласно приведенной методики с одновременным выполнением условий исключения контакта краев бочек верхнего и нижнего рабочих валков и  $\delta h_{поп} \leq 0,02 h_{ном}$ . Здесь  $h_{ном}$  – номинальное (заданное) значения толщины полосы. Окончательные значения профилировок принимались с учетом возможности частичной компенсации разности между фактической выпуклостью и требуемой по условию плоскостности с помощью системы гидроизгиба рабочих валков.

В результате для промышленных испытаний была принята профилировка опорных валков, не имеющих скосов,  $\Delta D_{ш.оп} = 0,6$  мм, а профилировки рабочих валков выполнялись в соответствии с таблицей 3.

Таблица 3 – Профилировки (на диаметр) рабочих валков  $\Delta D_{ш.р}$ , мм

Ширина полосы, мм	Менее 1100	1100-1280	Свыше 1280
Начало кампании опорных валков	+0,1	-0,05	-0,1
Конец кампании опорных валков	+0,2	+0,2	+0,2

Промышленные испытания новых профилировок и их влияния на шероховатость холоднокатаных полос производились в клетке № 5 стана 1700 в течение 3-х месяцев – с ноября 2010 г. по январь 2011 г. За этот период в клетке отработали четыре межперевалочные кампании опорных валков. Нарботка за кампанию, в зависимости от качества материала



валков и сложности сортамента, составила от 30 тыс. т до 50 тыс. т. В конце кампании первоначальная выпуклость бочек опорных валков уменьшалась за счет износа до 0–0,15 мм.

При испытании выпуклых опорных валков без скосов от начала и до конца их кампании показатель  $R_a$  по всей ширине полос находился в диапазоне 1,5–1,8 мкм, разница значений  $R_a$  в средней части и вблизи кромок не превышала 0,2–0,23 мкм. Светлые полосы в прикромочных участках исчезли и широкие листы автомобильного сортамента стали полностью удовлетворять по шероховатости техническим условиям автомобильных заводов. Увеличение отсортировки металла по неплоскостности и другим дефектам в период испытаний не наблюдалось, в том числе – при производстве листов минимальной толщины (до 0,28 мм) и ширины (990–1015 мм).

На основании результатов промышленных испытаний выпуклые профилировки опорных валков без скосов на пятой клетке стана 1700 и измененные выпуклости (вогнутости) рабочих валков были приняты к использованию в производстве.

Профилировки рабочих валков чистой группы стана 2000 и исполнение скоса на краю бочки опорных валков. Еще одним результатом применения разработанной методики стало внедрение на стане горячей прокатки 2000 ПАО «Северсталь» скорректированных вогнутых профилировок валков чистой группы, обеспечивающих выполнение жестких требований к поперечному профилю горячекатаного подката для холоднокатаных полос автомобильного сортамента – возможности получения поперечной выпуклости горячекатаного подката, не превышающего 1 % от средней толщины полосы.

Значения профилировочной вогнутости рабочих валков чистовых клетей стана 2000 не были привязаны к конкретным маркам сталей, ширинам и толщинам прокатываемых полос, следовательно, они являлись эмпирическими, усредненными для всего сортамента стана. Исходя из этого, корректировка профилировок была выполнена усредненной, чтобы не увеличивать число перевалок и перешлифовок валков.

Значения профилировок рабочих валков чистой группы стана 2000, нормированные существующей технологической инструкцией и рекомендуемые значения откорректированных вогнутостей рабочих валков, приведены в таблице 4 (все профилировки вогнутые).

Сопоставление данных таблицы 4 показывает, что вогнутости рабочих валков в клетях № 6–9 были уменьшены на 0,05 мм, а в остальных клетях на 0,02 мм, т.е. на 10–13 % по сравнению с существующей технологией.

Таблица 4 – Значения вогнутости в середине бочки рабочих валков чистовых клетей стана 2000

№ клетки	6	7	8	9	10	11	12
Величина вогнутости по существующей технологии, мм	0,5	0,4	0,3	0,25	0,2	0,2 0,15	0,2 0,15
Рекомендуемая величина вогнутости, мм	0,45	0,35	0,25	0,2	0,18	0,18 0,13	0,18 0,13

Указанные мероприятия, совместно с корректировкой межклетевых удельных натяжений в чистой группе клетей стана 2000, позволили снизить значение поперечной разнотолщинности горячекатаных полос толщиной 2,0–5,0 мм, из которых прокатывают полосы автомобильного сортамента толщиной 0,6–2,0 мм, с 0,04–0,1 мм до 0,02–0,06 мм без ухудшения их плоскостности.

На основе моделирования напряженного состояния опорных валков системы квартостана 2000 и соблюдения условия по совпадению ширины прокатываемых полос, доля которых наибольшая в сортаменте широкополосного стана горячей прокатки 2000 ПАО «Северсталь», с длиной контакта рабочего и опорного валков разработаны и внедрены рекомендации по шлифовке опорных валков с длиной скосов 300 мм и глубиной до 1 мм. Учитывая, что на непрерывном широкополосном стане 2000 в среднем разница между начальной шириной слэба и шириной полосы, составляет 50 мм, при шлифовке опорных валков черновой группы предложено увеличить длину скосов до 350 мм, глубину скосов оставив, как и при шлифовке валков для чистой группы стана.

*Апробирование и внедрение решений рациональной эксплуатации валков, определяющих процесс формообразования широких стальных полос при прокатке.*

Апробирование и внедрение новых требований к эксплуатации опорных валков непрерывного широкополосного стана горячей прокатки. Практическая реализация разработанного методологического подхода, базирующегося на концепции учета разной интенсивности работы опорных валков по клетям непрерывного стана, позволила опробовать и внедрить в условиях непрерывного широкополосного стана горячей прокатки 2000 ПАО «Северсталь» новые требования к эксплуатации опорных валков, а также изменить требования к составлению графика прокатки, направленные на увеличение производительности стана и наработки рабочего слоя валков и на снижение их расхода.

С июня 2020 г. осуществлялось опробование дифференцированного съема при шлифовке двух опорных валков чистой группы. Выполненные 14-ть установок валков в клетки чистой группы с последующим дифференцированным съемом и контролем упрочнения и износа бочек показали, что дифференцированный съем не приводит к росту износа и обеспечивает снижение среднего значения твердости бочек после шлифовки. На основе предложенной методики по определению величины съема рабочего слоя при шлифовке по клетям чистой группы стана и алгоритмов определения упрочнения и износа бочки опорных валков разработан и с марта 2021 г. внедрен программный инструмент в формате онлайн-приложения. Это приложение позволяет оперативно обрабатывать информацию об эксплуатации опорных валков чистой группы за выбранный период и выдавать результаты обработки участку подготовки валков производства плоского проката листопрокатного цеха № 2 ПАО «Северсталь»: значения коэффициентов съема по клетям и значения самих съемов при перешлифовке валков. За одну кампанию всех валков чистой группы экономия в расходе валков может достигать 27 %, в год это позволит экономить до трех опорных валков.

Анализ параметров состояния поверхностного слоя опорных валков, включая упрочнение и износ бочки опорного валка, оценку многоциклового нагружения по клетям стана при разных тоннажах кампаний, позволил разработать и внедрить рекомендации по эксплуатации валков с изменением требований к составлению графика прокатки, направленные на увеличение производительности стана 2000 ПАО «Северсталь»:

– для чистой группы увеличена тоннажность кампаний до 350 тыс. т, подготовку опорных валков к эксплуатации предложено осуществлять с выполнением дифференцированного съема по клетям чистой группы с использованием разработанного программного инструмента, позволяющего рассчитать коэффициенты съема по клетям стана за кампанию опорных валков на основе данных из системы контроля производства в зависимости от прокатанного километража;

– для черновой группы увеличен объем кампаний до 800–900 тыс. т без применения дифференцированного съема, выполняемый съем после длительной кампании должен обеспечить выведение дефектов поверхности.

Реализация мероприятий по рациональной эксплуатации рабочих валков непрерывного стана холодной прокатки. Для повышения эффективности технологического процесса непрерывной холодной прокатки на 4-клетовом стане 2100 ПАО «Северсталь» помимо разработки и внедрения новой асимметричной выпукло-вогнутой профилировки рабочего валка рассматривались вопросы снижения расхода и повышения их стойкости. В 2018 г. в этом направлении было реализовано ряд мер: снижение доли тонкого сортамента толщиной от 0,65 мм и меньше на 6 % с одновременным увеличением сортамента от 0,65 мм включительно и выше; применение только хромированных валков в клетях № 1 и № 2; усовершенствование системы охлаждения рабочих валков клетей № 1–№ 3 с изменением конструкции коллекторов на входе с однорядных на двухрядные с возможностью подачи эмульсии не только в очаг деформации, но и на бочку валка; применение дифференцированного подхода к величине съема металла на рабочих валках при шлифовке – при дефектах поверхности глубиной до 0,20 мм по показаниям вихретокового контроля выполняется съем 0,3 мм на радиус, а при дефектах с глубиной от 0,21 до 0,30 мм съем составляет 0,35 мм. Все это позволило увеличить продолжительность кампании рабочих валков, снизить повреждаемость бочек валков, а также уменьшить аварийность на стане. Расход рабочих валков 4-клетового стана снизился на 42 % с 0,624 кг/т до 0,365 кг/т, среднее количество шлифовок рабочих валков в месяц уменьшилось с 504 до 463 шлифовок.

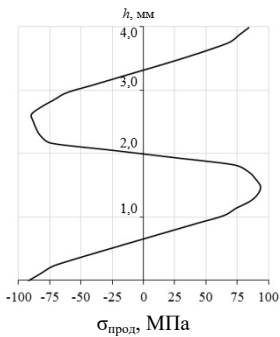
Окончательная оценка эффективности работы рабочих валков была выполнена по результатам анализа эксплуатационных показателей списанных валков за два года (2017 г. и 2018 г.) после реконструкции стана. Второй год эксплуатации после внедрения разработок, в сравнении с первым, характеризовался меньшим на 13 % числом аварийных отказов рабочих валков, снижением в 2 раза среднего съема металла на одну установку валка, увеличением среднего ресурса валков до списания в 1,4 раза, повышением эффективности использования закаленного слоя валков на 18 % и ростом на 20 % среднего количества установок валка в клеть.

*Разработка и внедрение режимов правки горячекатаного листового проката, предназначенного для дальнейшей высокотехнологичной резки.*

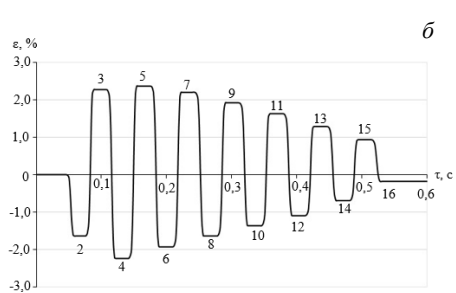
Установленные закономерности и принципы получения проката на роликовых правильных машинах, интегрированные в методику поиска технологических режимов правки, позволили разработать режимы знакопеременного деформирования горячекатаных полос из марок сталей различной категории прочности, пригодных для лазерной и плазменной резки. Разработанные режимы правки полос в 13- и 17-роликовых правильных машинах, установленных в линии АПР-4, и 15-роликовой машины линии АПР-3 цеха отделки металла № 2 ПАО «Северсталь» представлены в таблице 5. Для всех режимов получено, что коэффициент проникновения пластической деформации по толщине полосы при правке составляет 91–93 %, максимальная относительная деформация 2,2–3,0 %. На рисунке 14 в качестве примера представлены результаты определения показателей правки полосы толщиной 4 мм из марки стали S355 в 17-роликовой правильной машине по разработанному режиму ( $y_2 = 4,5$  мм и  $y_{16} = 0,4$  мм, скорость правки 1 м/с). Коэффициент проникновения пластической деформации по толщине полосы при правке составил  $k_{pl} = 91$  %, относительные пластические деформации при правке на входе  $\epsilon_n = 2,2$  %, на выходе  $\epsilon_k = 0,2$  %. После правки остаточные продольные напряжения в листе не превышают 80 МПа, а остаточная энергия – 0,26 Дж. Графики продольных пластических деформаций всех режимов характеризовались плавным убыванием при правке, а графики остаточных напряжений – уравновешенным распределением по толщине.

Таблица 5 – Режимы правки горячекатаных полос из конструкционных марок сталей

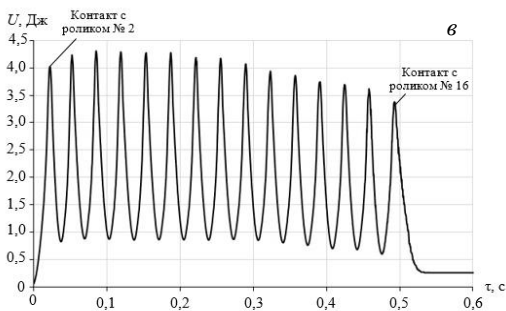
№ режима	$h$ , мм	Марка стали	Перемещения верхних роликов, мм								$k_{pl}$ , %	$\varepsilon_{п}$ , %	$\varepsilon_{к}$ , %
			$y_2$	$y_4$	$y_6$	$y_8$	$y_{10}$	$y_{12}$	$y_{14}$	$y_{16}$			
1	4	S355	4,5	3,9	3,3	2,7	2,2	1,6	1,0	0,4	91	2,2	0,2
2	6	S355	6,9	5,9	4,8	3,8	2,8	1,7	0,7	-	91	2,2	0,36
3	8	S235	6,2	5,3	4,4	3,5	2,6	1,7	0,8		91	2,2	0,41
4	8	S355	6,5	5,6	4,7	3,8	2,8	1,9	1,0	-	93	3,0	0,51
5	8	S500	7,5	5,5	4,8	3,9	3,0	2,2	1,3	-	93	2,7	0,67
6	8	S700	9,1	7,5	6,0	4,6	3,1	1,6	-	-	92	2,4	0,66
7	9	S355	7,0	6,0	5,1	4,1	3,1	2,2	1,2	-	93	2,7	0,62
8	10	S355	8,0	6,7	5,3	4,0	2,6	1,3	-	-	91	2,2	0,54
9	12	S355	7,3	6,1	5,0	3,8	2,7	1,5	-	-	92	2,5	0,62
10	12	S700	8,2	6,9	5,6	4,4	3,1	1,8	-	-	91	2,3	0,75
11	14	S355	6,8	5,8	4,7	3,7	2,6	1,6	-	-	92	2,4	0,66
12	16	S355	6,6	5,7	4,7	3,8	2,8	1,9	-	-	92	2,4	0,79



а



б



в

Рисунок 14 – Результаты определения показателей правки полосы толщиной 4 мм:

а – распределение продольных напряжений после правки;  
 б – относительные продольные пластические деформации верхнего поверхностного волокна за время правки  $\tau$  (цифрами от 2 до 16 обозначены номера роликов);  
 в – изменение потенциальной энергии деформации

По полученным режимам таблицы 5 в мае – июле 2019 г. выполнялась опытная правка полос шириной 1500 мм. От каждого рулона отбирались листы на расстоянии 60–90 м от начала рулона, на контрольной плите измерялась высота неплоскостности каждого листа. Порезка листов на продольные полосы шириной 100 мм осуществлялась на машине плазменной резки SatroniK LS3000 и фиксировалась величина фактического изгиба каждой полоски. Высота неплоскостности всех отобранных листов не превышала 1–3 мм. Результаты выполненных экспериментов показали, что предложенные режимы правки обеспечивают высокую плоскостность отобранных листов не только после правки, но и



Рисунок 15 – Результаты порезки листа толщиной 4 мм и шириной 1500 мм на установке плазменной резки

и после раскроя листов на машине плазменной резки. В случае резки полос толщиной 4–8 мм отклонение полосок не превысило 4 мм, а при правке полос от 9 мм и больше – отклонения не превышали 5 мм. На рисунке 15 показан результат раскроя листа толщиной 4 мм и шириной 1500 мм на полоски на установке плазменной резки. Отклонения полосок в этом случае не превысили 1 мм.

Выполненный комплекс теоретических и промышленных исследований позволил определить технологические режимы правки горячекатаных полос для получения листового проката, пригодного для лазерной резки, и достижения существенного улучшения плоскостности стальных листов.

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

На основании теоретических и экспериментальных исследований раскрыты новые закономерности формообразования листового проката на этапах производства от прокатки слэба до правки горячекатаного стального листового проката, получен комплекс технических и технологических решений по повышению качественных показателей широкой стальной листовой продукции, стойкости деформирующего рабочего инструмента и экономии материальных ресурсов.

По результатам проведенных исследований, полученным техническим и технологическим решениям сделаны следующие выводы:

1. Представлены общие закономерности перехода металла с боковых граней на широкие при прокатке слэба в черновой группе непрерывного стана горячей прокатки, полученные на основе промышленных исследований и численного моделирования. Установлено, что переход металла с узкой грани на широкую уменьшается при снижении суммарного обжатия в первых трех горизонтальных проходах, использовании профилировок вертикальных валков всех клетей, обеспечивающих получение вогнутой боковой грани раската при прокатке, выполнении скосов на слэбе и не зависит от распределения вертикальных обжатий по клетям черновой группы. Моделированием и опытно-промышленной прокаткой показано, что уменьшение суммарного обжатия до 10 % в первых трех горизонтальных проходах приводит к уменьшению затекания металла с ребра на широкую грань до 20 % после прокатки в черновой группе стана. Выполнение на боковых ребрах слэба равносторонних скосов размером, равным разнице между начальной шириной слэба и требуемой шириной полосы, ограничивает переход металла с узкой грани на широкую. Показано, что выполнение на слэбе скосов размером 50 мм позволяет снизить при прокатке не менее чем в 2 раза величину перехода металла с узкой грани на широкую.

2. Разработана новая методика выбора профилировок валков, интегрирующая моделирование поперечного профиля листового проката и оценку напряженного состояния валковых систем прокатных станов. Моделирование формообразование профиля листового проката отличается от известных методов применением пространственной конечно-элементной модели валковой системы и непрерывным описанием профиля бочки и включает геометрическое суммирование кривых упругих деформаций, профиля износа валков, теплового профиля с учетом исходной неплоскостности проката и возможностей регулирующих воздействий осевой сдвижки рабочих валков и их гидравлического изгиба. Обосновано, что применение пространственной конечно-элементной модели валковой системы с непрерывным описанием профиля бочки при нахождении упругих деформаций валков обеспечивает точность определения профиля со средней погрешностью, не превышающей 8,5 %.

Установлены закономерности влияния профилировок валковых систем, средств регулирования на формирование поперечного профиля прокатываемых полос и стойкость валков. Показано, что в валковой системе с асимметричными выпукло-вогнутыми профилировками валков имеется резерв регулирования поперечного профиля полосы за счет корректировки выпуклости и вогнутости профилировки рабочего валка. Уменьшение радиусов выпуклости и вогнутости профилировки на 2,5 % приводит к уменьшению прогиба бочки рабочего валка на ширине полосы до 40 %, дальнейшее уменьшение радиусов приводит к росту прогиба, в том числе и на ширине полосы, без существенного увеличения напряжений в валках.

Для повышения стойкости опорных валков и уменьшения в межвалковом контакте опасных пиковых значений напряжений валковых систем с выпуклыми, вогнутыми и цилиндрическими профилировками предложен новый способ профилирования бочки опорного валка. Способ заключается в выполнении профиля бочки опорного валка выпуклым в виде трех участков параболических кривых, имеющих в сопряжениях общие касательные, при этом крайние кривые плавно сопрягаются с торцом бочки.

3. Разработан новый научный подход к анализу и оценке параметров состояния рабочего слоя опорных валков, основанный на учете разной интенсивности работы валков по клетям непрерывного стана и включающий определение за кампанию числа контактов с рабочим валком или длины прокатанной полосы, величины межвалковой нагрузки, приращения твердости бочек, износа и величины съема после прокатной кампании. Практически доказано, что применение такого подхода позволяет решать вопросы обоснованного увеличения прокатной кампании опорных валков, снижения расхода и увеличения их стойкости.

Установлен новый критерий оценки рабочего слоя опорного валка – деформационное упрочнение его бочки после прокатки по клетям непрерывного стана. На основе обработки результатов численного эксперимента получена зависимость, описывающая влияние длины прокатанных полос и межвалковой нагрузки на приращение твердости бочки. Показано соответствие результатов численного и промышленного экспериментов.

На основе разработанного подхода создан новый способ эксплуатации опорных валков непрерывного стана горячей прокатки с дифференцированной величиной съема при перешлифовке валков. Величина съема определяется по актуальным данным со стана за прокатную кампанию в зависимости от интенсивности работы опорного валка в клетях. Применение способа позволяет снижать расход валков в 1,2 раза и гарантированно увеличивать наработку рабочего слоя опорного валка не менее чем на 10 % без увеличения степени наклепа и износа бочки.

4. Представлено развитие теории упругопластического изгиба при правке на многороликовых машинах на основе комплекса теоретических и экспериментальных исследований, направленных на расширение возможностей воздействия на листовую прокат при его производстве для сохранения высокой плоскостности при раскрое по сложному контуру на установках лазерной или плазменной резки. Определены показатели процесса правки, влияющие на плоскостность листов при раскрое высокотехнологичными методами: коэффициент проникновения пластической деформации по толщине листового проката, относительная пластическая деформация полосы при правке на входе и выходе, уровень остаточных продольных напряжений по толщине листа, остаточная потенциальная энергия.

Раскрыт и описан механизм возникновения остаточных напряжений при правке в условиях циклической знакопеременной деформации, обусловленный величиной пластической деформации и неоднородностью распределения деформаций по толщине при правке. Установлено, что в центральной части сечения полосы формируется область «стесненных» упругих напряжений, препятствием по высвобождению обратимой потенциальной энергии которых становятся приповерхностные слои с необратимой пластической деформацией. Показано, что чем меньше накопленной энергии деформации аккумулировано по толщине полосы после правки, тем меньше отклонения от плоскостности листов при высокотехнологичной резке.

Установлено, что коэффициент проникновения пластической деформации по толщине листового проката не менее 90 % в начале правки с минимальным уровнем на выходе обеспечивает уменьшение значений остаточных напряжений, потенциальной энергии в листах после правки и отклонений от плоскостности листов при лазерной или плазменной резке. Впервые получена зависимость изменения коэффициента проникновения пластической деформации по толщине полосы от конструктивных параметров роликовых правильных машин и параметров процесса правки.

Разработана методика выбора режима правки для различных роликовых правильных машин, позволяющая определять их настройки, устраняющие исходное неоднородное напряженное состояние горячекатаных полос различных групп прочности и дефекты неплоскостности, с обеспечением минимального уровня остаточных напряжений и потенциальной энергии в готовом прокате, пригодном для лазерной или плазменной резки.

5. Промышленная реализация результатов совершенствования процессов листопркатного производства в направлении повышения эффективности их формообразования для достижения высоких показателей качества широких стальных полос и листов, повышения стойкости валков и экономии материальных ресурсов при производстве проката обеспечивает суммарный экономический эффект более 26 млн руб. в год.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ**

### **Публикации в изданиях, определенных ВАК РФ**

1. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Трусов К.А. Выявление и устранение причин потери плоскостности горячекатаных стальных листов в процессе их лазерной резки // Производство проката. – 2017. – № 6. – С. 11–15.

2. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Трусов К.А. Применение метода конечных элементов для выявления причин потери плоскостности горячекатаных стальных листов в процессе их лазерной резки // Металлы. – 2018. – № 1. – С. 103–108.

Garber E.A., Bolobanova N.L., Trusov K.A. Application of the finite element method to reveal the causes of loss of planeness of hot-rolled steel sheets during laser cutting // Russian Metallurgy (Metally). – 2018. – No. 1. – P. 103-108 (перевод).

3. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Трусов К.А. Моделирование напряжений и деформаций в плоской стальной полосе при ее правке в роликовой правильной машине // Черная

металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – № 1. – С. 68–73.

4. 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.

5. 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 // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2019. – № 6. – С. 718–724.

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

Antonov P.V., Bolobanova N.L., Kozhevnikova I.A. Roller stress and strain in a broad-strip cold-rolling mill // Steel in Translation. – 2019. № 5 (49). – P. 339–344 (перевод).

7. Болобанова Н.Л., Котов К.А., Нуштаев Д.В. Исследование коэффициента пластификации при правке горячекатаных стальных полос на роликовых правильных машинах // Сталь. – 2020. – № 3. – С. 32–36.

8. Котов К.А., Болобанова Н.Л., Нуштаев Д.В. Моделирование напряжений при правке горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2020. – Том 63. № 10. – С. 808–814.

Kotov K.A., Bolobanova N.L., Nushtaev D.V. Modeling the stress state of a steel strip with a roller leveling machine under cyclic alternating deformations // Steel in Translation. – 2020. – № 11 (50). – P. 750–755 (перевод).

9. 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.

10. Болобанова Н.Л., Гарбер Э.А. Численное моделирование процесса деформации сляба с разной величиной обжатия в вертикальных валках черновой группы стана 2000 // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2021. – № 6. – С. 675–681.

11. Болобанова Н.Л., Гарбер Э.А. Исследование и моделирование процесса деформации сляба в черновой группе стана 2000 // Металлург. – 2021. – № 5. – С. 71–75.

Bolobanova N.L., Garber E.A. Study and modeling of slab deformation processes in the roughing stands of Severstal's mill-2000 hot-rolling line // Metallurgist. – 2021. – Vol. 65. No. 5–6. – P. 564–570 (перевод).

12. Болобанова Н.Л., Гарбер Э.А., Ермушин Д.Ю. Исследование напряженного состояния опорных валков широкополосного стана горячей прокатки методом моделирования // Сталь. – 2021. – № 12. – С. 15–18.

Bolobanova N.L., Garber E.A., Ermushin D.Yu. Stress analysis of backup rolls in a wide-strip hot mill using a modeling method // Steel in Translation. – 2021. – № 12 (51). – P. 899–902 (перевод).

13. Болобанова Н.Л., Котов К.А., Юсупов В.С. Исследование и прогнозирование пластификации горячекатаной стальной полосы при правке в условиях знакопеременного деформирования // Металлург. – 2022. – № 10. – С. 93–98.

Bolobanova N.L., Kotov K.A., Yusupov V.S. Study and prediction of plasticization of hot-rolled steel strip during straightening under conditions of alternating deformation // Metallurgist. – Vol. 66. – No. 9–10. – P. 1290–1298 (перевод).

14. Болобанова Н.Л., Гарбер Э.А., Юсупов В.С. Развитие методов профилирования валков листопрокатного производства // Сталь. – 2022. – № 11. – С. 18–23.

Bolobanova N.L., Garber E.A., Yusupov V.S. Development of roll profiling methods of sheet rolling production // Steel in Translation. – 2022. – № 52 (11). – P. 1073–1078 (перевод).



15. Ермушин Д.Ю., Лобачев А.А., Болобанова Н.Л. Прогнозирование упрочнения бочки опорного вала на основе компьютерного моделирования // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2023. – № 1 (112). – С. 27–38.

16. Ермушин Д.Ю., Болобанова Н.Л. Исследование поверхностного деформационного упрочнения бочки опорных валков чистой группы широкополосного стана горячей прокатки // Черные металлы. – 2023. – № 2. – С. 27–32.

#### **Монографии**

17. 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.

18. 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.

#### **Учебное пособие**

19. Болобанова Н.Л. Компьютерное моделирование процессов и оборудования металлургического производства. Учебное пособие. – Череповец: ЧГУ, 2014. – 91 с.

#### **Патенты на изобретения и свидетельство регистрации ПО для ЭВМ**

20. Способ эксплуатации опорных валков непрерывных широкополосных прокатных станов. Патент на изобретение № 2795664, Российская Федерация, МПК В21В28/04 – 2022125004; заявл. 23.09.2022; опубл. 05.05.2023. Бюл. № 13. / Киселев Д.А., Боев А.Н., Максимов А.В., Чекрыгин А.В., Болобанова Н.Л.

21. Способ профилирования опорных валков стана кварто. Патент на изобретение № 2585594, Российская Федерация, МПК В21В27/02 – 2015110267/02; заявл. 23.03.2015; опубл. 27.05.2016. Бюл. № 15. / Запечалов В.П., Корчагин А.М., Покровский Д.А., Сычев О.Н., Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л.

22. Болобанова Н.Л. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021610072, Российская Федерация. Supreme Technology. Заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Череповецкий государственный университет». № заявки 2020666198; заявл. 10.12.2020; опубл. 12.01.2021.

#### **Публикации в изданиях, входящих в наукометрические базы Web of Science и Scopus**

23. Trusov K.A., Mishnev P.A., Garber E. A., Bolobanova N.L., Nushtaev D.V., Ardatov K.V. Investigation of blank bow defect after roller leveller by finite element analysis // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1063, 2018. 012192.

24. Kozhevnikov A.V., Kozhevnikova I.A., Bolobanova N.L., Antonov P.V., Anisimov D.A. Improvement of operational efficiency of cold rolling mill work rolls // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2019. – № 6 (54). – P. 1298–1304.

25. Kozhevnikova I.A., Bolobanova N.L., Antonov P.V., Zhilenko S.V., Kozhevnikov A.V. Development and industrial testing of advanced rolling conditions at 4-stand mill 2100 of PAO Severstal // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 718, 2020. 012008.

#### **Основные публикации в трудах международных конференций и семинаров**

26. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л. Совершенствование методики расчета упругих деформаций валковой системы клетки «кварто» для повышения точности выполнения поперечного профиля широких полос // Материалы Международной научно-практической конференции «Современная металлургия начала нового тысячелетия». Часть II. – Липецк: Из-во ЛГТУ, 2012 г. – С. 3–8.

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

28. Болобанова Н.Л., Гарбер Э.А. Особенности моделирования упругих деформаций валков клетки «кварто» методом конечных элементов, обеспечивающие повышение точности расчета поперечного профиля полосы // *Материалы Международного научного семинара «Научно-технический прогресс в металлургии – 2012»*. – Череповец: ЧГУ, 2013. – С. 138–146.

29. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Корчагин А.М., Сычев О.Н., Запелов В.П., Покровский Д.А. Развитие методов профилирования валков толстолистового стана // *Материалы Международного научного семинара «Проблемы черной металлургии – 2014»*. – Череповец: ЧГУ, 2015. – С. 113–120.

30. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л. Совершенствование методов моделирования профилировок валков листопркатного производства // *Материалы II Международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии»*. – Череповец: ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет», 2015. – С.106–111.

31. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л. Развитие методов профилирования валков широкополосных станов // *Материалы X Международной научно-технической конференции «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования»*. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2015. – С. 52–63.

32. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Трусов К.А. Моделирование и исследование конструктивных параметров роликовых правильных машин // *Материалы III Международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии – 2017»*. Череповец: Череповецкий государственный университет, 2017. – С. 63–69.

33. Котов К.А., Болобанова Н.Л. Моделирование процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации // *Материалы VIII Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов»*. Москва: ИМЕТ РАН, 2019. – С. 716–718.

34. Котов К.А., Нуштаев Д.В., Болобанова Н.Л. Исследование механизма формирования остаточных напряжений при правке горячекатаных полос на роликовых правильных машинах // *Материалы IV Международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии – 2019»*. Череповец: Череповецкий государственный университет, 2019. – С. 103–109.

35. Антонов П.В., Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л. Повышение точности формирования поперечного профиля и качества поверхности холоднокатаных полос // *Труды XII Конгресса прокатчиков (том II)*. Под редакцией Спирина С.А., Думчевой Т.Н. – Москва: Грин Принт, 2020. – С. 160–166.

36. Котов К.А., Нуштаев Д.В., Болобанова Н.Л. Механизм возникновения остаточных напряжений при правке горячекатаных полос на роликовых правильных машинах // *Материалы III Международной научно-технической конференции, посвященной 120-летию со дня рождения член-корреспондента АН СССР Павлова Игоря Михайловича «Павловские чтения»*. Москва: ИМЕТ РАН, 2021. – С. 55–57.

37. Болобанова Н.Л., Ермушин Д.Ю. Исследование интенсивности напряжений в контакте валков чистой группы широкополосного стана горячей прокатки // *Сборник трудов XIII Международной научно-технической конференции «Интеллектуально-информационные технологии и интеллектуальный бизнес (ИНФОС-2022)»*. – Вологда: ВоГУ, 2022. – С. 91–94.

38. Болобанова Н.Л., Ермушин Д.Ю. Моделирование поверхностного деформационного упрочнения инструмента при широкополосной прокатке // *Материалы 37-ой Международной научно-технической конференции «Перспективные направления развития технологий машиностроения и металлообработки» «Технология – Оборудование – Инструмент – Качество»*. Под редакцией Шелег В.К. – Минск: Бизнесофсет, 2023. – С.10–12.

39. Болобанова Н.Л., Киселев Д.А., Максимов А.В., Чекрыгин А.В., Боев А.Н., Ермушин Д.Ю. Оценка упрочнения поверхности бочки опорного вала // *Труды XIII Конгресса прокатчиков (том II)*. Под редакцией Спирина С.А., Думчевой Т.Н. – Москва: Грин Принт, 2023. – С. 358–363.