

На правах рукописи



ДОБРЯНСКИЙ Андрей Владимирович

**РАЗРАБОТКА ОСНОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАЛИБРОВОК ВАЛКОВ
ДЛЯ ПРОКАТКИ АСИММЕТРИЧНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ПРОФИЛЕЙ
НА УНИВЕРСАЛЬНЫХ РЕЛЬСОБАЛОЧНЫХ СТАНАХ**

Специальность: 2.6.4. Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новокузнецк, 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном
образовательном учреждении высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»

Научный руководитель: **ФАСТЫКОВСКИЙ Андрей Ростиславович**
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Обработка
металлов давлением и материаловедение.
ЕВРАЗ ЗСМК» ФГБОУ ВО «Сибирский
государственный индустриальный университет»

Официальные оппоненты: **ШВАРЦ Данил Леонидович**
доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Обработка металлов давлением»
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

СИДЕЛЬНИКОВ Сергей Борисович
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Обработка металлов давлением»
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный
университет», г. Красноярск

Ведущая организация: **АО «Уральский институт металлов»,**
г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится «27» ноября 2026 г. в 10–00 в ауд. 3П на
заседании диссертационного совета 24.2.401.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский
государственный индустриальный университет» по адресу: 654007, Кемеров-
ская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42,
СибГИУ, факс: (3843) 46–57–92, e–mail: ds21225201@sibsiu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и
на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный
университет» www.sibsiu.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.401.01
доктор технических наук, доцент



Уманский
Александр
Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Железнодорожный транспорт существует уже не одно столетие и, несмотря на интенсивное развитие и других видов транспорта, пока не имеет реальной альтернативы, особенно для стран с большой территорией, таких как Россия, Китай, Казахстан. Постоянно повышаются требования к железнодорожному транспорту по скорости и интенсивности перевозок, что приводит, в частности, к повышению требований к качеству и уровню свойств рельсов.

В настоящее время крупные производители железнодорожных рельсов инвестируют средства в обновление оборудования и совершенствование технологии производства рельсовых профилей для железных дорог.

Основными тенденциями при производстве железнодорожных рельсов являются:

- прокатка в универсальных клетях;
- переход на выпуск железнодорожных рельсов длиной 100–150 м.

Для достижения требуемых эксплуатационных показателей железнодорожных рельсов в последние годы в Российской металлургии осуществлена коренная реконструкция рельсового производства: в филиале «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ» (г. Новокузнецк) и ПАО «ЧМК» (г. Челябинск) введены в эксплуатацию новые рельсобалочные станы. На рельсопрокатных станах этих предприятий реализованы самые последние достижения в области прокатки рельсовых профилей. Станы оборудованы сверхгибкой универсальной группой из двух универсальных и одной двухвалковой клетей, которые применены впервые в прокатке отечественного прокатного производства.

Как показали итоги работы универсального рельсобалочного стана филиала «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ», производство рельсов по новой технологии с использованием реверсивной прокатки в универсальных клетях кардинально отличается от традиционного способа. Отсутствие практического опыта, недостаточный объем информации в зарубежной и отечественной литературе создают большие трудности по поиску эффективных режимов прокатки, проектированию калибровок в реверсивной группе универсальных клетей при получении рельсовых профилей и, в особенности, асимметричных профилей.

С точки зрения обеспечения конкурентоспособности рельсовой продукции необходимо решить вопрос по разработке энерго- и металлосберегающих техноло-

гий производства рельсовых профилей. В этой связи при совершенствовании режимов прокатки рельсовых профилей следует учитывать влияние изменения параметров деформации не только на качество производимой продукции, но и на технико-экономические показатели их производства.

Исходя из вышесказанного можно заключить, что исследование процессов формоизменения металла, разработка рациональных режимов прокатки и основ проектирования калибровок асимметричных рельсовых профилей с использованием универсальных клетей на современном рельсобалочном стане являются актуальными задачами; их решение позволит повысить производительность, улучшить качество асимметричных рельсовых профилей.

Степень разработанности темы исследования

Почти за 200-летнюю историю производства рельсовых профилей применялось значительное количество различных калибровок, использующих всевозможные принципы деформирования металла, калибры различной конфигурации, различные комбинации таких калибров. Каждая такая калибровка обладает своей спецификой, определяющей свойства готового проката.

Большой вклад в разработку теории и практики создания калибровок валков для получения различных профилей внесли работы В.Е. Грум-Гржимайло, И.И. Кучко, Б.П. Бахтинова, М.М. Штернова, Б.М. Илюковича, П.И. Полухина, И.С. Тришевского, П.А. Александрова, А.П. Чекмарева, Б.В. Мерекина, Б.Б. Диомидова, Н.В. Литовченко, В.К. Смирнова, В.А. Шилова, Ю.В. Инатовича, В.В. Дорофеева, Д.Л. Шварца и других ученых.

В настоящее время перспективным направлением является прокатка рельсовых профилей с использованием непрерывных групп универсальных клетей. На сегодняшний момент существует методика расчетов универсальных калибров только для четырехвалковых калибров при прокатке железнодорожных рельсов, имеющих асимметрию только в одной плоскости.

Для асимметричных рельсовых профилей в двух плоскостях (таких как рельсы железнодорожные остряковые типа ОР50, ОР65, ОР75; рельсы усовиковые типа УР65; заготовка трамвайного рельса Т62) методика проектирования универсальных четырехвалковых калибров в литературе отсутствует.

Также отсутствует методика проектирования чистового трехвалкового универсального калибра для прокатки рельсовых профилей.

Общей тенденцией опубликованных работ зарубежных авторов, посвященных технологии производства рельсовых профилей с использованием универсальных клеток, является их обзорный и отрывочный характер, что не позволяет рассматривать данные публикации в качестве научного задела для совершенствования режимов прокатки и разработки новых способов прокатки рельсовых профилей.

Работа выполнена в рамках: базовой части Государственного задания Минобрнауки РФ, проект № 11.6365.2017/БЧ «Развитие теоретических основ процессов формирования качества рельсовой продукции для высокоскоростных железных дорог», 2017–2019 гг., гранта РФФИ № 20–48–420011 «Теоретические основы энергоэффективного производства железнодорожных рельсов с повышенными эксплуатационными свойствами», 2020–2022 гг.

Цель: разработка научно-обоснованных методик проектирования калибровок валков для прокатки асимметричных рельсовых профилей в условиях современного универсального рельсобалочного стана, позволяющих улучшить качество готовой продукции и повысить производительность рельсопрокатного производства.

Для практической реализации намеченной цели требуется решить следующие **задачи**:

1. Провести аналитический обзор методов проектирования калибровок валков, а также технологий прокатки рельсовых профилей в мировой практике.
2. По результатам проведенных исследований разработать технические решения по усовершенствованию технологии прокатки асимметричных рельсов в черновых калибрах дуо-реверсивных клеток с целью повышения качества и увеличения производительности стана.
3. Разработать методику проектирования калибровки валков для прокатки асимметричных рельсовых профилей в универсальных калибрах современного универсального рельсобалочного стана.
4. Опробовать в промышленных условиях и применить результаты работы для проектирования калибровок валков при прокатке асимметричных рельсовых профилей в условиях современного рельсобалочного стана филиала «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ». Использовать теоретические и экспериментальные результаты в учебном процессе.

Научная новизна:

1. Предложена геометрическая модель прокатки асимметричных рельсовых профилей в универсальных и двухвалковых (вспомогательных) калибрах непрерывно-реверсивной группы клетей, основанная на равенстве коэффициентов вытяжки шейки в верхнем и нижнем участках калибра относительно горизонтальной оси, делящей шейку калибра на равные площади.

2. Предложена методика расчета деформирования металла в универсальных четырехвалковых, универсальных трехвалковых и двухвалковых (вспомогательных) калибрах в непрерывно-реверсивной группе клетей для прокатки асимметричных рельсовых профилей.

3. Разработаны зависимости, позволяющие оценить величину обжатий головки и подошвы профиля в универсальных и двухвалковых калибрах, разделенных горизонтальной осью на части, в которых одинаковые коэффициенты вытяжки шеек в непрерывно-реверсивной группе клетей.

Практическая значимость работы:

1. Основываясь на материалах компьютерного моделирования и результатах промышленных исследований, обоснована возможность сокращения числа пропусков при прокатке остряковых рельсов в черновых двухвалковых реверсивных клетях с 14 до 12, что позволило повысить производительность рельсобалочного стана, уменьшить количество брака и за счет этого получить годовой экономический эффект в 10,8 млн. руб. при долевом участии автора 5,4 млн. руб.

2. Разработан новый способ прокатки остряковых рельсов в двухвалковых черновых калибрах, отличающийся от известных способов тем, что позволяет осуществлять подачу скантованного раската из трапециевидного ребрового калибра в рельсовый разрезной калибр без дополнительной раскантовки кантующим оборудованием (патент РФ № 2421968) [1]. Прокатка по новому способу уменьшила отбраковку рельсов по поверхностным дефектам.

3. Разработана калибровка валков для прокатки асимметричных рельсовых профилей (рельс остряковый, рельс усовиковый, заготовка трамвайных рельсов Т62) по предлагаемой методике проектирования калибров в универсальных четырехвалковых, универсальных трехвалковых и двухвалковых (вспомогательных) клетях в непрерывно-реверсивной группе для прокатки асимметричных рельсовых профилей. Предложен новый способ прокатки рельсовых профилей с формированием чистового профиля в четырехвалковом универсальном калибре (патент РФ

№ 2627140) [2]. Использование разработанной калибровки валков для получения асимметричных рельсовых профилей по предлагаемой методике и нового способа прокатки рельсов позволило снизить количество брака и увеличить производительность рельсобалочного стана, что, в свою очередь, дало экономический эффект 31,6 млн. руб. в год при доле участия автора 15,8 млн. руб.

4. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс и используются в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» при подготовке бакалавров по направлению 22.03.02 «Металлургия».

Методология и методы исследования.

Исследования построены на применении фундаментальных положений теории пластичности и обработки металлов давлением.

Для компьютерного моделирования использовали программный продукт QForm, с помощью которого анализировали напряженно-деформированное состояние, силовые параметры при получении асимметричных рельсовых профилей.

В условиях действующего производства на натуральных образцах изучали формоизменение металла при получении асимметричных рельсовых профилей. Силовые параметры исследовали с использованием имеющейся в рельсобалочном цехе автоматической системы записи усилия и момента прокатки.

Экспериментальные данные обрабатывали методами математической статистики.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанные ресурсосберегающие режимы и способы производства острязковых рельсов, обеспечивающие повышение качественных показателей рельсовой продукции и увеличение производительности стана.

2. Методика проектирования калибровок в универсальных четырехвалковых, универсальных трехвалковых и двухвалковых (вспомогательных) клетях на современном универсальном рельсобалочном стане для прокатки асимметричных рельсовых профилей.

3. Новый способ прокатки асимметричных рельсовых профилей, типа острязковые рельсы, в двухвалковых черновых калибрах и новый способ прокатки рельсовых профилей с формированием чистового профиля в четырехвалковом универсальном калибре.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.6.4 – «Обработка металлов давлением» по следующим пунктам:

- п. 1 «Исследование и расчет деформационных, скоростных, силовых, температурных и других параметров разнообразных процессов обработки давлением металлов, сплавов и композитов»;
- п. 2 «Исследование способов, процессов и технологий обработки давлением металлов, сплавов и композитов с помощью методов физического и математического моделирования»;
- п. 6 «Разработка способов, процессов и технологий для обработки металлов давлением, обеспечивающих экологическую безопасность, экономию материальных и энергетических ресурсов, повышающих качество и расширяющих сортамент изделий».

Степень достоверности

Достоверность и объективность представленного материала обоснована значительным массивом экспериментальных данных, полученных на сертифицированном оборудовании, применением общепризнанных пакетов программ для моделирования и статистического анализа экспериментального материала, сравнением результатов исследований с имеющимися в литературе данными по теме диссертации, а также успешным применением в условиях действующего предприятия новых режимов и способов прокатки асимметричных рельсовых профилей.

Апробация результатов работы

Основные результаты и выводы диссертации обсуждались на конференциях и опубликованы в рецензируемых изданиях из перечня ВАК, а также материалах конференций.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XXXII Международной научно-практической конференции «Актуальные научные исследования» (г. Пенза, 2026 г.); 139-ом заседании ежегодной Межотраслевой Рельсовой комиссии (г. Тула, 2023 г.); XIII Международном конгрессе прокатчиков (ЦНИИЧермет им. Бардина, г. Москва, 2022 г.); XXI, XXII Международных научно-технических конференциях «Металлургия: технологии, инновации, качество» (г. Новокузнецк, 2019, 2021 гг. соответственно); 133-ем заседании ежегодной Межотраслевой Рельсовой комиссии (Казахстан, г. Актобе, 2017 г.); 132-ом заседании ежегодной Межотраслевой Рельсовой комис-

сии (г. Иркутск, 2016 г.); Областном конкурсе на лучший инженерно-технический проект «Дни технологий» (г. Кемерово, 2017 г.).

Личный вклад автора состоит в формулировании цели и задач исследования на основе изучения литературных источников, планировании и проведении исследований по численному моделированию и натурным экспериментам процесса прокатки асимметричных рельсовых профилей в условиях действующего производства, разработке рекомендаций и предложений по совершенствованию прокатки асимметричных рельсовых профилей на основе обработки и анализа большого массива экспериментального материала, внедрении обобщенных рекомендаций в условиях рельсобалочного стана.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 17 печатных работ, а том числе 8 статей в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ. По результатам работы получено 2 патента на изобретение.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений, изложена на 135 страницах машинописного текста, содержит 53 рисунка, 7 таблиц, список литературы из 164 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи, показана научная новизна работы, практическая значимость, описаны методология и методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлены сведения об апробации, публикациях и структуре диссертации.

В первой главе отмечено, что в настоящее время большое внимание ученых и практиков уделяется вопросу совершенствования способов производства рельсовых профилей, созданию калибровок валков, обеспечивающих повышение производительности и улучшение качества данной продукции. Рассмотрены разные способы проектирования калибровок рельсовых профилей. Установлено, что в литературе отсутствуют научно обоснованные методики проектирования калибровок асимметричных рельсовых профилей, прокатываемых на современных универсальных рельсобалочных станах. Проведен анализ отечественных и зарубежных технологий получения рельсов с использованием прокатки в универсальных калибрах. Выявлена тенденция использования непрерывных реверсивных групп,

включающих универсальные клетки для формирования окончательного рельсового профиля.

Проведенный анализ литературных источников позволил сформулировать цель и задачи исследований.

Во второй главе приведены результаты исследований получения асимметричных рельсов типа ОР65 в условиях действующего универсального рельсобалочного стана филиала «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ». Изучены энергосиловые параметры прокатки асимметричных рельсов типа ОР65 в черновых клетях BD1 и BD2 с использованием системы мониторинга усилия прокатки в программном комплексе ИВА. Параллельно процесс прокатки рельсов типа ОР65 исследовался с применением математического моделирования в пакете программ QForm. При моделировании определяли усилие прокатки и напряженно-деформированное состояние в каждом пропуске при прокатке остряковых рельсов типа ОР65 в черновых клетях BD1, BD2 по схеме прокатки, приведенной на рисунке 1.

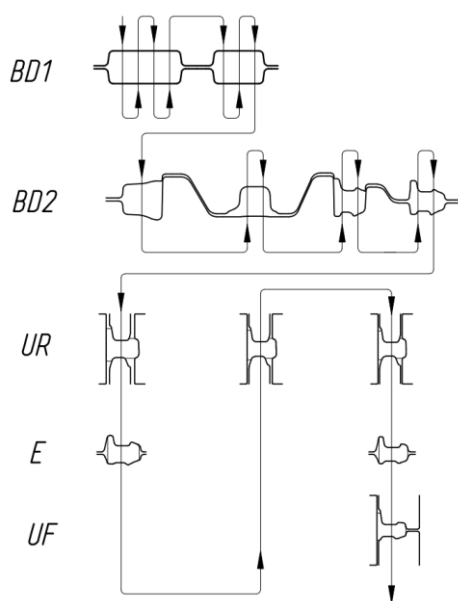


Рисунок 1 – Схема прокатки асимметричного рельса типа ОР65

Результаты исследований усилия прокатки в черновых клетях рельсов типа ОР65 приведены на рисунке 2, из которого видно хорошее совпадение (ошибка не более 10%) экспериментальных данных с результатами моделирования в пакете программ QForm. Данные моделирования напряженно-деформированного состояния при прокатке асимметричных рельсов типа ОР65 в клетях BD1 и BD2 позволили выявить резервы по пластическим свойствам металла в рассматриваемых режимах формоизменения.

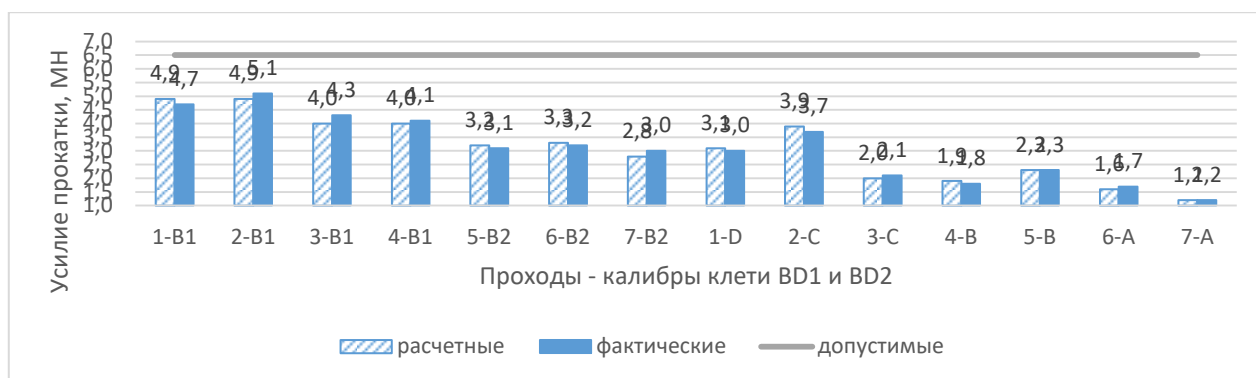


Рисунок 2 – Расчетные и фактические величины усилия при прокатке
остряковых рельсов типа ОР65 в клетях BD1 и BD2

Опираясь на экспериментальные данные и результаты математического моделирования выявлена возможность интенсификации режимов обжатий в клетях BD1 и BD2 при прокатке асимметричных рельсов типа ОР65 с целью сокращения числа пропусков.

В третьей главе рассмотрены основы проектирования калибров для получения асимметричных рельсовых профилей в клетях непрерывной реверсивной группы, включающей универсальные клетки.

Для расчета калибровки асимметричных рельсовых профилей, имеющих разные размеры элементов профиля относительно вертикальной и горизонтальной осей, целесообразно использовать принцип раздельного определения коэффициентов деформации шейки и фланцев верхней и нижней частей универсального четырехвалкового калибра, разделенного горизонтальной осью, обеспечивающей одинаковую вытяжку шейки в этих частях калибра. Используемый подход разделения калибра при одинаковых значениях вытяжки верхней и нижней частей шейки профиля дает возможность оценить условия формоизменения частей калибра, гарантирующие одинаковые величины коэффициентов вытяжки. Совокупность условий формоизменения частей калибра учитывает оценку бокового обжатия, увеличение или уменьшение фланцев подошвы и головки рельсового профиля в процессе прокатки. При одинаковых значениях вытяжек элементов профиля в калибре не происходит перераспределения металла между головкой, шейкой и подошвой.

Используя коэффициенты высотного обжатия шейки в калибрах реверсивной группы с учетом размеров чистового калибра, можно оценить толщину шейки в каждом четырехвалковом и двухвалковом калибрах реверсивной группы, подго-

товительном калибре обжимной клетки, суммарное обжатие шейки, а также обжатие шейки со стороны верхнего и нижнего валков в универсальных калибрах.

При проектировании калибровки асимметричных рельсовых профилей для получения одинаковой вытяжки верхней и нижней частей шейки необходимо раздельно оценивать деформацию по высоте шейки и фланцев в верхней и нижней области разделенного горизонтальной осью четырехвалкового калибра.

Определение величины деформирования в универсальных асимметричных рельсовых калибрах шейки со стороны верхнего и нижнего валков дает возможность более точно определить размеры фланцев по высоте в двухвалковых открытых рельсовых калибрах дуо-реверсивной клетки и калибрах эджерной клетки непрерывно-реверсивной группы клетей.

Руководствуясь выше рассмотренными принципами разработана методика проектирования калибров для получения асимметричных рельсовых профилей типа ОР65, УР65, ЗТ62.

Формоизменение металла и размеры калибров рассчитывают, двигаясь против направления прокатки от чистового прохода. Последовательность расчета зависит от вида применяемых калибров:

а) универсальный чистовой трехвалковый калибр

Для расчета формоизменения металла при прокатке в чистовом универсальном трехвалковом рельсовом калибре он делится на две части относительно горизонтальной оси при обеспечении одинаковой площади поперечного сечения верхнего и нижнего участков шейки и одинаковых коэффициентах вытяжки верхнего и нижнего участков шейки в этих частях $F_{ш(в)} = F_{ш(н)}$ и $\lambda_{ш(в)} = \lambda_{ш(н)}$ (рисунок 3).

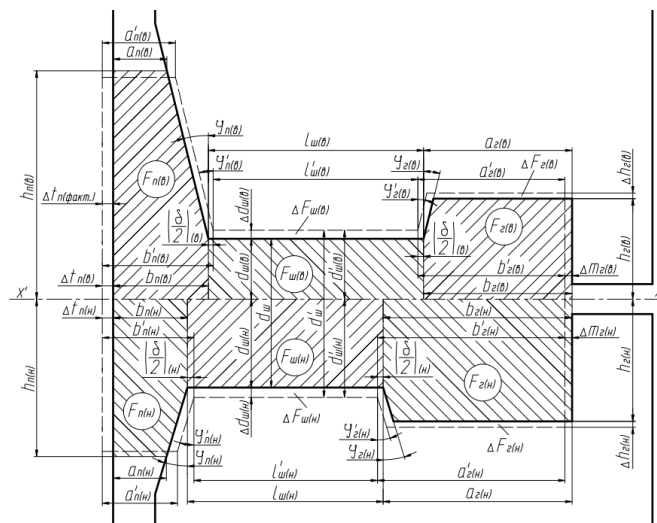


Рисунок 3 – Схема деформирования раската
в трехвалковом чистовом универсальном калибре

Расчет положения горизонтальной оси относительно гребней горизонтальных валков проводится по формулам:

$$d_{ш(в)} = \frac{d_{ш}}{\frac{l_{ш(в)}}{l_{ш(н)}} + 1}; \quad d_{ш(н)} = d_{ш} - d_{ш(в)}, \quad (1)$$

где $d_{ш}$ – толщина шейки; $d_{ш(в)}$, $d_{ш(н)}$ – расстояние от гребня верхнего и нижнего валка до оси $X' - X'$, делящей шейку калибра на две равные площади; $l_{ш(в)}$, $l_{ш(н)}$ – ширина гребня шейки со стороны верхнего и нижнего валка.

Определение величины обжатия шейки со стороны верхнего и нижнего валков $\Delta d_{ш(в)}$, $\Delta d_{ш(н)}$ осуществляется по формулам:

$$\Delta d_{ш(в)} = \left(d_{ш} \frac{1}{\eta_{ш}} - d_{ш} \right) - \Delta d_{ш(н)}; \quad \Delta d_{ш(н)} = \frac{\left(d_{ш} \frac{1}{\eta_{ш}} - d_{ш} \right) \frac{l_{ш(в)}}{l_{ш(н)}}}{1 + \frac{l_{ш(в)}}{l_{ш(н)}}}, \quad (2)$$

где $\frac{1}{\eta_{ш}}$ – коэффициент высотной деформации шейки.

Для выполнения условия $\lambda_{ш(в)} = \lambda_{г(в)}$ и $\lambda_{ш(н)} = \lambda_{г(н)}$ в чистовом калибре определяются величины обжатия головки профиля в верхней и нижней частях по формулам:

$$\Delta h_{г(в)} = \frac{F_{г(в)}(\lambda_{ш(в)} - 1)}{a'_{г(в)}}; \quad \Delta h_{г(н)} = \frac{F_{г(н)}(\lambda_{ш(н)} - 1)}{a'_{г(н)}}, \quad (3)$$

где $\Delta h_{г(в)}$, $\Delta h_{г(н)}$ – обжатие верхней и нижней частей головки; $F_{г(в)}$, $F_{г(н)}$ – площадь верхней и нижней части фланца головки; $a'_{г(в)}$, $a'_{г(н)}$ – толщина головки верхнего и нижнего фланца у вершины задаваемого раската.

Для выполнения условий $\lambda_{ш(в)} = \lambda_{п(в)}$ и $\lambda_{ш(н)} = \lambda_{п(н)}$ определяют величины обжатий подошвы для каждого участка трехвалкового калибра по формулам:

$$\Delta t_{n(в)} = \frac{\frac{d'_{ш(в)} l'_{ш(в)}}{d_{ш(в)} l_{ш(в)}} \left[0,5(a_{n(в)} + b_{n(в)})(h_{n(в)} - d_{ш(в)}) + b_{n(в)} d_{n(в)} \right]}{h_{n(в)}} - \frac{\left[\left(b_{n(в)} + \left(\frac{\delta}{2} \right)_{(в)} - \frac{h_{n(в)} - d_{ш(в)}}{2} \operatorname{tg} \varphi_{n(в)} \right) (h_{n(в)} - d'_{ш(в)}) \right] + b_{n(в)} d'_{ш(в)} + \left(\frac{\delta}{2} \right)_{(в)} d'_{ш(в)}}{h_{n(в)}}; \quad (4)$$

$$\Delta t_{n(н)} = \frac{\frac{d'_{ш(н)} l'_{ш(н)}}{d_{ш(н)} l_{ш(н)}} \left[0,5(a_{n(н)} + b_{n(н)})(h_{n(н)} - d_{ш(н)}) + b_{n(н)} d_{n(н)} \right]}{h_{n(н)}} - \frac{\left[\left(b_{n(н)} + \left(\frac{\delta}{2} \right)_{(н)} - \frac{h_{n(н)} - d_{ш(н)}}{2} \operatorname{tg} \varphi_{n(н)} \right) (h_{n(н)} - d'_{ш(н)}) \right] + b_{n(н)} d'_{ш(н)} + \left(\frac{\delta}{2} \right)_{(н)} d'_{ш(н)}}{h_{n(н)}}, \quad (5)$$

где $d'_{ш(в)}$, $d'_{ш(н)}$ – толщина шейки задаваемой заготовки верхнего и нижнего валка; $l'_{ш(в)}$, $l'_{ш(н)}$ – ширина гребня шейки со стороны верхнего и нижнего валка зада-

ваемой заготовки; $\delta_{(в)}$, $\delta_{(н)}$ – уширение верхней и нижней части шейки; $a_{п(в)}$, $a_{п(н)}$ – толщина подошвы верхнего и нижнего фланца у вершины; $b_{п(в)}$, $b_{п(н)}$ – толщина подошвы верхнего и нижнего фланца у основания; $h_{п(в)}$, $h_{п(н)}$ – высота верхнего и нижнего фланца подошвы; $tg\varphi_{п(н)}$ – уклон внутренней грани подошвы нижнего вала.

В случае, если расчетные величины обжатий фланцев подошвы в верхней и нижней частях калибра со стороны вертикального вала при принятых уширениях шейки не будут равны, то для обеих частей калибра устанавливают обжатия подошвы в диапазоне по формуле:

$$\Delta t_{п(max)} > \Delta t_{п(факт.)} > \frac{\Delta t_{п(в)} + \Delta t_{п(н)}}{2}, \quad (6)$$

где $\Delta t_{п(max)}$ – расчетное обжатие фланца с большей площадью; $\Delta t_{п(факт.)}$ – выбираемое фактическое обжатие фланцев; $\Delta t_{п(в)}$, $\Delta t_{п(н)}$ – расчетное обжатие фланца в верхней и нижней части калибра.

При использовании в качестве чистового калибра для окончательного формирования асимметричного рельсового профиля четырехвалкового универсального калибра (рисунок 4), расчет обжатия головки в нем осуществляется аналогично расчету подошвы для трехвалкового калибра. Расчет величины обжатия фланцев головки в верхней и нижней частях в чистовом четырехвалковом калибре осуществляется по формулам:

$$\Delta t_{Г(в)} = \frac{\frac{d'_{ш(в)} l'_{ш(в)}}{d_{ш(в)} l_{ш(в)}} [0,5(a_{Г(в)} + b_{Г(в)})(h_{Г(в)} - d_{ш(в)}) + b_{Г(в)} d_{ш(в)}]}{h_{Г(в)}} - \frac{\left[\left(b_{Г(в)} - \left(\frac{h_{Г(в)} - d_{ш(в)}}{2} \right) tg\varphi_{Г(в)} + \left(\frac{\delta}{2} \right)_{(в)} \right) (h_{Г(в)} - d'_{ш(в)}) + \left(b_{Г(в)} + \left(\frac{\delta}{2} \right)_{(в)} \right) d'_{ш(в)} \right]}{h_{Г(в)}}; \quad (7)$$

$$\Delta t_{Г(н)} = \frac{\frac{d'_{ш(н)} l'_{ш(н)}}{d_{ш(н)} l_{ш(н)}} [0,5(a_{Г(н)} + b_{Г(н)})(h_{Г(н)} - d_{ш(н)}) + b_{Г(н)} d_{ш(н)}]}{h_{Г(н)}} - \frac{\left[\left(b_{Г(н)} - \left(\frac{h_{Г(н)} - d_{ш(н)}}{2} \right) tg\varphi_{Г(н)} + \left(\frac{\delta}{2} \right)_{(н)} \right) (h_{Г(н)} - d'_{ш(н)}) + \left(b_{Г(н)} + \left(\frac{\delta}{2} \right)_{(н)} \right) d'_{ш(н)} \right]}{h_{Г(н)}}, \quad (8)$$

где $a_{Г(в)}$, $a_{Г(н)}$ – толщина головки верхнего и нижнего фланца у вершины; $b_{Г(в)}$, $b_{Г(н)}$ – толщина головки верхнего и нижнего фланца у основания; $h_{Г(в)}$, $h_{Г(н)}$ – высота верхнего и нижнего фланца головки; $tg\varphi_{Г(в)}$, $tg\varphi_{Г(н)}$ – уклон внутренней грани головки верхнего и нижнего вала.

$$\Delta h_{\Gamma(B)} = \frac{F_{\Gamma(B)}(\lambda_{\text{ш}(B)}-1)}{a'_{\Gamma(B)}}; \quad \Delta h_{\Gamma(H)} = \frac{F_{\Gamma(H)}(\lambda_{\text{ш}(H)}-1)}{a'_{\Gamma(H)}}, \quad (9)$$

а подошвы по формулам:

$$\Delta h_{\Pi(B)} = \frac{F_{\Pi(B)}(\lambda_{\text{ш}(B)}-1)}{a_{\Pi(B)}}; \quad \Delta h_{\Pi(H)} = \frac{F_{\Pi(H)}(\lambda_{\text{ш}(H)}-1)}{a_{\Pi(H)}}, \quad (10)$$

предварительно рассчитывается обжатие шейки по формулам:

$$\Delta d_{\text{ш}(H)} = \frac{\left(d_{\text{ш}} \frac{1}{\eta_{\text{ш}}} - d_{\text{ш}}\right) \frac{l_{\text{ш}(B)}}{l_{\text{ш}(H)}}}{1 + \frac{l_{\text{ш}(B)}}{l_{\text{ш}(H)}}}; \quad \Delta d_{\text{ш}(B)} = \left(d_{\text{ш}} \frac{1}{\eta_{\text{ш}}} - d_{\text{ш}}\right) - \Delta d_{\text{ш}(H)}. \quad (11)$$

в) универсальные четырехвалковые калибры

Формоизменение металла в универсальных четырехвалковых калибрах (рисунк 6) рассчитывается в следующем порядке:

- коэффициенты обжатия шейки со стороны верхнего и нижнего валков определяют по формулам:

$$\Delta d_{\text{ш}(H)} = \frac{\left(d_{\text{ш}} \frac{1}{\eta_{\text{ш}}} - d_{\text{ш}}\right) \frac{l_{\text{ш}(B)}}{l_{\text{ш}(H)}}}{1 + \frac{l_{\text{ш}(B)}}{l_{\text{ш}(H)}}}; \quad \Delta d_{\text{ш}(B)} = \left(d_{\text{ш}} \frac{1}{\eta_{\text{ш}}} - d_{\text{ш}}\right) - \Delta d_{\text{ш}(H)}, \quad (12)$$

- определяем величину бокового обжатия головки и подошвы по формулам:

$$\Delta t_{n(B)} = \frac{\frac{d'_{\text{ш}(B)}}{d_{\text{ш}(B)}} \left[0,5(a_{n(B)} + b_{n(B)})(h_{n(B)} - d_{\text{ш}(B)}) + b_{n(B)} \cdot d_{\text{ш}(B)} \right]}{h_{n(B)}} - \frac{\left[b_{n(B)}(h_{n(B)} - d'_{\text{ш}(B)}) - \frac{(h_{n(B)} - d_{\text{ш}(B)})(h_{n(B)} - d'_{\text{ш}(B)}) \operatorname{tg} \varphi_{n(B)}}{2} + b_{n(B)} \cdot d'_{\text{ш}(B)} \right]}{h_{n(B)}}. \quad (13)$$

$$\Delta t_{n(H)} = \frac{\frac{d'_{\text{ш}(H)}}{d_{\text{ш}(H)}} \left[0,5(a_{n(H)} + b_{n(H)})(h_{n(H)} - d_{\text{ш}(H)}) + b_{n(H)} \cdot d_{\text{ш}(H)} \right]}{h_{n(H)}} - \frac{\left[b_{n(H)}(h_{n(H)} - d'_{\text{ш}(H)}) - \frac{(h_{n(H)} - d_{\text{ш}(H)})(h_{n(H)} - d'_{\text{ш}(H)}) \operatorname{tg} \varphi_{n(H)}}{2} + b_{n(H)} \cdot d'_{\text{ш}(H)} \right]}{h_{n(H)}}. \quad (14)$$

$$\Delta t_{\Gamma(B)} = \frac{\frac{d'_{\text{ш}(B)}}{d_{\text{ш}(B)}} \left[0,5(a_{\Gamma(B)} + b_{\Gamma(B)})(h_{\Gamma(B)} - d_{\text{ш}(B)}) + b_{\Gamma(B)} \cdot d_{\text{ш}(B)} \right]}{h_{\Gamma(B)}} - \frac{\left[b_{\Gamma(B)}(h_{\Gamma(B)} - d'_{\text{ш}(B)}) - \frac{(h_{\Gamma(B)} - d_{\text{ш}(B)})(h_{\Gamma(B)} - d'_{\text{ш}(B)}) \operatorname{tg} \varphi_{\Gamma(B)}}{2} + b_{\Gamma(B)} \cdot d'_{\text{ш}(B)} \right]}{h_{\Gamma(B)}}. \quad (15)$$

$$\Delta t_{\Gamma(H)} = \frac{\frac{d'_{\text{ш}(H)}}{d_{\text{ш}(H)}} \left[0,5(a_{\Gamma(H)} + b_{\Gamma(H)})(h_{\Gamma(H)} - d_{\text{ш}(H)}) + b_{\Gamma(H)} \cdot d_{\text{ш}(H)} \right]}{h_{\Gamma(H)}} - \frac{\left[b_{\Gamma(H)}(h_{\Gamma(H)} - d'_{\text{ш}(H)}) - \frac{(h_{\Gamma(H)} - d_{\text{ш}(H)})(h_{\Gamma(H)} - d'_{\text{ш}(H)}) \operatorname{tg} \varphi_{\Gamma(H)}}{2} + b_{\Gamma(H)} \cdot d'_{\text{ш}(H)} \right]}{h_{\Gamma(H)}}. \quad (16)$$

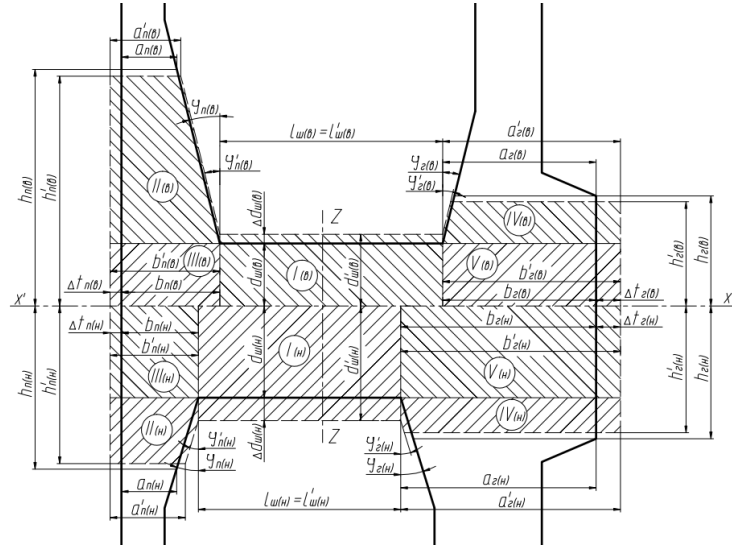


Рисунок 6 – Схема деформирования асимметричного рельсового профиля в четырехвалковом универсальном калибре

При различных расчетных значениях деформации фланцев профиля, производимой вертикальными валками в верхней и нижней частях универсального калибра, фактическое обжатие выбирается в пределах между расчетным обжатием фланца с наибольшей площадью в соответствующем элементе профиля и средним значением расчетных обжатий фланцев этого элемента по формулам:

$$\Delta t_{п(Smax)} > \Delta t_{п(факт.)} > \frac{\Delta t_{п(в)} + \Delta t_{п(н)}}{2}, \quad (17)$$

$$\Delta t_{г(Smax)} > \Delta t_{г(факт.)} > \frac{\Delta t_{г(в)} + \Delta t_{г(н)}}{2}, \quad (18)$$

где $\Delta t_{г(Smax)}$ – расчетное обжатие фланца с большей площадью; $\Delta t_{г(факт.)}$ – выбираемое фактическое обжатие фланцев; $\Delta t_{г(в)}$, $\Delta t_{г(н)}$ – расчетное обжатие фланца в верхней и нижней части калибра.

Определяем толщины фланцев головки и подошвы для каждой части универсального калибра по формулам:

$$a'_{п(в)} = a_{п(в)} + \Delta t_{п(факт.)}; \quad a'_{п(н)} = a_{п(н)} + \Delta t_{п(факт.)}, \quad (19)$$

$$a'_{г(в)} = a_{г(в)} + \Delta t_{г(факт.)}; \quad a'_{г(н)} = a_{г(н)} + \Delta t_{г(факт.)}, \quad (20)$$

$$b'_{п(в)} = b_{п(в)} + \Delta t_{п(факт.)}; \quad b'_{п(н)} = b_{п(н)} + \Delta t_{п(факт.)}, \quad (21)$$

$$b'_{г(в)} = b_{г(в)} + \Delta t_{г(факт.)}; \quad b'_{г(н)} = b_{г(н)} + \Delta t_{г(факт.)}, \quad (22)$$

где $a'_{п(в)}$, $a'_{п(н)}$ – толщина подошвы верхнего и нижнего фланца у вершины задаваемого раската; $b'_{п(в)}$, $b'_{п(н)}$ – толщина подошвы верхнего и нижнего фланца у основания задаваемого раската; $b'_{г(в)}$, $b'_{г(н)}$ – толщина головки верхнего и нижнего фланца у основания задаваемого раската.

Рассчитываем коэффициенты бокового обжатия фланцев подошвы и головки по основанию и вершине в каждой части универсального калибра по формулам:

$$\frac{1}{\eta_{bп(в)}} = \frac{b'_{п(в)}}{b_{п(в)}}, \quad \frac{1}{\eta_{bп(н)}} = \frac{b'_{п(н)}}{b_{п(н)}}, \quad (23)$$

$$\frac{1}{\eta_{bг(в)}} = \frac{b'_{г(в)}}{b_{г(в)}}, \quad \frac{1}{\eta_{bг(н)}} = \frac{b'_{г(н)}}{b_{г(н)}}, \quad (24)$$

$$\frac{1}{\eta_{aп(в)}} = \frac{a'_{п(в)}}{a_{п(в)}}, \quad \frac{1}{\eta_{aп(н)}} = \frac{a'_{п(н)}}{a_{п(н)}}, \quad (25)$$

$$\frac{1}{\eta_{aг(в)}} = \frac{a'_{г(в)}}{a_{г(в)}}, \quad \frac{1}{\eta_{aг(н)}} = \frac{a'_{г(н)}}{a_{г(н)}}. \quad (26)$$

Рассмотренная выше методика проектирования калибров, основанная на использовании геометрической модели прокатки асимметричных рельсовых профилей в универсальных четырех, трехвалковых калибрах и двухвалковых (вспомогательных) калибрах в непрерывно-реверсивной группе клетей для прокатки асимметричных рельсовых профилей, предложена впервые и позволяет обеспечить равенство коэффициентов вытяжки в нижней и верхней частях калибра, относительно горизонтальной оси, разделяющей шейку калибра на одинаковые площади.

Получены отсутствующие в литературе формулы для определения величины обжатия головки и подошвы профиля в асимметричных универсальных и двухвалковых калибров в непрерывно-реверсивной группе клетей при равных коэффициентах вытяжки верхней и нижней частей шеек относительно горизонтальной оси.

Для практического использования методика проектирования калибров непрерывно-реверсивной группы обобщена в алгоритм, удобный при машинных расчетах.

В четвертой главе приведено внедрение результатов диссертационной работы.

Основные положения диссертационной работы были использованы при разработке технологии прокатки остряковых рельсов типа ОР65, усовиковых рельсов типа УР65 и заготовки трамвайных рельсов Т62 в части разработки калибровок и режимов прокатки этих профилей на универсальном рельсобалочном стане филиал «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ».

Исследования, описанные во второй главе, позволили выявить резервы повышения эффективности прокатки асимметричного рельсового профиля типа ОР65 в черновых клетях. На основании проведенных исследований разработана новая схема прокатки, приведенная на рисунке 7.

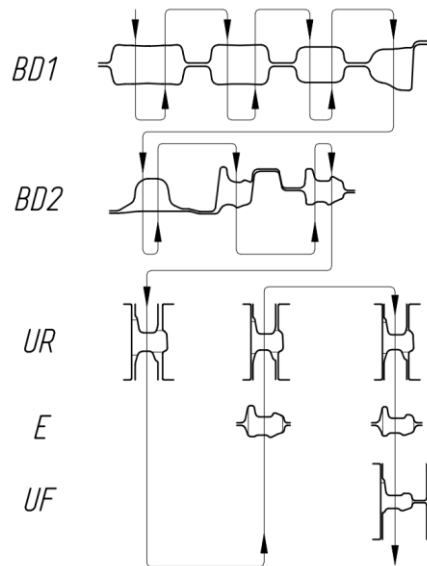


Рисунок 7 – Усовершенствованная схема получения рельсов типа ОР65 на универсальном рельсобалочном стане филиал «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ»

Согласно приведенной схеме увеличены обжатия в клетях BD1 и сокращены два пропуска в клетях BD2. Уменьшение количества пропусков в клетях BD2 вызвало необходимость нестандартного решения, заключающегося в переносе лежащей трапеции на клетку BD1. Новизна такого решения при производстве асимметричных рельсовых профилей защищена патентом РФ 2721968.

Возможность использования новой схемы прокатки асимметричного рельса типа ОР65 в условиях универсального рельсобалочного стана филиала «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ» проверялась экспериментально и при моделировании разработанных режимов прокатки с использованием пакета программ QForm. Результаты проверки новой схемы прокатки приведены на рисунке 8 и доказывают ее состоятельность.

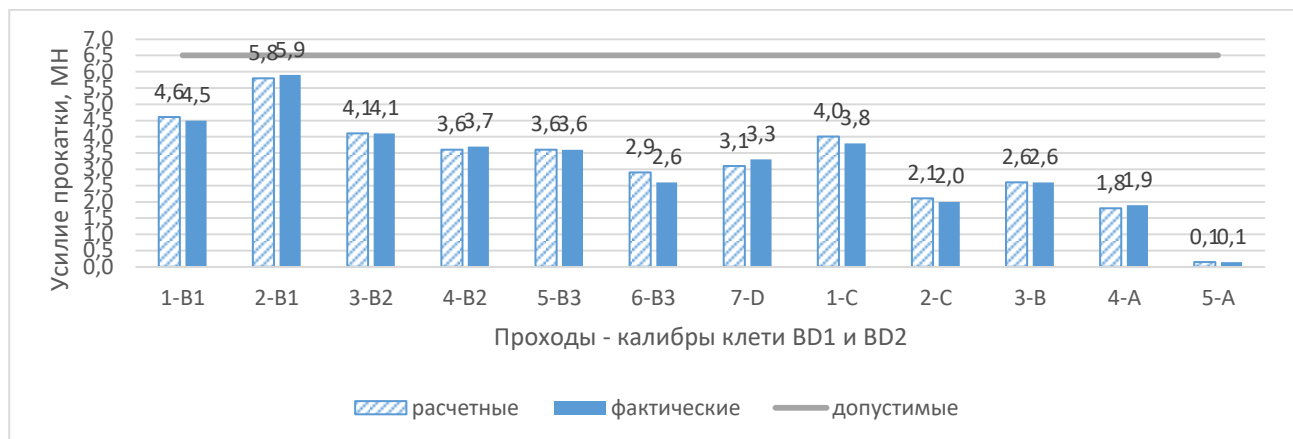


Рисунок 8 – Фактические и расчетные значения усилия прокатки в клетях BD1 и BD2 по усовершенствованной схеме

Сокращение числа пропусков в черновых клетях при прокатке рельсов типа ОР65 с 14 до 12 и использование усовершенствованной формы калибров позволило уменьшить время прокатки в черновых клетях на 13,2 сек., что обусловило повышение производительности стана на 39,8 т/ч и дало экономический эффект, подтвержденный соответствующим актом, 10,8 млн. руб. в год (при доле участия автора 5,4 млн. руб.).

Пользуясь разработанной методикой проектирования калибровок асимметричных рельсовых профилей и полученными зависимостями для расчета размеров разных частей калибров спроектированы новые калибровки для прокатки асимметричных рельсов типа ОР65, УР65, ЗТ62 в условиях универсального рельсобалочного стана филиала «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ». Разработанные калибровки обеспечили четкое формирование сложной поверхности катания головки профиля усовиковых рельсов типа УР65 и заготовки трамвайных рельсов Т62. Разработанный способ прокатки рельсов защищен патентом РФ 2627140. Использование новых калибровок асимметричных рельсовых профилей и нового способа прокатки в условиях универсального рельсобалочного стана филиала «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ» дало экономический эффект, подтвержденный соответствующим актом, 31,6 млн. руб. в год (при доле участия автора 15,8 млн. руб.) за счет снижения отбраковки и увеличения стойкости валков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании экспериментальных исследований и компьютерного моделирования энергосиловых параметров прокатки установлена возможность интенсификации процесса прокатки в черновых реверсивных клетях универсального рельсобалочного стана филиала «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ».

2. Впервые предложена геометрическая модель прокатки асимметричных рельсовых профилей в универсальных четырех- и трехвалковых калибрах, позволяющая обеспечить равенство коэффициентов вытяжки в нижней и верхней частях калибра, разделенного горизонтальной осью. Получены отсутствующие в литературе зависимости для определения величины обжатия головки и подошвы профиля в асимметричных универсальных и двухвалковых калибрах в непрерывно-реверсивной группе клеток при равных коэффициентах вытяжки верхней и нижней частей шеек относительно горизонтальной оси.

3. Разработана методика проектирования универсальных четырехвалковых, универсальных трехвалковых и двухвалковых (вспомогательных) калибров, ис-

пользуемых в непрерывно-реверсивной группе клетей для прокатки асимметричных рельсовых профилей на универсальном рельсобалочном стане.

4. На основании комплексных исследований энергосиловых параметров процесса прокатки в черновых клетях применительно к условиям универсального рельсобалочного стана филиала «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ» разработан новый способ прокатки (патент №2421968) остряковых рельсов в двухвалковых черновых калибрах, отличающийся от известных способов тем, что позволяет осуществлять подачу скантованного раската из трапецевидного ребрового калибра в рельсовый разрезной калибр без дополнительной раскантовки кантующим оборудованием. Это позволило разработать усовершенствованную схему и режим прокатки, обеспечивающий уменьшение цикла прокатки в черновых клетях на 13,2 сек. и получение экономического эффекта 10,8 млн. руб. в год при долевом участии автора 5,4 млн. руб. (подтверждено Актом об использовании в производстве результатов диссертации).

5. На базе разработанных методик проектирования универсальных калибров непрерывно-реверсивной группы клетей универсального рельсобалочного стана, с использованием нового способа прокатки рельсовых профилей (патент №2627140) разработаны и внедрены новые калибровки и режимы формоизменения для прокатки асимметричных рельсов типа ОР65, УР65 и заготовки Т62, что позволило снизить объем отбраковки на 1,5%, увеличить производительность рельсобалочного стана, экономический эффект составил 31,6 млн. руб. в год при долевом участии автора 15,8 млн. руб. (подтверждено Актом об использовании в производстве результатов диссертации).

6. Результаты исследований, полученных в рамках диссертационной работы, внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» и используются при подготовке бакалавров по направлению 22.03.02 Металлургия, что подтверждено соответствующей Справкой.

Список публикаций по теме диссертационной работы

Патенты

1. Патент РФ 2721968, МПК В 21 В 1/08. Способ прокатки несимметричных рельсовых профилей в черновых калибрах / В.В. Дорофеев, А.В. Головатенко, **А.В. Добрянский** и др. // Заявитель и патентообладатель АО «ЕВРАЗ ЗСМК». – №2019131625; заявл. 07.10.2019; опубл. 25.05.2020; Бюл. №15.

2. Патент РФ 2627140, МПК В 21 В 1/08. Способ прокатки рельсов / Г.Н. Юнин, А.В. Головатенко, **А.В. Добрянский** и др. // Заявитель и патентообладатель АО «ЕВРАЗ ЗСМК». – №2016139929; заявл. 10.10.2016; опубл. 03.08.2017; Бюл. №22.

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК

3. **Добрянский А.В.** Разработка энергоэффективных режимов прокатки асимметричных острьяковых рельсов на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК» / **А.В. Добрянский**, В.В. Дорофеев, Д.Э. Первушин, И.И. Чумачков, А.Р., Фастыковский // Сталь. – 2025. – № 10. – С. 19–30.

4. Дорофеев В.В. Разработка технологии прокатки рельсов трамвайных желобчатых с увеличенным сроком службы в условиях универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК» / В.В. Дорофеев, **А.В. Добрянский**, Д.Э. Первушин, Е.В. Полевой, С.Н. Зуева, Л.В. Гладков // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2023. – № 4 – С. 19–31.

5. Фастыковский А.Р. Силовые условия прокатки в универсальных калибрах современных рельсобалочных станов / А.Р. Фастыковский, **А.В. Добрянский**, В.В. Дорофеев // Известия вузов. Черная металлургия. – 2022. – Т. 65. – № 8. – С. 590–595.

6. **Добрянский А.В.** Способ прокатки асимметричных рельсовых профилей в черновых калибрах на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК» / **А.В. Добрянский**, А.В. Головатенко, В.В. Дорофеев, А.Р. Фастыковский // Черные металлы. – 2020. – № 5. – С. 9–14.

7. Сметанин С.В. Разработка прогрессивных калибровок острьяковых и усоковых рельсов на универсальном рельсобалочном стане / С.В. Сметанин, А.Б. Юрьев, В.В. Дорофеев, В.Н. Перетяtko, **А.В. Добрянский** // Металлург. – 2019. – № 6. – С. 35–39.

8. Уманский А.А. Совершенствование режимов прокатки рельсовых профилей специального назначения при их производстве на универсальном рельсобалочном стане / А.А. Уманский, В.В. Дорофеев, А.В. Головатенко, **А.В. Добрянский** // Черные металлы. – 2018. – № 10. – С. 38–43.

9. Дорофеев В.В. Анализ и разработка калибровки прокатных валков для производства асимметричных рельсовых профилей в условиях универсального рельсобалочного стана / В.В. Дорофеев, А.А. Уманский, А.В. Головатенко, В.Н.

Кадыков, **А.В. Добрянский** // Известия вузов. Черная металлургия. – 2017. – № 12. – С. 941–946.

10. Головатенко А.В. Анализ экспериментальной зависимости сопротивления деформации рельсовой стали Э78ХСФ от температуры, скорости и степени деформации / А.В. Головатенко, В.В. Дорофеев, В.А. Трусов, К.В. Волков, **А.В. Добрянский** // Металлург. – 2014. – № 6. – С. 118–123.

Научные статьи, опубликованные в периодических изданиях и трудах научно-практических конференциях:

11. **Добрянский А.В.** Разработка методики расчета формоизменения металла в универсальных четырехвалковых калибрах при прокатке асимметричных рельсовых профилей / **А.В. Добрянский**, В.В. Дорофеев, А.В. Головатенко, А.Р. Фастыковский и др. // Актуальные научные исследования: сборник статей XXXII Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2026. – С. 99–110.

12. **Добрянский А.В.** К вопросу об оптимизации профиля остряковых рельсов / **А.В. Добрянский**, Е.В. Полевой, В.В. Дорофеев и др. // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: Сб. научных докладов по материалам 139-го заседания НП «Рельсовая комиссия» (26-29 сентября 2023 г., г. Тула). – Новосибирск, 2024. – С. 100–105.

13. Головатенко А.В. Развитие технологии прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на современном универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК» / А.В. Головатенко, Г.Н. Юнин, **А.В. Добрянский** и др. // Труды XIII Конгресса прокатчиков (том I) 25-27 октября 2022 г., г. Москва: 2022, С. 96–102.

14. Фастыковский А.Р. Особенности силового баланса универсальных калибров современных рельсобалочных станов / А.Р. Фастыковский, **А.В. Добрянский**, В.В. Дорофеев // Металлургия: Технологии, инновации, качество «Металлургия-2021», труды XXII Международной научно-практической конференции (10-11 ноября 2021 г.). Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2021, С. 299–304.

15. Дорофеев В.В. Разработка прогрессивных калибровок асимметричных рельсовых профилей на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК» / В.В. Дорофеев, **А.В. Добрянский**, А.Р. Фастыковский // XXI Международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации, каче-

ство» «Металлургия-2019», 23-24 октября 2019 г. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2019. С. 202–208.

16. Дорофеев В.В. Стадии развития процесса прокатки рельсов с использованием реверсивных универсальных клетей в его исторической последовательности [Текст] / В.В. Дорофеев, Г.Н. Юнин, **А.В. Добрянский** и др. // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: Сб. научных докладов по материалам 133-го заседания НП «Рельсовая комиссия» (4-6 октября 2017 г., г. Актобе). – Екатеринбург, 2018. – С. 118–134.

17. Юнин Г.Н. Опыт разработки калибровки и создания технологии прокатки на современном рельсопрокатном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК» сложных асимметричных профилей типа рельсов остряковых / Г.Н. Юнин, А.В. Головатенко, **А.В. Добрянский** и др. // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: Сб. научных докладов по материалам 132-го заседания НП «Рельсовая комиссия» (7-9 сентября 2016 г., г. Иркутск). – Екатеринбург, 2017. – С. 142–156.

Подписано в печать 23.09.2026 г.

Формат бумаги 60×90 1/16. Бумага писчая. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 8,04. Уч.-изд. л. 8,56. Тираж 110 экз. Заказ 161.

Сибирский государственный индустриальный университет
654007, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк,
ул. Кирова, зд. 42, Издательский центр СибГИУ