

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

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

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

Фастыковский Андрей Ростиславович

доктор технических наук, доцент

Новокузнецк – 2026

Оглавление

Введение.....	4
1 Аналитический обзор.....	12
1.1 Методы расчета калибровок рельсовых профилей.....	12
1.2 Рельсы железнодорожные остряковые.....	22
1.2.1 Технология прокатки асимметричных профилей типа рельсов остряковых в двухвалковых калибрах.....	23
1.3 Рельсы усовиковые типа УР65.....	25
1.4 Заготовка трамвайного рельса Т62.....	27
1.5 Современное состояние производства рельсовых профилей.....	28
1.6 Выводы и постановка задач исследования.....	34
2 Обоснование направлений повышения эффективности калибровки асимметричных рельсовых профилей при прокатке в черновых клетях на универсальном рельсобалочном стане филиал «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ».....	36
2.1 Методика моделирования процесса прокатки остряковых рельсов типа ОР65 в программном комплексе «QForm».....	36
2.2 Исследование режимов прокатки асимметричных рельсов типа ОР65 на универсальном рельсобалочном стане филиал «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ».....	39
2.3 Выводы.....	45
3 Определение формоизменения металла в калибрах для прокатки асимметричных рельсовых профилей в непрерывно-реверсивной группе клетей на универсальном рельсобалочном стане.....	47
3.1 Особенности проектирования калибровки валков для прокатки асимметричных рельсовых профилей в непрерывно-реверсивной группе клетей на универсальном рельсобалочном стане.....	47
3.2 Определение формоизменения металла в универсальных четырехвалковых калибрах для прокатки асимметричных рельсовых профилей.....	49
3.3 Определение формоизменения металла в чистовом трехвалковом универсальном калибре при прокатке асимметричных рельсовых профилей.....	62

3.4 Определение формоизменения металла в двухвалковых (вспомогательных) калибрах эджерной клетки при прокатке асимметричных рельсовых профилей.....	71
3.5 Алгоритм проектирования калибровок валков асимметричных рельсовых профилей в непрерывно-реверсивной группе клеток.....	75
3.6 Выводы.....	79
4 Внедрение результатов диссертационной работы.....	80
4.1 Внедрение рациональных способов прокатки асимметричных рельсовых профилей на универсальном рельсобалочном стане филиал «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ».....	80
4.2 Совершенствование калибровки валков и режима прокатки остряковых рельсов типа ОР65 на универсальном рельсобалочном стане.....	81
4.3 Особенности проектирования и расчета трапециевидных калибров с учетом разработанного способа прокатки асимметричных рельсовых профилей для прокатки остряковых рельсов типа ОР65.....	86
4.3.1 Проектирование и расчет трапециевидного ребрового калибра.....	86
4.3.2 Проектирование и расчет трапециевидного осевого калибра.....	89
4.4 Проектирование и внедрение калибровки валков, режимов прокатки асимметричных рельсовых профилей – усовиковых рельсов типа УР65 и заготовки трамвайных рельсов Т62.....	102
4.5 Выводы.....	108
Заключение.....	110
Список литературы.....	112
Приложение 1.....	129
Приложение 2.....	132
Приложение 3.....	135

Введение

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 трудно-

сти 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 технологий 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, предопределяющей 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 клетей, 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 клетей 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 остяковых 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 долевым 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 долевым участии 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 натурных 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 острых 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 острых рельсов, 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 матери-

альных 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 комиссии (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 про-

изводства, 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.

1 Аналитический обзор

1.1 Методы расчета калибровок рельсовых профилей

Несмотря на большое разнообразие типов рельсовых профилей [3–5] применяемых в промышленности, методы проектирование калибровок для них имеют много общего и заключаются в принятии общих и частных коэффициентов деформации по элементам профиля с последующим нахождением по этим коэффициентам размеров профилей по пропускам и построению калибров [6].

Расчету калибровок валков для прокатки железнодорожных рельсов, профиль которых несимметричен относительно только одной вертикальной оси, посвящены 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. Меркина, Б.Б. Диомидова, Н.В. Литовченко, В.А. Шилова, В.В. Дорофеева, Д.Л. Шварца и других ученых [3, 7–12].

Наиболее полным и научно обоснованным является метод Б.П. Бахтинова и М.М. Штернова, который разработан с учетом общности профиля рельса и двутавровой балки. Как и при прокатке балок, в основу метода положено равенство коэффициентов деформации шейки, открытого и закрытого фланцев профиля. Для расчета приращения и утяжки фланцев головки и подошвы, а также для определения уширения профиля применяют те же формулы, что и при прокатке балок [8].

Общий коэффициент деформации металла в рельсовых калибрах рекомендуется принимать для фланцев головки и подошвы одинаковым в пределах $1,9 \div 2,4$ для всех типов рельсов, а для шейки – увеличивать эти значения в $1,5 \div 2,5$ раза при прокатке рельсов широкой колеи или сохранять такими же как для фланцев в случае прокатки узкоколейных рельсов. После распределения принятых общих коэффициентов деформации по проходам, производят расчет размеров рас-

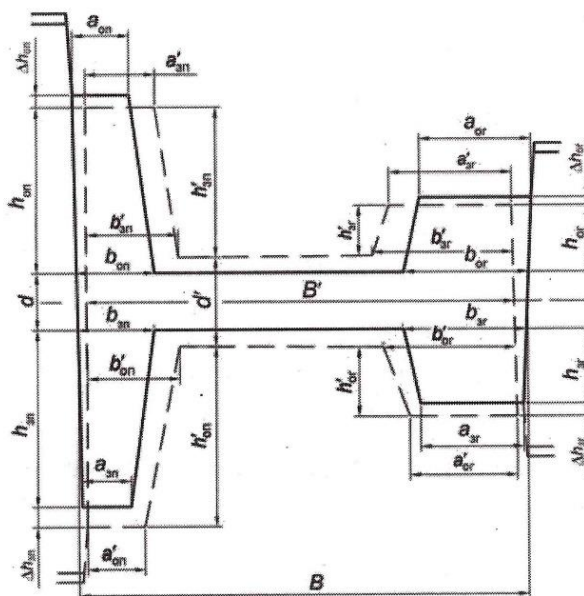
катов и калибров в каждом проходе, идя против направления прокатки от чистового калибра к разрезному.

Ребровые калибры рассчитывают с использованием эмпирических положений и правил.

Б.Б. Диомидовым и Н.В. Литовченко предложен метод расчета рельсовых калибров по коэффициентам деформации. Для этого авторами на основе обобщения действующих калибровок валков были построены графики изменения по проходам коэффициентов обжатия стенки и фланцев (у основания и вершины), а также абсолютных значений утяжки закрытых и приращения открытых фланцев головки и подошвы. Определив указанные величины по этим графикам, рассчитывают размеры всех элементов профиля в каждом калибре, идя против направления прокатки [13].

Методика расчета рельсовых калибров по коэффициентам деформации элементов профиля

Для расчета рельсовых калибров принимаются следующие обозначения исходя из схемы прокатки в рельсовом закрытом калибре (Рисунок 1.1).



(пунктирными линиями показаны контуры задаваемого профиля)

Рисунок 1.1 – Схема прокатки в закрытом рельсовом калибре

$\eta_{ш} = \frac{d'}{d}$ – коэффициент высотной деформации шейки;

$\eta_{\text{о.п.}}^a = \frac{a'_{\text{з.п.}}}{a_{\text{о.п.}}}$ – коэффициент бокового обжатия открытого фланца подошвы у края;

$\eta_{\text{о.п.}}^b = \frac{b'_{\text{з.п.}}}{b_{\text{о.п.}}}$ – коэффициент бокового обжатия открытого фланца подошвы у основания;

$\eta_{\text{з.п.}}^b = \frac{b'_{\text{о.п.}}}{b_{\text{з.п.}}}$ – коэффициент бокового обжатия закрытого фланца подошвы у основания;

$\eta_{\text{з.п.}}^a = \frac{a'_{\text{о.п.}}}{a_{\text{з.п.}}}$ – коэффициент бокового обжатия закрытого фланца подошвы у края;

$\eta_{\text{о.г.}}^a = \frac{a'_{\text{з.г.}}}{a_{\text{о.г.}}}$ – коэффициент бокового обжатия открытого фланца головки у края;

$\eta_{\text{о.г.}}^b = \frac{b'_{\text{з.г.}}}{b_{\text{о.г.}}}$ – коэффициент бокового обжатия открытого фланца головки у основания;

$\eta_{\text{з.г.}}^a = \frac{a'_{\text{о.г.}}}{a_{\text{з.г.}}}$ – коэффициент бокового обжатия закрытого фланца головки у края;

$\eta_{\text{з.г.}}^b = \frac{b'_{\text{о.г.}}}{b_{\text{з.г.}}}$ – коэффициент бокового обжатия закрытого фланца головки у основания;

$\Delta h_{\text{з.п.}} = h'_{\text{о.п.}} - h_{\text{з.п.}}$ – утяжка закрытого фланца подошвы;

$-\Delta h_{\text{о.п.}} = h'_{\text{з.п.}} - h_{\text{о.п.}}$ – приращение открытого фланца подошвы по высоте;

$\Delta h_{\text{з.г.}} = h'_{\text{о.г.}} - h_{\text{з.г.}}$ – утяжка (обжатие) закрытого фланца головки;

$-\Delta h_{\text{о.г.}} = h'_{\text{з.г.}} - h_{\text{о.г.}}$ – приращение открытого фланца головки по высоте.

Величины коэффициентов деформации фланцев, утяжку и приращение рекомендуется принимать по соответствующим таблицам для двутавровых балок.

Расчет рельсовых калибров по коэффициентам деформации сводится к следующему:

1. Устанавливают среднее значение коэффициента высотной деформации шейки $\eta_{\text{ш.ср.}} = \frac{a'}{a}$, которое изменяется в пределах $1,25 \div 1,32$, причем меньшие значения относятся к рельсам тяжелого типа, а большие – к рельсам легкого типа.

2. По величине $\eta_{\text{ш.ср.}}$ принимают ряд коэффициентов, увеличивающихся от чистового к разрезному калибру. Например, в чистовом калибре $\eta'_{\text{ш.}} = 1,1$, в разрезном калибре он увеличивается до $\eta_{\text{ш.}} = 1,5$.

3. Для определения размеров подошвы устанавливают коэффициенты бокового обжатия так, чтобы в открытом фланце эти коэффициенты были несколько больше, чем в закрытом: $\eta_0^a > \eta_0^b > \eta_3^b > \eta_3^a$.

У основания открытого фланца подошвы коэффициент деформации принимают меньше, чем у конца, т.е. $\eta_0^b < \eta_0^a$, а в закрытых фланцах, наоборот $\eta_3^b > \eta_3^a$. Для выбора коэффициентов деформации имеются соответствующие графики.

4. Для установления коэффициентов обжатия головки имеется график, причем $\eta_{0.г.}^b > \eta_{0.г.}^a > \eta_{3.г.}^b > \eta_{3.г.}^a$, т.е. в открытой части головки коэффициенты деформации больше, чем в закрытой части, кроме того, у основания коэффициент деформации больше, чем у конца.

5. Уширение в чистовом калибре принимают в пределах $1,5 \div 3,0$ мм.

По графикам определяют коэффициенты деформации, а затем рассчитывают размеры элементов рельсового калибра – шейка, подошвы и головки.

Рассмотренные методы не позволяют рассчитывать формоизменение металла при прокатке в универсальных рельсовых калибрах. В этом случае они могут быть применены для проектирования черновых двухвалковых калибров на промежуточных стадиях. Для расчета калибровок валков универсальных клетей были разработаны новые методы [6].

Способ прокатки рельсов с применением универсальных калибров

При прокатке в универсальном четырехвалковом калибре шейка рельса подвергается обжатию приводными горизонтальными валками, а головка и подошва получают за счет прямого обжатия между неприводными вертикальными валками и боковыми гранями горизонтальных валков. При определенной настройке валков обеспечивается одновременная равномерная деформация (одинаковая вытяжка) всех элементов профиля, что исключает образование дефектов рельса и возникновение растягивающих напряжений [6, 67–71, 81, 82].

Не приводные вертикальные валки приводятся во вращение за счет сил трения от прокатываемой полосы, следовательно, их окружная скорость примерно равна скорости прокатки рельсов. Этот факт означает уменьшение скольжения металла относительно валков, по сравнению с прокаткой в диагональных и закры-

тых рельсовых калибрах. Как следствие улучшается качество поверхности, снижается износ валков и достигается снижение расхода электроэнергии на прокатку.

При прокатке в каждом проходе в универсальных калибрах головка рельса обрабатывается под прямым давлением по всей поверхности катания, получая в результате всех проходов достаточно большое обжатие. Благодаря этому получается достаточно хорошая проработка металла и формируется мелкозернистая структура, что обеспечивает повышение механических свойств и увеличение износостойкости рельсов.

В процессе прокатки в универсальных рельсовых калибрах фланцы подошвы и головки профиля получают приращение. Поэтому с целью получения требуемой ширины головки и подошвы рельса осуществляют контроль высоты фланцев путем обжатия их в открытых горизонтальных калибрах вспомогательных клеток дуо без обжатия шейки. Обычно универсальная и вспомогательная клеть устанавливаются рядом и работают в непрерывном режиме, так что за один проход производится обжатие шейки и фланцев профиля по толщине и одновременный контроль высоты фланцев (Рисунок 1.2). Однако, если контроль высоты фланцев не требуется в некоторых проходах, то валки вспомогательной клетки могут разводиться нажимными устройствами или вся клеть может сдвигаться с линии прокатки при помощи специального механизма.

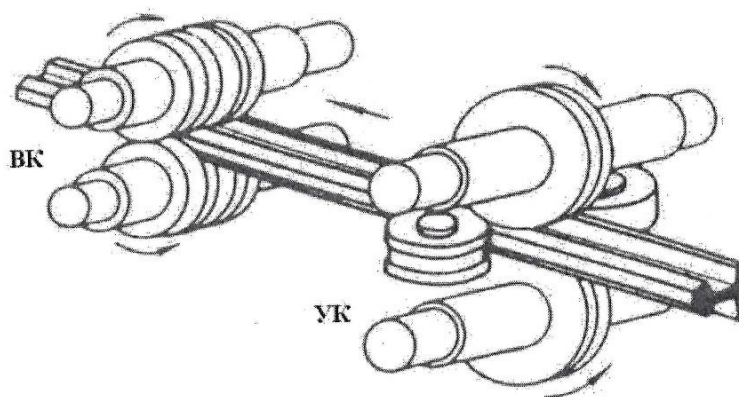


Рисунок 1.2 – Схема одновременной обработки профиля рельса в универсальной (УК) и вспомогательной (ВК) клетях

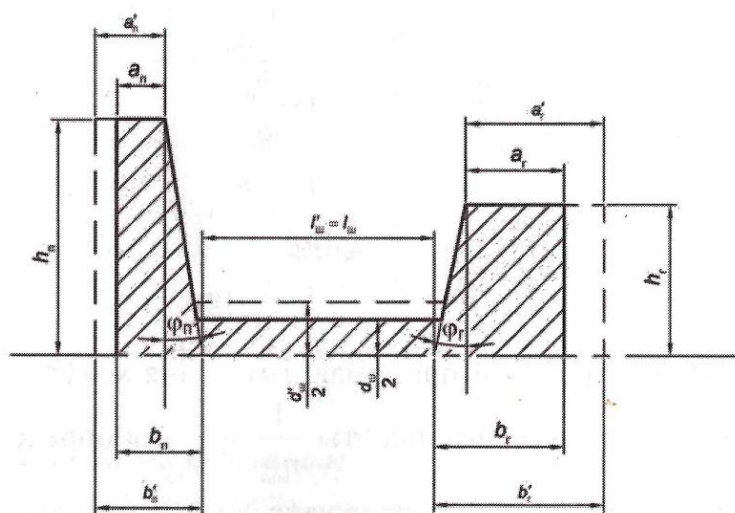
Благодаря указанным преимуществам начиная со второй половины прошлого века способ прокатки рельсов в универсальных калибрах получил сильное раз-

витие за рубежом и является основным направлением совершенствования технологии производства рельсов в настоящее время [14–34].

Расчет формоизменения металла при прокатке в универсальных рельсовых калибрах

В основу метода расчета формоизменения в универсальных рельсовых калибрах было принято условие равенства коэффициентов вытяжки шейки, головки и подошвы, что обеспечивает равномерную деформацию металла по всем элементам профиля. Это условие достигается при определенных соотношениях коэффициентов обжатия шейки и фланцев, которые получили при следующих допущениях (Рисунок 1.3):

- приращение фланцев подошвы и головки достаточно мало по сравнению с их высотой, и им можно пренебречь, следовательно $h'_п = h_п$ и $h'_г = h_г$;
- длина шейки между внутренними гранями фланцев не изменяется в процессе прокатки, т.е. $l'_{ш} = l_{ш}$;
- уклоны внутренних граней фланцев (боковых граней горизонтального вала) не изменяются в процессе прокатки, т.е. $tg\varphi_п = const$ и $tg\varphi_г = const$.



(пунктирными линиями показан контур задаваемого профиля)

Рисунок 1.3 – Схема к определению соотношения коэффициентов обжатия шейки и фланцев при прокатке в универсальном рельсовом калибре

С учетом принятых допущений площади фланцев подошвы прокатанного и задаваемого раската составляют:

$$\omega_{\Pi} = (2a_{\Pi} + h_{\Pi} \operatorname{tg} \varphi_{\Pi}) h_{\Pi} \quad (1.1)$$

$$\omega'_{\Pi} = (2a_{\Pi} + h_{\Pi} \operatorname{tg} \varphi_{\Pi}) h_{\Pi} + (a'_{\Pi} - a_{\Pi}) 2h_{\Pi} \quad (1.2)$$

Следовательно, коэффициент вытяжки подошвы:

$$\lambda_{\Pi} = \frac{\omega'_{\Pi}}{\omega_{\Pi}} = 1 + 2 \frac{\frac{1}{\eta_{\Pi a}} - 1}{2 + \frac{h_{\Pi}}{a_{\Pi}} \operatorname{tg} \varphi_{\Pi}}, \quad (1.3)$$

где $\frac{1}{\eta_{\Pi a}} = \frac{a'_{\Pi}}{a_{\Pi}}$ – коэффициент обжатия фланцев подошвы у вершины.

Коэффициент вытяжки шейки при $l'_{\text{ш}} = l_{\text{ш}}$ равен коэффициенту ее обжатия, т.е. $\lambda_{\text{ш}} = \frac{1}{\eta_{\text{ш}}} = \frac{d'_{\text{ш}}}{d_{\text{ш}}}$.

Приравнивая полученные выражения $\lambda_{\Pi} = \lambda_{\text{ш}}$, после несложных преобразований получают:

$$\frac{1}{\eta_{\Pi a}} = \frac{a'_{\Pi}}{a_{\Pi}} = 1 + 0,5 \left(\frac{1}{\eta_{\text{ш}}} - 1 \right) \left(2 + \frac{h_{\Pi}}{a_{\Pi}} \operatorname{tg} \varphi_{\Pi} \right) \quad (1.4)$$

Аналогичным образом получили формулу, выражающую соотношение коэффициентов обжатия головки $\frac{1}{\eta_{\Gamma a}} = \frac{a'_{\Gamma}}{a_{\Gamma}}$ и шейки:

$$\frac{1}{\eta_{\Gamma a}} = \frac{a'_{\Gamma}}{a_{\Gamma}} = 1 + 0,5 \left(\frac{1}{\eta_{\text{ш}}} - 1 \right) \left(2 + \frac{h_{\Gamma}}{a_{\Gamma}} \operatorname{tg} \varphi_{\Gamma} \right) \quad (1.5)$$

При принятых допущениях полученные формулы 1.4 и 1.5 однозначно характеризуют обжатие фланцев по толщине. При этом коэффициенты обжатия подошвы и головки у основания могут быть определены из следующих геометрических соотношений:

$$\frac{1}{\eta_{\Pi b}} = \frac{b'_{\Gamma}}{b_{\Gamma}} = \frac{\frac{1}{\eta_{\Gamma a}} + \frac{h_{\Pi}}{a_{\Pi}} \operatorname{tg} \varphi_{\Pi}}{1 + \frac{h_{\Pi}}{a_{\Pi}} \operatorname{tg} \varphi_{\Pi}} \quad (1.6)$$

$$\frac{1}{\eta_{\Gamma b}} = \frac{b'_{\Gamma}}{b_{\Gamma}} = \frac{\frac{1}{\eta_{\Gamma a}} + \frac{h_{\Gamma}}{a_{\Gamma}} \operatorname{tg} \varphi_{\Gamma}}{1 + \frac{h_{\Gamma}}{a_{\Gamma}} \operatorname{tg} \varphi_{\Gamma}} \quad (1.7)$$

Используя формулы 1.4 и 1.5 и принимая изменения коэффициента обжатия шейки по проходам, можно рассчитать коэффициенты $\frac{1}{\eta_{\Pi a}}$ и $\frac{1}{\eta_{\Gamma a}}$ и определить толщину фланцев подошвы и головки в каждом проходе против направления прокатки:

$$a'_{\Pi} = \frac{1}{\eta_{\Pi a}} a_{\Pi} \quad (1.8)$$

$$a'_{\Gamma} = \frac{1}{\eta_{\Gamma a}} a_{\Gamma} \quad (1.9)$$

$$b'_{\Pi} = \frac{1}{\eta_{\Pi b}} b_{\Pi} \quad (1.10)$$

$$b'_{\Gamma} = \frac{1}{\eta_{\Gamma b}} b_{\Gamma} \quad (1.11)$$

Общий коэффициент обжатия шейки в универсальных калибрах определяют из условия, что толщина шейки чернового профиля, поступающего из двухвалкового калибра в первый универсальный калибр, должна составлять 40÷50% высоты головки этого профиля, которая приближенно равна высоте головки готового рельса, так как уширение фланцев в процессе прокатки в универсальных калибрах компенсируется их обжатием во вспомогательных калибрах.

Таким образом, общий коэффициент обжатия шейки в универсальных калибрах:

$$\frac{1}{\eta_{\Sigma ш}} = (0,4 \div 0,5) \frac{H_{\Gamma 1}}{d_1}, \quad (1.12)$$

где $H_{\Gamma 1}$ и d_1 – высота головки и толщина шейки профиля в чистовом калибре.

На рассмотренных выше принципах учеными Уральского федеративного университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина – В.А. Шиловым и Д.Л. Шварцем была создана математическая модель, применив которую проведен численный эксперимент по изучению закономерностей деформирования металла в универсальных калибрах при прокатке железнодорожных рельсов.

При численном моделировании использовали: приведенный диаметр горизонтальных валков $A_{\Gamma} = \frac{D_{\Gamma}}{d} = 42 \div 67$ мм; приведенная длина шейки рельсового профиля $\tilde{l} = \frac{l}{d} = 3,7 \div 5,8$; относительная высота фланцев подошвы $\widetilde{h}_{\Pi} = \frac{h_{\Pi}}{b_{\Pi}} = 1,6 \div 3,1$ и головки $\widetilde{h}_{\Gamma} = \frac{h_{\Gamma}}{b_{\Gamma}} = 0,5 \div 1,1$; коэффициент обжатия шейки $\frac{1}{\eta_{ш}} = \frac{d'}{d}$, принимаемый равным коэффициенту вытяжки шейки $\lambda_{ш} = 1,10 \div 1,35$; уклон внутренних граней фланцев $tg\varphi = 0,25$; показатель трения $\psi = 0,6 \div 1,0$ [83].

Для рассматриваемых условий были осуществлены вычисления при 46 вариантах изменения начальных параметров в каждом случае при нахождении ко-

коэффициента вытяжки шейки $\lambda_{ш} = \frac{1}{\eta_{ш}}$, подошвы $\frac{1}{\eta_{п}}$ и головки $\frac{1}{\eta_{г}}$, коэффициенты изменения размеров фланцев $\beta_{п}$ и $\beta_{г}$ и опережение ν .

Таким образом, найден массив данных: $\frac{1}{\eta_{п}}, \frac{1}{\eta_{г}}, \beta_{п}, \beta_{г}, \nu = f\left(\frac{1}{\eta_{ш}}, A_{г}, \widetilde{h}_{п}, \widetilde{h}_{г}\right)$, при равномерной деформации элементов рельсового профиля в соответствии с условием $\lambda_{ш} = \lambda_{п} = \lambda_{г}$.

Изучение результатов расчета дало возможность установить особенности деформирования металла при равномерном обжатии в универсальных калибрах при прокатке рельсов [10, 83].

Проведенный анализ позволил констатировать, что коэффициенты обжатия фланцев подошвы и головки во многом зависят от геометрии очага деформации. Приращение коэффициента обжатия шейки закономерно приводит к увеличению коэффициентов обжатия фланцев, что связано с необходимостью перераспределения металла с подошвы и головки для обеспечения постоянной по фланцу и шейки вытяжки.

С увеличением размеров горизонтальных валков $A_{г}$ коэффициенты обжатия подошвы и головки уменьшаются. Такой эффект объясняется увеличением площади контакта металла с горизонтальными валками у которых увеличивается приведенный диаметр и соответственно возникают затруднения движению металла в длину фланцев.

Постоянство заданного коэффициента вытяжки профиля обеспечивается благодаря уменьшению деформирования фланцев головки и подошвы. Зависимость коэффициентов обжатия подошвы и головки от относительной высоты фланцев $\widetilde{h}_{п}$ и $\widetilde{h}_{г}$ показала, что с ростом $\widetilde{h}_{п}$ и $\widetilde{h}_{г}$ коэффициенты бокового обжатия фланцев уменьшаются при всяких коэффициентах обжатия шейки $\frac{1}{\eta_{ш}}$.

Исходя из вышесказанного имеет место неравенство $\frac{1}{\eta_{п}} < \frac{1}{\eta_{г}}$. За счет контактного взаимодействия заготовки с боковыми плоскостями горизонтальных валков при различных величинах приведенного диаметра зависимость влияния

относительной высоты фланцев на коэффициент их обжатия остается одинаковым.

При изучение закономерности высотной деформации фланцев рельсового раската было установлено, что при прокатке с одинаковыми коэффициентами вытяжки по элементам профиля коэффициент утяжки подошвы составляет $\beta_{\text{п}} = 0,945 \div 0,980$, а приращения головки – $\beta_{\text{г}} = 1,002 \div 1,026$.

С увеличением коэффициента обжатия шейки утяжка подошвы и приращение головки увеличиваются, это связано с тем, что увеличивается длина очага деформации по головке и подошве за счет увеличения обжатия фланцев. Так как протяженность очага деформации превышает его ширину и в том и другом случае, то согласно закону наименьшего сопротивления, перемещение металла в направлении ширины увеличивается. Изменение приведенного диаметра валков влияет на утяжку подошвы и увеличение головки аналогично.

С увеличением приведенной высоты фланцев $\widetilde{h}_{\text{п}}$ и $\widetilde{h}_{\text{г}}$ коэффициенты учитывающие изменения фланцев уменьшаются, что можно объяснить увеличением высоты контактной поверхности фланцев профиля с вертикальными валками и боковыми поверхностями горизонтальных валков, что в свою очередь приводит к затруднению перемещения металла по высоте фланца.

На деформирование фланцев сильно влияет величина показателя трения ψ . Так увеличение показателя трения является причиной уменьшения коэффициентов изменения формы фланцев. Это можно объяснить увеличением сил трения на поверхности контакта фланцев с вертикальными и горизонтальными валками.

С целью практического использования, в инженерных расчетах установленные закономерности были аппроксимированы с помощью программного комплекса Excel [10, 65, 66] в виде следующих формул для определения:

- коэффициентов обжатия фланцев подошвы и головки:

$$\frac{1}{\eta_{\text{пб}}} = 1 + 0,583 \left(\frac{1}{\eta_{\text{ш}}} - 1 \right)^{0,96} A^{0,125} \widetilde{h}_{\text{п}}^{-0,588} \psi^{-0,085} \quad (1.13)$$

$$\frac{1}{\eta_{\text{гб}}} = 1 + 0,493 \left(\frac{1}{\eta_{\text{ш}}} - 1 \right)^{1,022} A^{0,153} \widetilde{h}_{\text{г}}^{-0,407} \psi^{-0,051} \quad (1.14)$$

- коэффициентов приращения фланцев подошвы и головки:

$$\beta_{\Pi} = 1 - 0,614 \left(\frac{1}{\eta_{\text{ш}}} - 1 \right)^{1,028} A^{-0,703} \widetilde{h}_{\Pi}^{1,594} \psi^{1,129} \quad (1.15)$$

$$\beta_{\Gamma} = 1 + 0,229 \left(\frac{1}{\eta_{\text{ш}}} - 1 \right)^{1,376} \left(\frac{A}{100} \right)^{3,69} \widetilde{h}_{\Gamma}^{-5,018} \psi^{-1,197} \quad (1.16)$$

- коэффициент опережения:

$$\nu = 1 + 0,0917 \left(\frac{1}{\eta_{\text{ш}}} - 1 \right)^{1,177} A^{-0,161} \widetilde{b}_{\Phi}^{-1,53} \psi^{0,855} \quad (1.17)$$

Установленные закономерности описаны инженерными формулами и являются основой для разработки научно обоснованной методики расчета рациональных режимов обжаты, скоростных и энергосиловых параметров прокатки высококачественных железнодорожных рельсов на современных рельсобалочных станках.

Однако калибровка асимметричных рельсов в отличие от обычных рельсов имеет свои особенности. К данным типам рельсов относятся рельсы железнодорожные остряковые, рельсы усовиковые и заготовка трамвайного рельса Т62.

1.2 Рельсы железнодорожные остряковые

Остряковые рельсы являются полуфабрикатами (заготовкой) для производства остряков стрелочных переводов [35]. Профиль острякового рельса имеет характерные особенности и значительно отличается от профиля обычного железнодорожного рельса. Он относится к асимметричным рельсовым профилям в связи с тем, что его поперечное сечение не симметрично как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях. На Рисунке 1.4 приведены (контролируемые) размеры и форма рельсов [36–38].

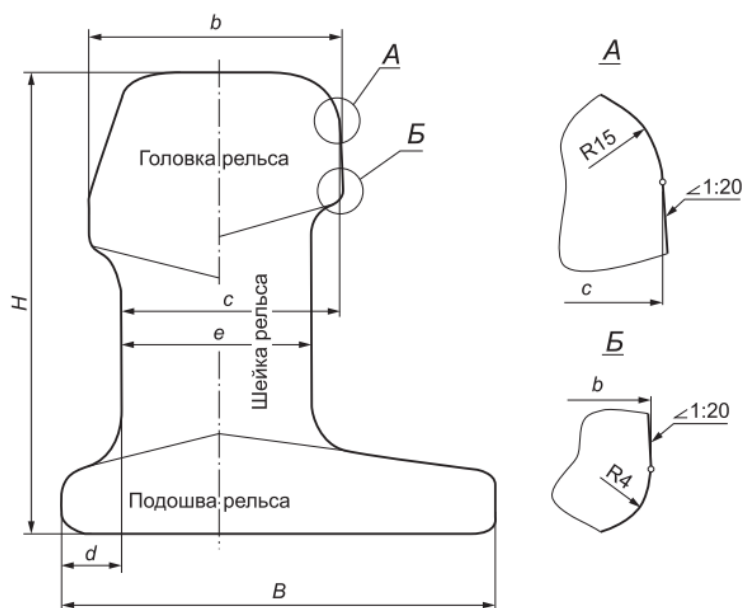


Рисунок 1.4 – Размеры профиля острогового рельса

1.2.1 Технология прокатки асимметричных профилей типа рельсов остроговых в двухвалковых калибрах

Существующая технология прокатки асимметричных рельсовых профилей типа рельсов остроговых на рельсобалочных станах, разработанная для прокатки их в двухвалковых калибрах, связана с большими трудностями, вызванными несимметричностью профиля относительно горизонтальной и вертикальной осей (Рисунок 1.4). Опыт производства данных профилей показал, что для их получения достаточно в схеме прокатки иметь четыре или пять рельсовых калибров. Первый по ходу прокатки рельсовый калибр является разрезным, в который задается раскат с заранее подготовленными фланцами подошвы, полученными в ребровом трапецевидном калибре (Рисунок 1.5).

На основании статистического анализа формоизменения шейки хорошо работающих калибровок при прокатке остроговых рельсов с использованием только двухвалковых калибров были установлены общие и частные коэффициенты высотной деформации шейки в рельсовых калибрах (Таблица 1.1) [7].

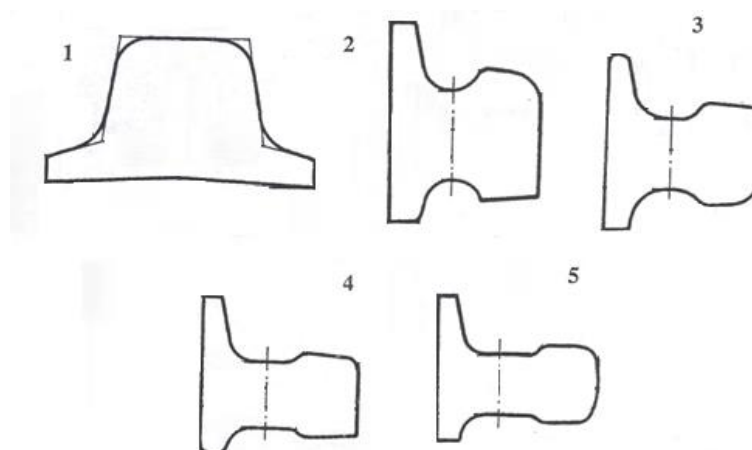


Рисунок 1.5 – Схема калибровки профиля ОР65 на рельсобалочном стане
в двухвалковых калибрах

Таблица 1.1 – Общие и частные коэффициенты высотной деформации шейки в
рельсовых калибрах при прокатке остряковых рельсов на станах с
двухвалковой калибровкой [7]

Типа рельса	Частные коэффициенты высотной деформации шейки в калибрах (нумерация против хода прокатки)				Общий коэффициент $\frac{1}{\eta_{\text{общ}}}$
	I (чистовой)	II	III	IV (разрезной)	
ОР50	1,130	1,090	1,140	1,600	2,247
ОР65	1,130	1,090	1,140	1,650	2,317
ОР75	1,120	1,110	1,150	1,680	2,402

Метод калибровки данных рельсов предусматривает формирование асимметричных фланцев подошвы в рельсовых калибрах из симметричных фланцев раската полученного в трапециевидном ребровом калибре. Значительные обжатия короткого фланца в рельсовых калибрах и большая разница длины фланцев приводят к скручиванию раскатов при выходе из калибров.

Технология прокатки остряковых рельсов достаточно сложна. Несмотря на предложенные различными авторами усовершенствования калибровки при прокатке асимметричных рельсов в двухвалковых калибрах возникают следующие дефекты: значительная скрученность рельсов, невыполнение четкой формы подошвы из-за скоса с нижней стороны короткого плеча, дефекты по поверхности рельсов из-за интенсивной работы привалковой арматуры.

1.3 Рельсы усовиковые типа УР65

Рельсы усовиковые предназначены для соединений и пересечений путей железных дорог [39].

Профиль усовикового рельса имеет характерные особенности и отличается от профиля железнодорожного и острякового рельса для производства стрелочных переделов. Он относится к асимметричным рельсовым профилям, его поперечное сечение не симметрично как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях по всем элементам профиля. На Рисунке 1.6 приведены основные (контролируемые) размеры и форма усовикового рельса типа УР65 [39].

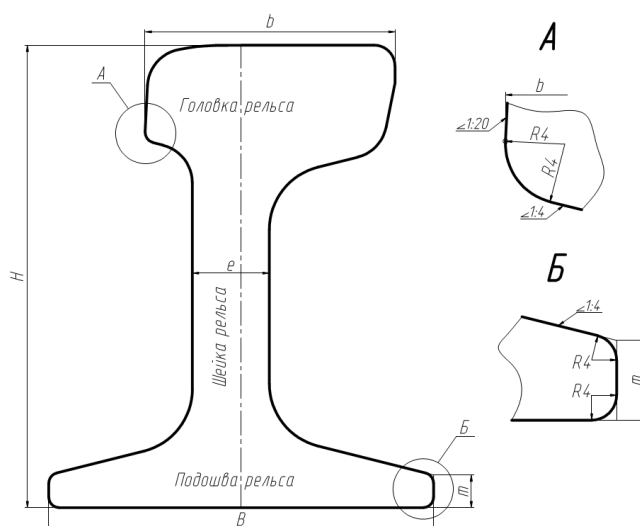


Рисунок 1.6 – Размеры профиля рельсов типа УР65

Использование усовиковых рельсов позволяет ликвидировать стыки на пересечении железнодорожных путей. Используемые на пересечениях крестовины отливают целиком из дорогостоящей высокомарганцовистой стали. Но и она не выдерживает нагрузок. Частые удары колес выводят крестовину из строя, требуя постоянной их сварки при ремонтах путей.

Усовиковые рельсы, благодаря своей конфигурации, позволяют делать безстыковые переходы с одного пути на другой и таким образом значительно увеличивают срок службы пересечений, отпадает необходимость отливки крестовин.

Расчет калибровки усовиковых рельсов типа УР65 показал, что для их получения, так же, как и для прокатки остряковых рельсов, достаточно 4-ех рельсо-

вых калибров. На Рисунке 1.7 представлена схема прокатки для усовиковых рельсов типа УР65 на линейных рельсобалочных станах.

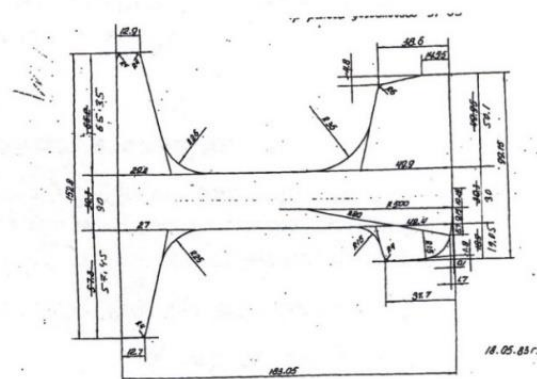
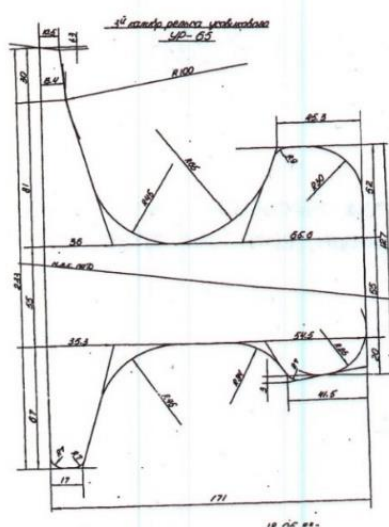
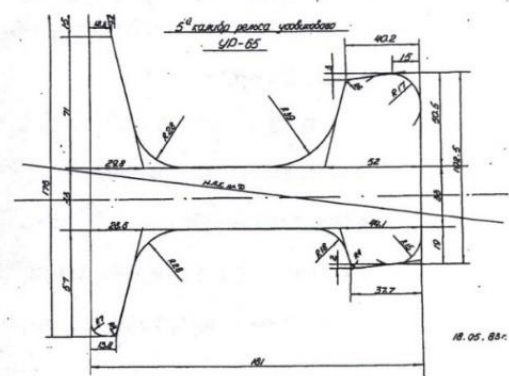
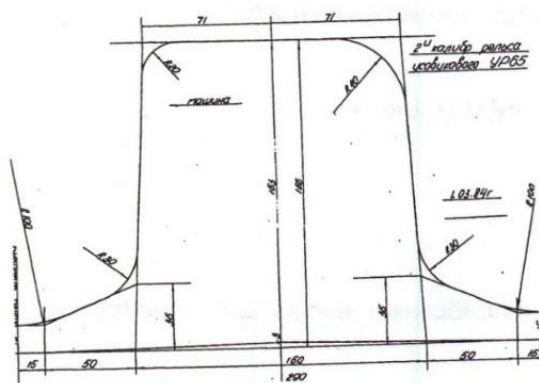
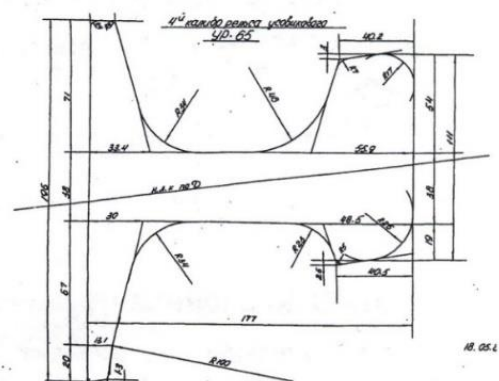
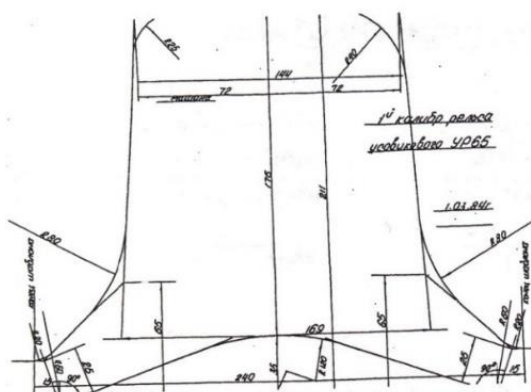


Рисунок 1.7 – Схема прокатки на линии «800» и «850»
для усовиковых рельсов типа УР65

Метод калибровки этих рельсов предусматривает формирование значительной асимметричности фланцев головки в рельсовых калибрах из симметричного раската относительно вертикальной оси полученного из трапецевидного ребрового калибра. Значительная разность длины фланцев головки, так же, как и при прокатке асимметричных остряковых рельсов, приводит к скручиванию раската при выходе из калибров. Использование косоугольного типа чистового двухвалкового калибра для выполнения, требуемого по стандарту прямолинейного участка катающей поверхности головки профиля часто не позволяет стабильно выполнять геометрию головки усикового рельса из-за невыполнения радиусов выкружек. Технология прокатки и методика проектирования профиля усикового рельса на современных рельсопрокатных станах, оснащенных станом-тандем с универсальными клетями в литературе не освещена.

1.4 Заготовка трамвайного рельса Т62

Заготовка трамвайного рельса Т62 предназначена для изготовления стрелочных переводов для трамвайных рельсов [40]. Профиль заготовки трамвайного рельса Т62 отличается от рельса трамвайного желобчатого типа РТ62 отсутствием желоба. Он относится к асимметричным рельсовым профилям, его поперечное сечение не симметрично как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях. Симметрична только подошва рельса относительно вертикальной плоскости. На Рисунке 1.8 приведены основные размеры заготовки рельса типа Т62 [40].

Для получения профиля заготовки трамвайного рельса только в двухвалковых калибрах на рельсобалочных станах, не оснащенных универсальными клетями достаточно 6-ти рельсовых калибров, как и для прокатки трамвайных рельсов.

Технология прокатки и способ проектирования калибровки профиля заготовки трамвайного рельса на современном рельсопрокатном стане с использованием стана-тандем в технической литературе не имеется.

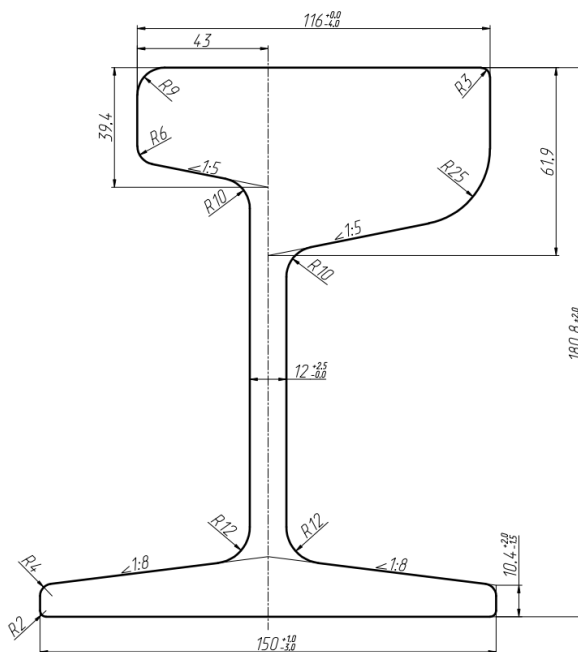


Рисунок 1.8 – Заготовка трамвайного рельса Т62

1.5 Современное состояние производства рельсовых профилей

Типичным представителем производителей рельсовой продукции по современной технологии можно считать рельсобалочный стан фирмы «Baotou Iron and Steel» (КНР) ведущим поставщиком оборудования является фирма «SMS Meer» (Германия) (Рисунок 1.9).

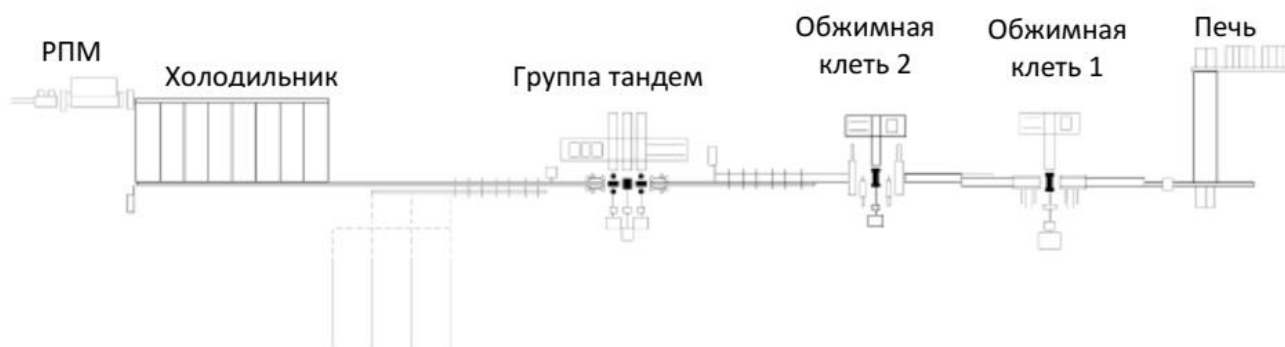


Рисунок 1.9 – Схема расположения оборудования рельсобалочного стана
на заводе «Baotou Iron and Steel» (КНР)

Стан используется для производства сортамента балок и рельсов всевозможных размеров по стандартам AREMA и EN.

В состав участка рабочих клеток стана входят две обжимные реверсивные клетки и стан-тандем в составе двух универсальных четырехвалковых и одной вспомогательной двухвалковой клетей. В двухвалковых обжимных реверсивных клетях, оснащенных манипуляторами и кантователями, заготовку обжимают в ящичных, тавровых, закрытых и открытом рельсовых калибрах с получением чернового рельсового профиля для последующей прокатки в стане-тандем и далее прокатывают в нем по типовой схеме калибровки, показанной на Рисунке 1.10.

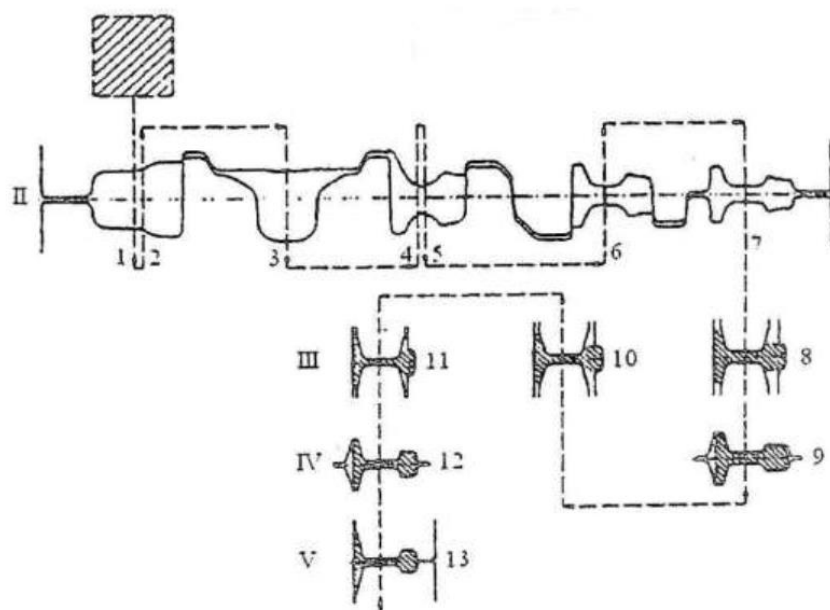


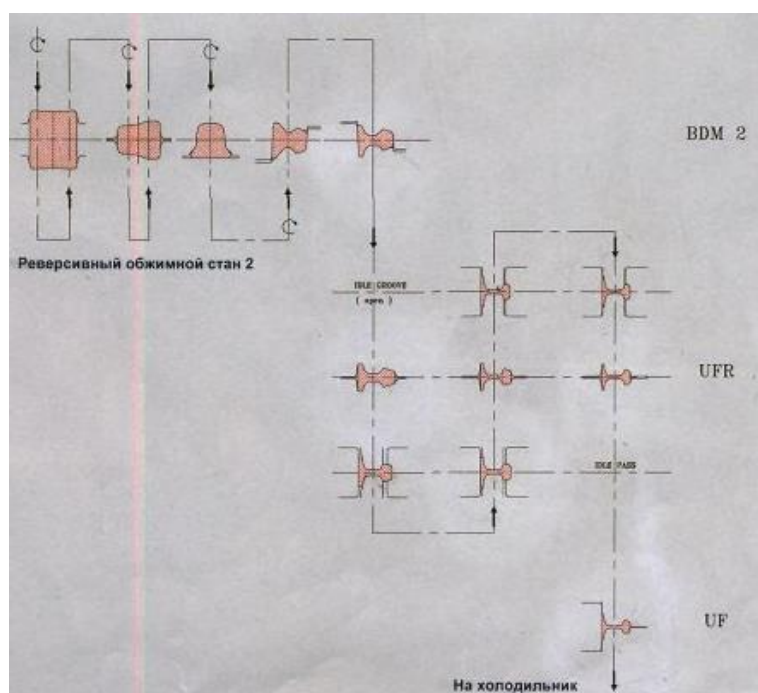
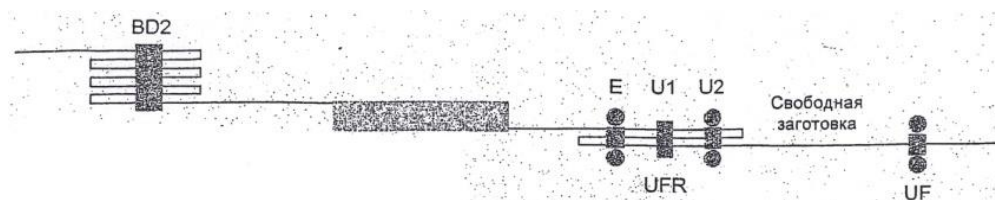
Рисунок 1.10 – Типовая схема калибровки для прокатки рельсов
фирмы «SMS Meer»

Фирма «Danieli+ Morgardshammar» (Италия) предложила процесс «PSP» (Profile sizing process) получения рельсов и балок с использованием групп универсальных клетей и независимо расположенной чистовой клетки. Отдельно установленная чистовая клеть позволяет повысить точность профиля рельса и уменьшить расход валков [14, 15].

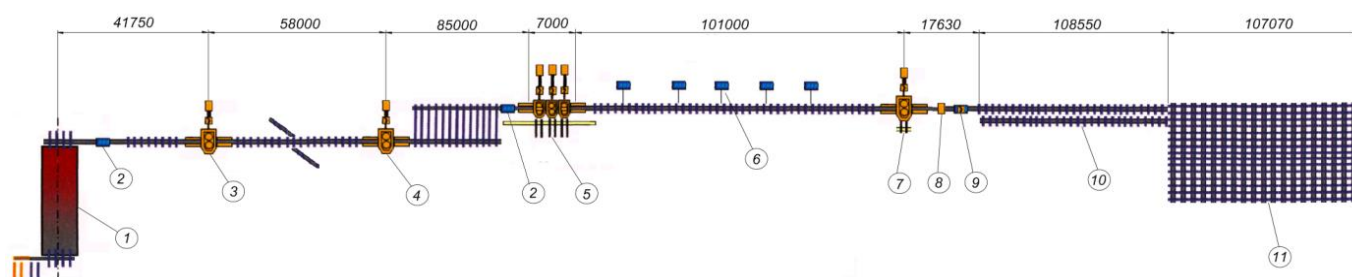
Вариант компоновки оборудования с одной обжимной клетью использован при строительстве нового рельсобалочного стана на Челябинском металлургическом комбинате (ПАО «ЧМК»), а с двумя – при коренной реконструкции рельсобалочного стана ПАО «ЕВРАЗ» филиал «Западно-Сибирский металлургический комбинат» (ЗСМК) [41], при этом и на том и на другом станах для прокатки рель-

сов можно применять две схемы: с использованием отдельно стоящей чистовой клетки (процесс «PSP») и без использования отдельно стоящей чистовой клетки.

Расположение оборудования и проектные схемы прокатки рельсов по способу «PSP» на ПАО «ЧМК» и филиал «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ» показаны на Рисунке 1.11.



a

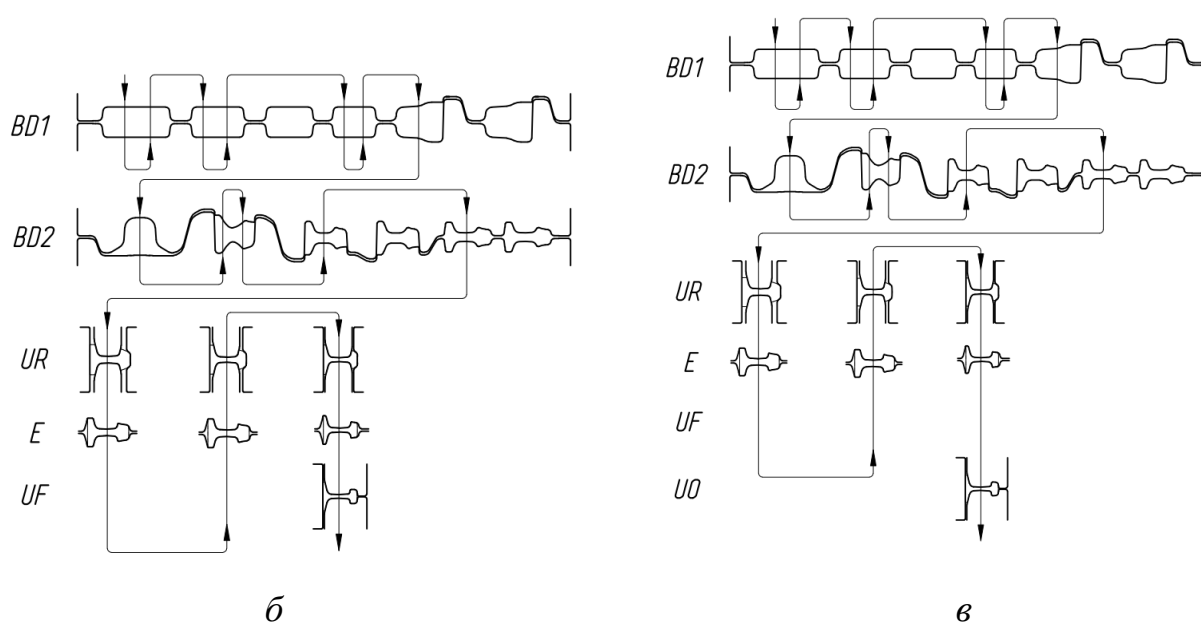


1 – методическая печь; 2 – гидросбив окалины; 3 – клеть BD1; 4 – клеть BD2;

5 – непрерывная реверсивная группа; 6 – пилы горячей резки;

7 – отдельно стоящая клеть; 8 – лазерный профилемер; 9 – клеймитель;

10 – установка дифференцированной закалки; 11 – холодильник



а – проектная схема ПАО «ЧМК»,

б, в – проектные схемы филиал «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ»

Рисунок 1.11 – Расположение оборудования и схема прокатки рельсов с использованием непрерывно-реверсивной группы клеток (стан-тандем)

Анализ современных способов прокатки рельсов с применением универсальных клеток показывает, что различие всех рассмотренных схем прокатки заключается в способе получения чернового рельсового профиля и деформации чернового раската в универсальных клетях на последней стадии прокатки.

Однако следует отметить, что имеющийся в литературе обширный материал, на основании которого делаются рекомендации по улучшению качества и совершенствованию режимов прокатки получен в условиях формоизменения в двухвалковых калибрах на линейных рельсобалочных станах [42–57].

Данный факт объясняется отсутствием до недавнего времени в России действующих универсальных рельсобалочных станов.

В зарубежной практике при расчете режимов деформации в универсальных калибрах применяют определенные, установленные опытом коэффициенты вытяжки, как показано, например, в Таблице 1.2 [16, 58–63]. Однако при этом в литературе не приводится рекомендаций по распределению коэффициента вытяжки между элементами профиля в калибрах по определению величины приращения высоты подошвы и головки при их обжатии вертикальными валками, что создает

трудности при расчете размеров элементов рельсового профиля по проходам, за счет невозможности точного определения приращения высоты фланцев профиля в универсальных калибрах.

Таблица 1.2 – Распределение коэффициентов вытяжки при прокатке рельсового профиля с применением универсальных калибров

Номер пропуска в стане-тандем	Наименование калибра	Коэффициент вытяжки	
		по данным [58]	по данным [59]
1	Двухвалковый рельсовый открытый	1,08	1,10
2	Универсальный калибр 1	1,25	1,33
3	Вспомогательный двухвалковый калибр	1,02	–
4	Универсальный калибр 2	1,15	1,21
5	Вспомогательный двухвалковый калибр	1,03	1,03
6	Чистовой универсальный трехвалковый калибр	1,07	1,09

Как показывает зарубежный опыт производства рельсов для повышения точности профиля по всей длине целесообразно последний (чистовой) осуществлять в отдельно стоящей универсальной клетке [14, 15, 63].

В России первые работы по исследованию и разработке технологии прокатки железнодорожных рельсов с использованием универсальных клеток были выполнены учеными Уральского политехнического института под руководством В.К. Смирнова [17, 64].

Работы В.К. Смирнова и А.Р. Бондина заложили основы методов расчета получения рельсов в универсальных калибрах. Однако необходимо отметить, что разработанные решения при проектировании калибровок железнодорожных рельсов в универсальных калибрах не обладают достаточной точностью ввиду используемых допущений и упрощений.

Современная технология прокатки рельсов осуществляется по технологической схеме, включающей прокатку в обжимных дуо-реверсивных клетках, для получения чернового рельсового профиля, и стане-тандем в составе двух универсальных четырехвалковых и одной вспомогательной двухвалковой клеток. Разработке математической модели процесса прокатки рельсового профиля в универсальных калибрах и созданию на ее основе научно-обоснованной методики про-

ектирования калибровок валков и технологических режимов прокатки железнодорожных рельсов на современных универсальных рельсобалочных станах посвящены работы ученых Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина [9, 65–76].

Производимые в настоящее время рельсы типа Р50, Р65, Р71 и Р75 и их иностранные разновидности [77] имеют следующие геометрические особенности:

- 1) существенно различаются размеры аналогичных частей профиля;
- 2) к готовому профилю предъявляются повышенные требования к точности размеров;
- 3) значительно увеличена длина производимых рельсов до 100 м и более.

Существенные отличительные особенности технологии производства рельсов накладывает определенные сложности перед рельсовой калибровкой прокатных валков.

При прокатке асимметричного профиля рельса из прямоугольной заготовки нужно переместить металла по сечению, что вызывает необходимость использования калибров сложной формы. Выполнение условий по повышению точности размеров сечения рельса вызывает необходимость предусматривать в последних проходах небольшую величину деформации профиля. Соблюдение выше рассмотренных условий приводит к необходимости увеличения числа калибров, обеспечивающих выполнение заданного профиля.

При производстве асимметричных профилей имеет место неравномерность деформации по ширине, что создает условия к таким нежелательным явлениям как серпение и скручивание профиля [65–75, 78–80].

Большое число условий и требований, которые необходимо выполнить для получения качественной рельсовой продукции является причиной использования на практике калибровок со всевозможными наборами калибров разной формы и назначения. Такое положение дел вызывает необходимость выявления наилучших вариантов сочетания калибров.

1.6 Выводы и постановка задач исследования

На основании проведенного выше аналитического обзора можно сделать следующие выводы:

1. Основной тенденцией развития рельсопрокатного производства является переход от прокатки рельсовых профилей только в двухвалковых калибрах на прокатку в универсальных рельсовых (четырёхвалковых и трёхвалковых) калибрах на последней стадии формирования профиля, обеспечивающих получение равномерной деформации (одинаковых коэффициентов вытяжек) по элементам профиля (шейке, подошвы и головки).

2. В большинстве случаев применяемые методы расчета калибровок асимметричных рельсовых профилей рассчитаны на прокатку в двухвалковых калибрах и основаны на эмпирических формулах и эвристических приемах, установленных практикой. На настоящий момент отсутствует методика проектирования калибровок для получения асимметричных относительно двух осей рельсовых профилей в универсальных калибрах.

3. Асимметричные рельсы работают в сложных условиях, сопряженных со знакопеременными тангенциальными и нормальными напряжениями, интенсивным износом поверхности профиля, что вызывает необходимость выполнения высоких требований к точности профиля. Температурно-деформационные условия прокатки – основные факторы, определяющие качество геометрии поверхности асимметричных рельсовых профилей и степень совершенства макроструктуры профиля. При этом нужные режимы обработки элементов профиля от заготовки до готового асимметричного рельса обеспечиваются благодаря конструктивного исполнения калибров и их взаимосвязи в системе. Точность геометрии прокатываемого профиля зависит от последних профилирующих калибров.

4. Условия прокатки рельсовых профилей на универсальных рельсобалочных станах создают значительные резервы для увеличения производительности, улучшения качества рельсов по таким параметрам, как качество поверхности, точность геометрических размеров за счет совершенствования режимов прокатки.

Цель работы заключается в разработке 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 достижения поставленной цели необходимо 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 клетей 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.

2 Обоснование направлений повышения эффективности калибровки асимметричных рельсовых профилей при прокатке в черновых клетях на универсальном рельсобалочном стане филиал «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ»

2.1 Методика моделирования процесса прокатки остряковых рельсов типа ОР65 в программном комплексе «QForm»

При оценке прочности деталей главной линии прокатного стана в качестве основной характеристики используется усилие прокатки [84–102]. Величина усилия прокатки может быть определена расчетным путем как произведение среднего нормального напряжения на площадь контакта металла с валками, а также с использованием современных методов компьютерного моделирования в программном комплексе QForm с применением пакета Компас-3D. С использованием современного пакета Компас-3D можно с высокой точностью определить площадь контакта при прокатке фигур любой сложности поперечного сечения.

QForm – мощный программный продукт, который позволяет моделировать [103–121] все процессы обработки металлов давлением.

Программный продукт QForm основан на использовании метода конечных элементов, типа четырехузловой тетраэдр [122, 123]. Используя QForm можно определить с достаточной достоверностью в каждой точке тела скоростные, температурные условия формоизменения, напряжения, энергию пластической деформации и т.д. [124–128]. При проведении расчетов применяется автоматическое перестроение конечно-элементной сетки.

Для анализа напряженно-деформированного состояния металла при прокатке с использованием программного продукта QForm определили, интенсивность напряжений и интенсивность деформаций [129, 130].

Реологические свойства стали 78ХСФ, используемые при расчетах в QForm, были получены при обработке экспериментальных исследований и учитывают влияние температуры, степени и скорости деформации [131, 132].

При компьютерном моделировании сделаны допущения:

- валки – несжимаемые;
- материал заготовки – однородный, изотропный;
- деформируемая среда – вязкопластическая;
- трение – по закону Зибеля [133, 134], показатель трения – постоянный, равный 0,8.

При моделировании процесса прокатки в QForm использовали общепринятые допущения:

1. Геометрические допущения:

- осесимметричные или плоские деформации – в зависимости от типа прокатки (листовая, круговая и т.д.) модель может предполагать симметричность деформации для упрощения расчетов;
- идеальная геометрия валков – поверхность валков считается гладкой, если специально не задана шероховатость или профиль;
- постоянный зазор между валками – если не учитывается упругая деформация оборудования.

2. Материальные допущения:

- изотропность материала – свойства материала (плотность, теплопроводность, пластичность) считаются одинаковыми во всех направлениях, если не задана анизотропия;
- жестко-пластическая или упругопластическая модель – QForm чаще использует жестко-пластическую модель (пренебрегает упругими деформациями), что допустимо при больших пластических деформациях;
- постоянные физические свойства – теплоемкость, теплопроводность и коэффициент теплового расширения могут считаться неизменными в определенном диапазоне температур.

3. Термические допущения:

- равномерное распределение температуры – в некоторых случаях принимается, что температура заготовки и валков распределена равномерно (если не включен полный термомеханический расчет);

- упрощенный теплообмен – может не учитываться конвекция или излучение, если их влияние мало.

4. Силовые и контактные допущения:

- постоянный коэффициент трения – трение между заготовкой и валками часто задается постоянным (по закону Зибеля), хотя в реальности оно может меняться;

- пренебрежение инерционными силами – в квазистатических расчетах динамическими эффектами пренебрегают;

- идеальный контакт – иногда предполагается, что нет проскальзывания между заготовкой и валками.

5. Кинетические допущения:

- постоянная скорость прокатки – если не рассматриваются переходные процессы (разгон/торможение);

- отсутствие поперечного течения материала – в некоторых моделях пренебрегают боковым уширением (хотя в QForm это можно учесть).

6. Допущения по граничным условиям:

- симметричные граничные условия – используются для сокращения времени расчета;

- отсутствие внешних воздействий – например, не учитываются вибрации стана или внешние тепловые потери.

7. Другие упрощения:

- отсутствие фазовых превращений – если не включены специальные модели (например, для сталей при термообработке);

- постоянная скорость деформации – в некоторых случаях принимается усредненное значение.

Ключевым фактором, определяющим стратегию для создания технологии прокатки различных профилей, является изучение деформированного состояния металла при формировании профилей в калибрах. Наиболее полно объемно деформированное состояние металла можно проанализировать, изучив распределе-

ние величин интенсивности напряжений и интенсивности деформаций в сечении заготовки.

Программный пакет QForm базируется на основополагающих принципах теории обработки металлов давлением [130–147], что позволяет с высокой степенью достоверности моделировать сложные процессы обработки металлов давлением такие как формоизменение асимметричных рельсовых профилей.

2.2 Исследование режимов прокатки асимметричных рельсов типа ОР65 на универсальном рельсобалочном стане филиал «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ»

Состав оборудования универсального рельсобалочного стана филиал «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ» показан на Рисунке 1.11.

Необходимо обратить внимание, что сечение острякового рельса имеет асимметричную форму (Рисунок 1.4), что значительно затрудняет технологию его изготовления, в том числе калибровку валков. Наибольшие сложности имеют место при освоении изготовления этих профилей на современных универсальных рельсобалочных станах, имеющих в своем составе непрерывную группу прокатных клеток [148–151].

Фирмой «SMS Meer» осуществляющей реконструкцию рельсобалочного стана была разработана и поставлена схема прокатки рельсов типа ОР65, которая предусматривала следующую последовательность операций (Рисунок 2.1, Таблица 2.1):

- семь пропусков в прямоугольных калибрах клетки BD1 с формированием прямоугольного подката;
- семь пропусков в клетки BD2, в том числе первый пропуск в калибре «лежащая трапеция», второй и третий пропуски в калибре «стоячая трапеция», четвертый и пятый пропуски в разрезном рельсовом калибре закрытого типа, шестой и седьмой пропуски в подготовительном рельсовом калибре открытого типа;
- прокатку в клетях стана-тандем за три пропуска, в том числе первый пропуск в универсальной клетке UR и вспомогательной (эджерной) клетки Е, второй

пропуск в клетях UR, третий пропуск последовательно во всех трех клетях стана-
тандем (UR, E, UF).

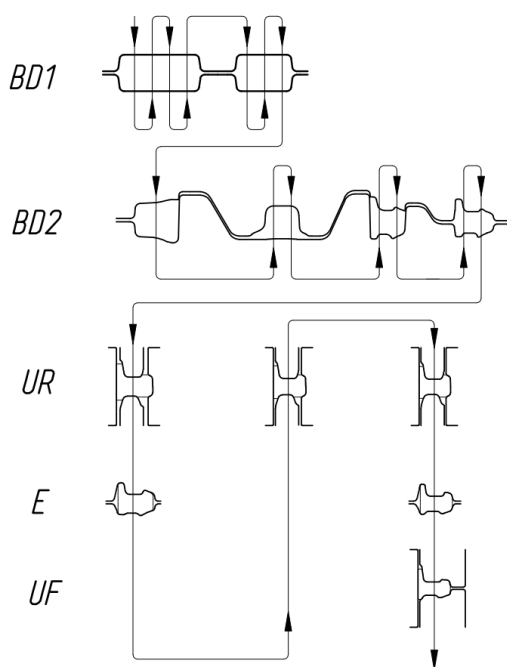


Рисунок 2.1 – Контрактная схема получения остроговельных рельсов типа ОР65

Таблица 2.1 – Режимы прокатки остроговельных рельсов типа ОР65 в клетях BD1 и BD2 по контрактной схеме

Пропуск	Клеть	Калибр	Форма калибра	Размеры, мм		Обжатие мм	Уширение мм	Сечение раската мм ²	Относительное уменьшение площади	Коэффициент вытяжки	Кантовка
				В	Н				%		
1	BD1	B1		310	290	75	10	89557	19,17	1,237	1
2		B1		320	240	50	10	76457	14,63	1,171	0
3		B1		251	265	55	11	66172	13,45	1,155	1
4		B1		268	210	55	17	55937	15,47	1,183	0
5		B2		223	225	43	13	49832	10,91	1,123	1
6		B2		235	185	40	12	43132	13,45	1,155	0
7		B2		200	185	50	15	36657	15,01	1,177	1
1	BD2	D		190	145	55	5	31412	14,31	1,167	1
2		C		215	157	33	25	25485	18,87	1,233	1
3		C		230	147	10	15	23625	7,30	1,079	0
4		B		155	127	25	8	21659	8,32	1,091	1
5		B		155	104	23	0	19693	9,08	1,100	0
6		A		165	96,5	5,5	10	18913	3,96	1,041	0
7		A		175	94,5	4	10	18134	4,12	1,043	0

1 – означает кантовка на 90° перед пропуском; 0 – отсутствие кантовки

В процессе освоения прокатки остряковых рельсов по контрактной схеме обнаружались следующие недостатки:

- при прокатке в клети BD2 наблюдалось скручивание заготовки, что существенно осложняло, а в некоторых случаях не позволяло задать раскат в следующий калибр. Попытки устранения скручивания различными известными способами не дали положительных результатов, а привели к увеличению времени прокатки в клети BD2 и дополнительному браку по «плене»;

- в закрытом ручье разрезного рельсового калибра имело место налипание металла по периметру стенок, что было вызвано большой разницей диаметров валков, формирующих различные части профиля. Такой режим прокатки являлся причиной увеличения числа инцидентов. Налипание металла на валки являлось причиной незапланированных простоев основного оборудования и увеличения числа дефектных рельсов;

- семь проходов в клети BD2 являлись основным фактором низкой производительности при прокатке асимметричных остряковых рельсов.

Для оптимизации режимов обжатий в клетях BD1 и BD2 при прокатке остряковых рельсов типа ОР65 и оценки усилия в каждом калибре осуществили математическое моделирование с использованием программного продукта QForm. Фрагмент записи усилия прокатки при моделировании в QForm приведен на Рисунке 2.2.

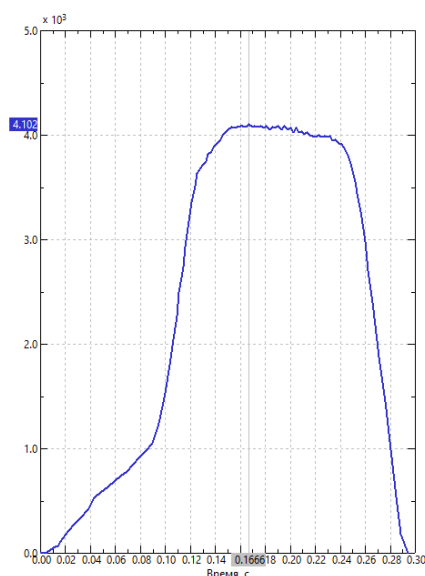


Рисунок 2.2 – Фрагмент записи усилия прокатки с использованием пакета QForm

Для проверки адекватности результатов моделирования были выполнены замеры усилия при прокатке острьяковых рельсов типа ОР65 в условиях действующего рельсобалочного стана филиала «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ». Усилие прокатки получали из автоматизированной системы, фиксирующей усилие и момент прокатки в каждом пропуске.

На Рисунке 2.3 показаны расчетные и фактические результаты по распределению усилия прокатки в клетях BD1 и BD2 острьяковых рельсов типа ОР65 по контрактной схеме.

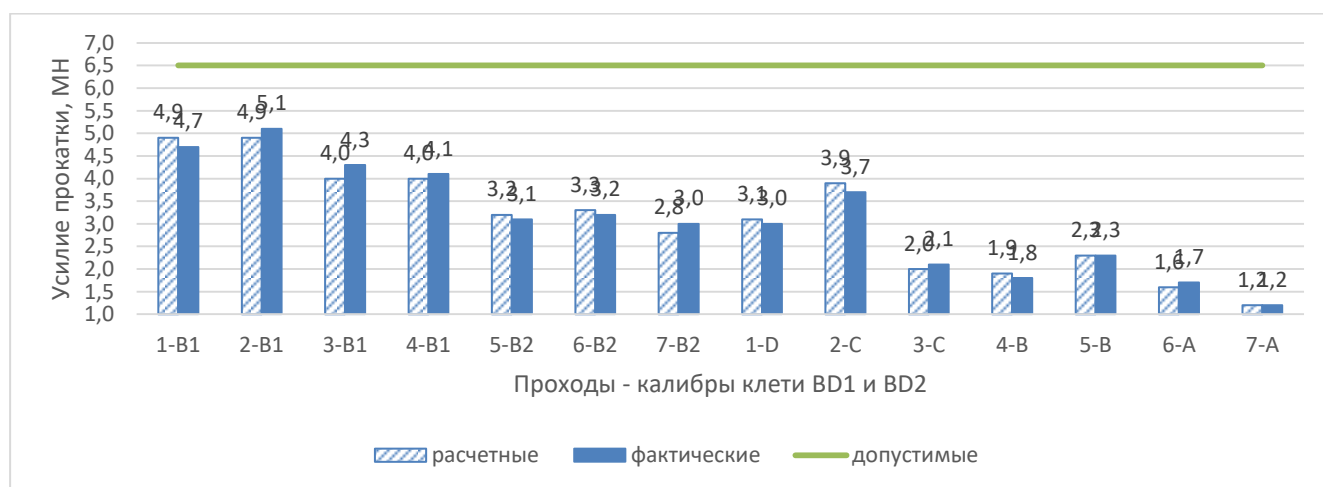


Рисунок 2.3 – Расчетные и фактические усилия при прокатке в клетях BD1 и BD2 по контрактной схеме

Из Рисунка 2.3 следует, что усилия прокатки, определенные с использованием программного продукта QForm хорошо согласуются с экспериментальными результатами отличаясь от них не более чем на 10%. Фрагмент записи усилия прокатки в условиях рельсобалочного цеха с использованием программного комплекса ИВА показан на Рисунок 2.4. По фактическим данным определили, что усилия не превышают 78% от допустимых значений.

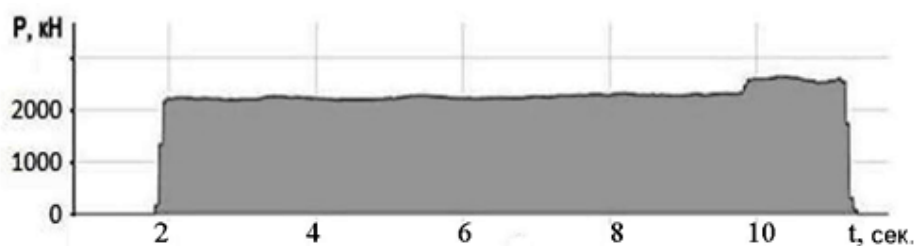


Рисунок 2.4 – Фрагмент записи усилия при прокатке в клетях BD2 (третий пропуск по контрактной схеме) с использованием программного комплекса ИВА

Компьютерное моделирование прокатки рельса ОР65 по контрактной калибровке в клетях BD1 и BD2 с учетом анализа напряженного и деформированного состояния позволило сделать вывод о достаточном запасе пластичности (Рисунок 2.5–2.8).

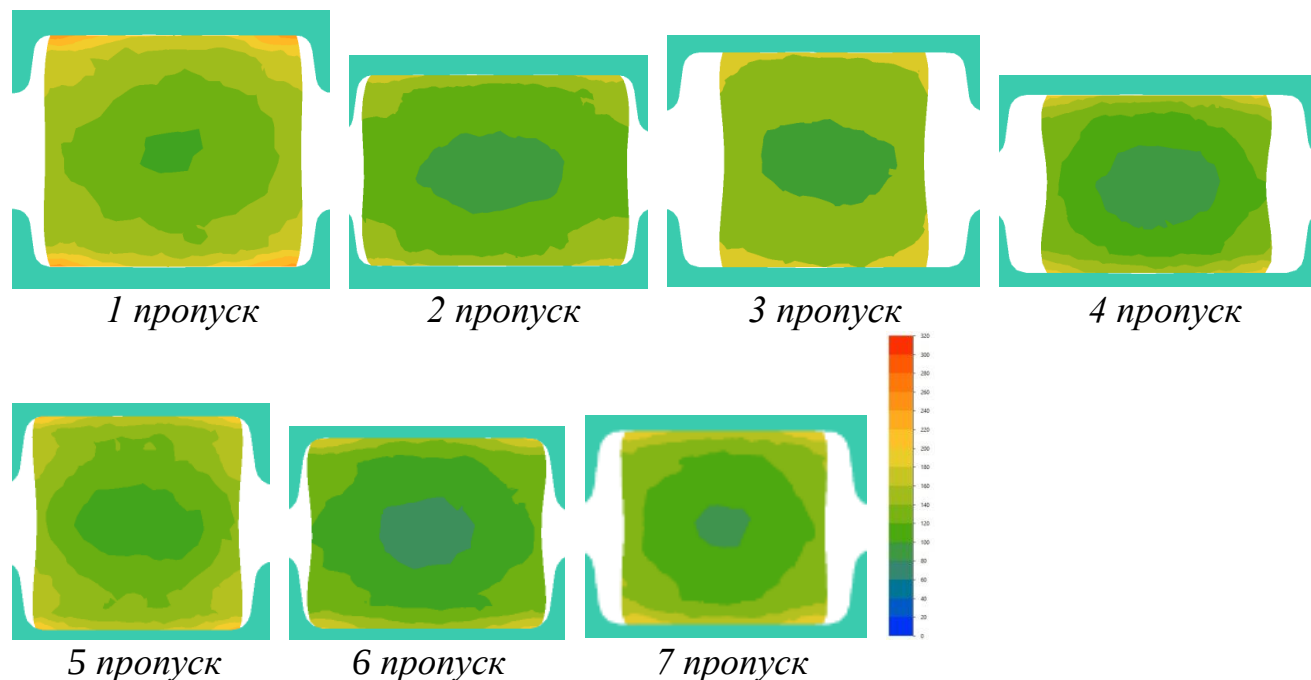


Рисунок 2.5 – Интенсивность напряжения при прокатке в клетях BD1 по контрактной схеме

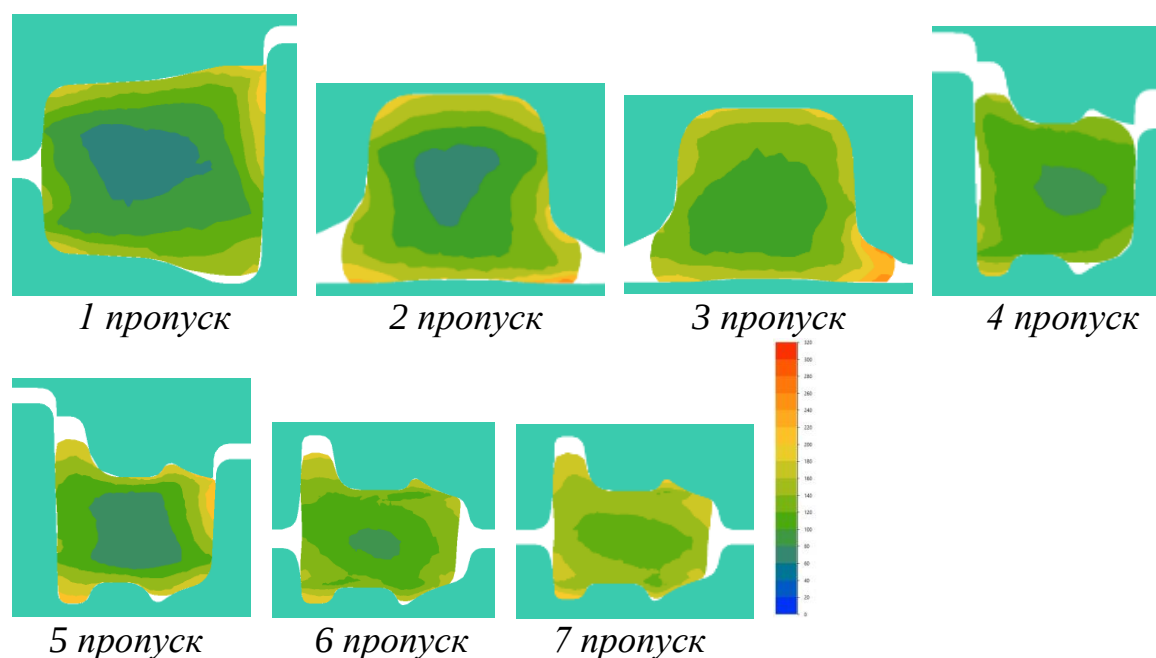


Рисунок 2.6 – Интенсивность напряжения при прокатке в клетях BD2 по контрактной схеме

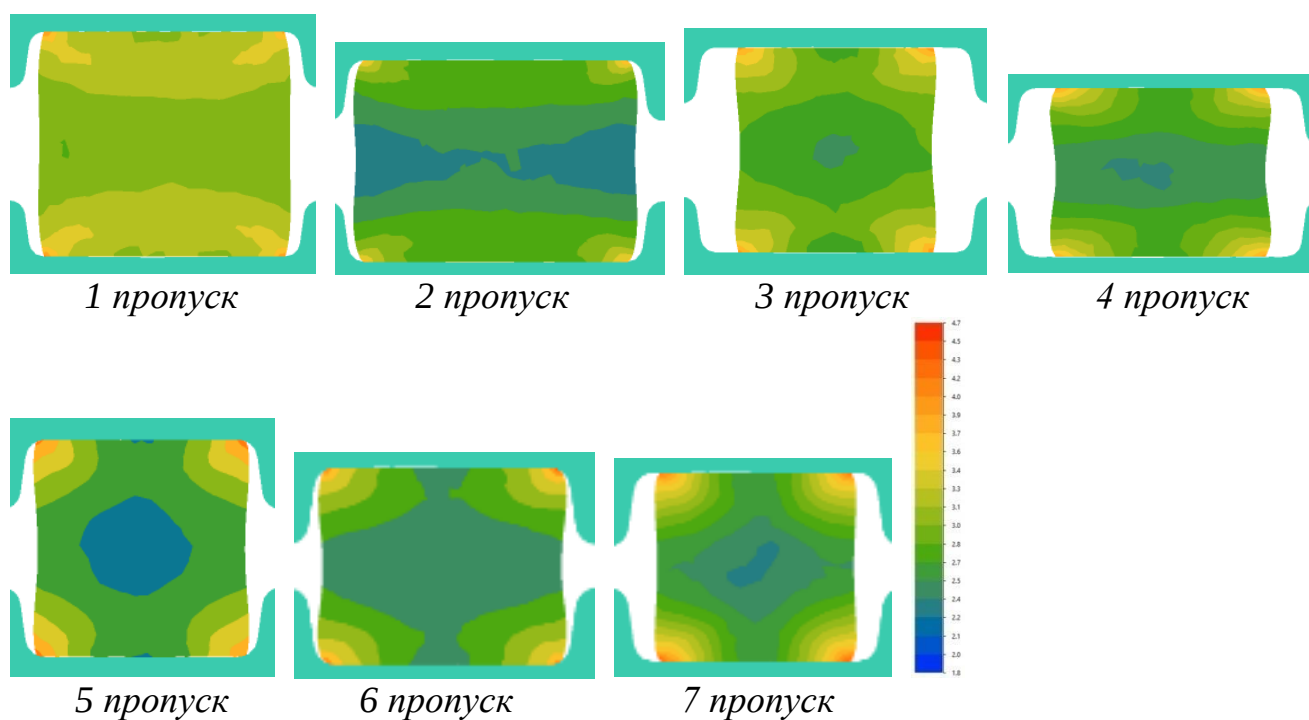


Рисунок 2.7 – Интенсивность деформаций при прокатке в клетях BD1

по контрактной схеме

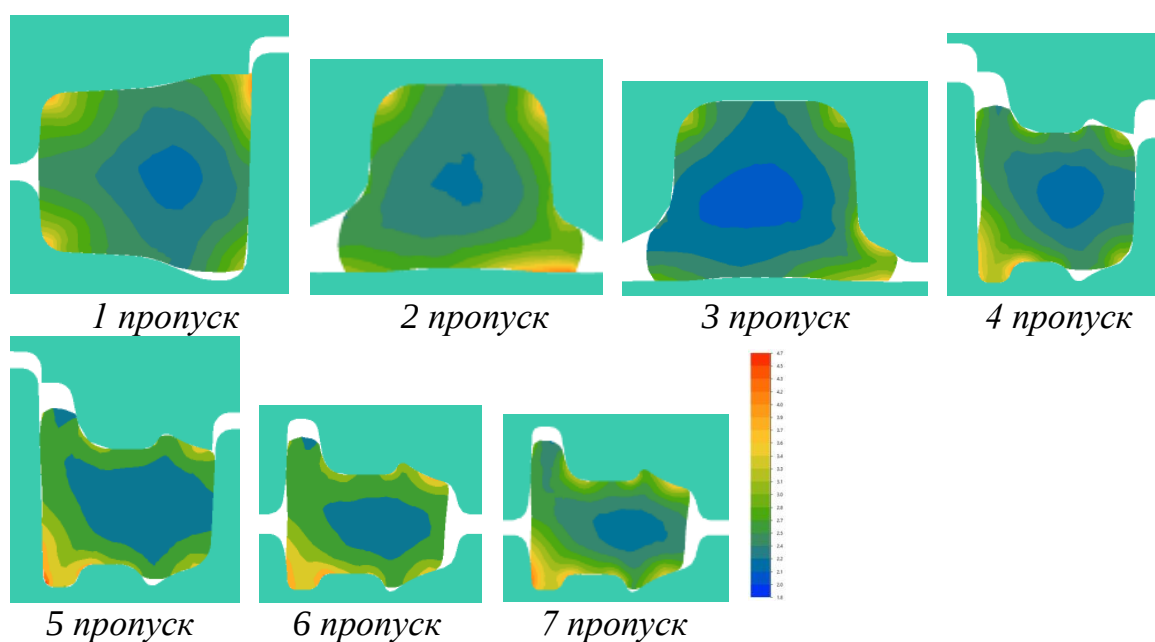


Рисунок 2.8 – Интенсивность деформаций при прокатке в клетях BD2

по контрактной схеме

Согласно данным приведенным на Рисунках 2.5–2.8 интенсивность напряжений изменяется по проходам в пределах от 30,6 до 69,6 МПа причем максимальные значения имеются в ящичном калибре В1 59,4 МПа первый пропуск клетки BD1 и в калибре D типа «лежащая трапеция» 69,6 МПа первый пропуск клетки BD2. В свою очередь интенсивность деформаций меняется по проходам от 0,10

до 0,71, максимальные величины присутствуют в ящичном калибре В1 0,57 второй пропуск клетки BD1 и в калибре С типа «стоячая трапеция» 0,71 третий пропуск клетки BD2. Пределы изменения интенсивности напряжений и интенсивности деформаций не превышают допустимых значений, соответствующих условиям прокатки в клетях BD1 и BD2, что дает основание говорить о достаточном запасе пластичности и возможности интенсифицировать процесс прокатки в черновых клетях.

Опираясь на данные исследования усилия прокатки остряковых рельсов по контрактной схеме с использованием моделирования в программном пакете QForm и при непосредственном замере усилия прокатки в условиях действующего производства выявлены резервы по интенсификации режимов обжатий в клетях BD1 и за счет чего можно уменьшить количество пропусков в клетях BD2. Новая схема прокатки позволит увеличить производительность при прокатке остряковых рельсов и улучшить качество выпускаемой продукции, что является одной из целей диссертации: увеличение производительности и улучшение качества остряковых рельсов за счет определения научно-обоснованных режимов формоизменения в условиях универсального рельсобалочного стана.

Материалы, приведенные в главе опубликованы в печати [101, 102, 131, 149–151, 154].

2.3 Выводы

По результате проведенных исследований прокатки остряковых рельсов типа ОР65 в клетях BD1 и BD2 универсального рельсобалочного стана с использованием компьютерного моделирования и анализа фактических данных усилия прокатки можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что контрактная схема прокатки острякового рельса типа ОР65 предложенная немецкой фирмой «SMS Meer», проводившей реконструкцию рельсобалочного стана, не отвечает требованиям производительности и качества продукции.

2. На основании результатов компьютерного моделирования с использованием программного пакета QForm и анализа экспериментальных данных усилия прокатки выявлена возможность интенсификации производства острякового рельса типа ОР65 в обжимных клетях универсального рельсобалочного стана филиал «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ».

3 Определение формоизменения металла в калибрах для прокатки асимметричных рельсовых профилей в непрерывно-реверсивной группе клеток на универсальном рельсобалочном стане

3.1 Особенности проектирования калибровки валков для прокатки асимметричных рельсовых профилей в непрерывно-реверсивной группе клеток на универсальном рельсобалочном стане

Используя опыт прокатки асимметричных рельсовых профилей на универсальном рельсобалочном стане по схеме за три прохода (Рисунок 2.1), оценку условий деформирования и размеры универсальных и вспомогательных калибров производили от чистового калибра против хода прокатки.

Особенности расчета сводятся к следующему:

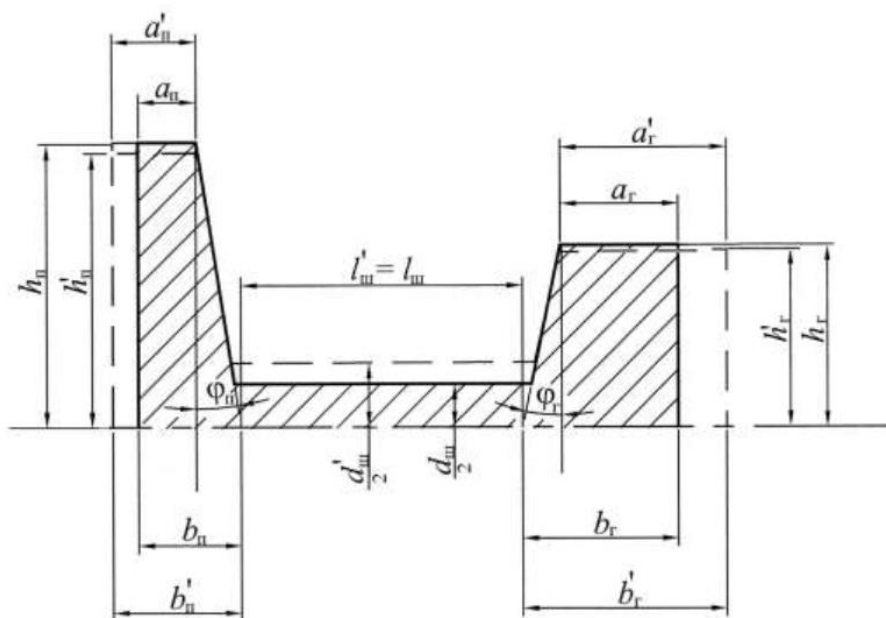
1. Устанавливают значения коэффициентов высотной деформации шейки профиля ($\frac{1}{\eta_{ш}} = \frac{d_{ш}'}{d_{ш}}$, где $d_{ш}$ и $d_{ш}'$ – толщина шейки в известном и рассчитываемом калибрах) в трех последних по ходу прокатки универсальных калибрах – чистовом (UF), предчистовом (UR3) и предшествующем предчистовому (UR2) – равными коэффициентам обжатия шейки в соответствующих калибрах при прокатке аналогичного профиля в двухвалковых калибрах (Таблица 1.3).

Коэффициент высотной деформации шейки в первом универсальном калибре (UR1) принимается в пределах $(1,00 \div 1,02) \frac{1}{\eta_{UR2}}$.

2. Коэффициенты высотной деформации шейки в двухвалковых вспомогательных калибрах (ER) клетки эджер принимаются в пределах $\frac{1}{\eta_{ER}} = 1,00 \div 1,01$, с целью выполнения заданной по калибровке необходимой асимметрии фланцев по высоте, т.к. такая операция при деформации элементов профиля в открытых вспомогательных двухвалковых калибрах может быть выполнена только при условии совместного обжатия шейки и фланцев профиля или при обеспечении равенства толщины шейки эджерного калибра и толщины шейки задаваемого в него раската.

3. При расчете универсальных калибров используется условие равенства коэффициентов вытяжки шейки, головки, подошвы рельса ($\lambda_{ш} = \lambda_{п} = \lambda_{г}$). Выполнение такого условия возможно при соотношениях коэффициентов высотной деформации шейки и обжатий фланцев головки и подошвы, которые получили при следующих допущениях (Рисунок 3.1) [6]:

- приращение фланцев подошвы и головки достаточно мало по сравнению с их высотой, и им можно пренебречь, следовательно $h'_{п} = h_{п}$ и $h'_{г} = h_{г}$;
- длина шейки между внутренними гранями фланцев не изменяется в процессе прокатки, т.е. $l'_{ш} = l_{ш}$ в калибрах UR1, UR2, UR3, ER и EF;
- уклоны внутренних граней фланцев (боковых граней горизонтального вала) не изменяются в процессе прокатки, т.е. $tg\varphi_{п} = const$ и $tg\varphi_{г} = const$.



(пунктирными линиями показан контур задаваемого профиля)

Рисунок 3.1 – Схема деформирования рельсового профиля в универсальном калибре

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 разде-

ления 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 перераспределение металла между головкой, шейкой и подошвой [17, 83].

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

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 группе клетей.

3.2 Определение формоизменения металла в универсальных четырёхвалковых калибрах для прокатки асимметричных рельсовых профилей

Как было отмечено раньше, для выполнения условия одинаковых коэффициентов вытяжек по частям профиля при проектировании универсальных калибров для получения асимметричных рельсовых профилей, калибр необходимо поделить на две части горизонтальной осью, гарантирующее равную вытяжку шейки в этих частях при формоизменении заготовки в калибре [152].

Деформирование рельсового профиля в универсальных калибрах определяется коэффициентами деформации (Рисунок 3.1) [6]: $\frac{1}{\eta_{ш}} = \frac{d_{ш}'}{d_{ш}}$ – коэффициент высотной деформации шейки профиля; $\frac{1}{\eta_{a_{\pi}}} = \frac{a_{\pi}}{a_{\pi}'}$ – коэффициент бокового обжатия фланцев подошвы у вершины; $\frac{1}{\eta_{b_{\pi}}} = \frac{b_{\pi}'}{b_{\pi}}$ – коэффициент бокового обжатия фланцев подошвы у основания; $\frac{1}{\eta_{a_{\Gamma}}} = \frac{a_{\Gamma}'}{a_{\Gamma}}$ – коэффициент бокового обжатия фланцев головки у вершины; $\frac{1}{\eta_{b_{\Gamma}}} = \frac{b_{\Gamma}'}{b_{\Gamma}}$ – коэффициент бокового обжатия фланцев головки у основания.

На Рисунке 3.2 показана схема деформирования асимметричного рельсового профиля в универсальном четырехвалковом калибре.

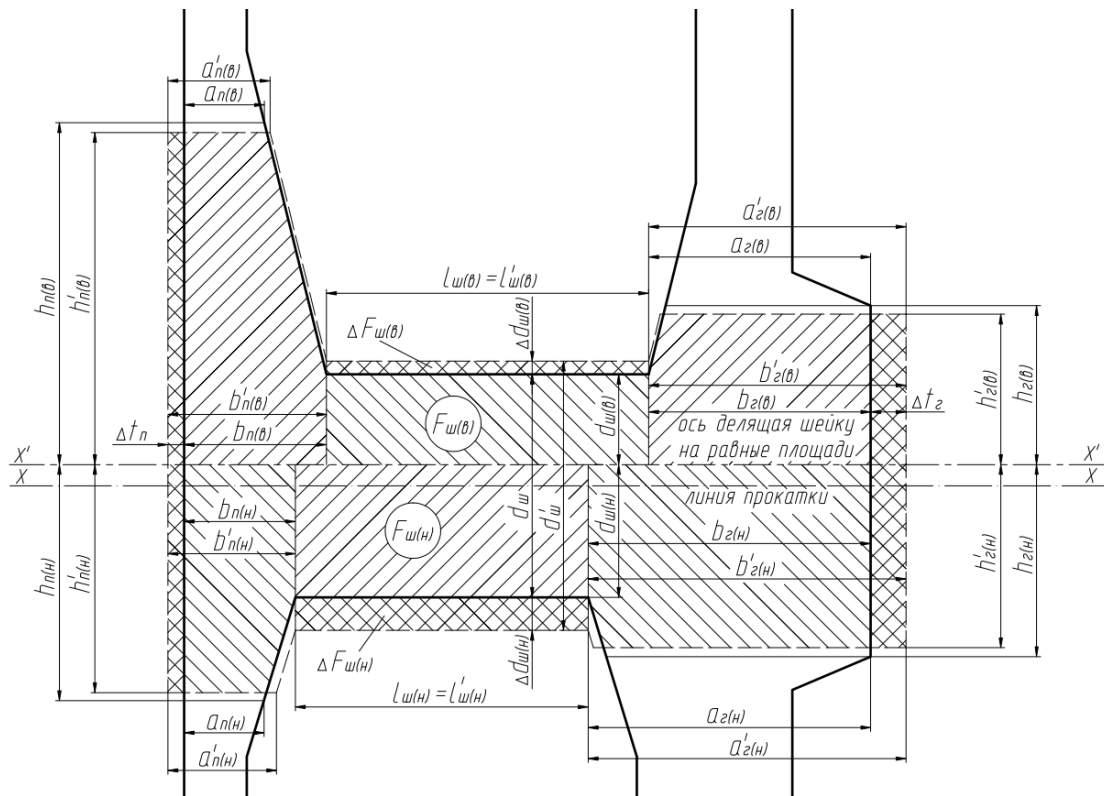


Рисунок 3.2 – Схема деформирования асимметричного рельсового раската в универсальном четырехвалковом рельсовом калибре

При поиске горизонтальной оси $X' - X'$ делящей шейку на одинаковые площади принимаем допущение о равенстве смещения площадей при деформировании шейки со стороны горизонтальных валков одинакового диаметры, но с разной шириной гребней [153].

Равенство коэффициентов вытяжек верхнего и нижнего участков шейки $\lambda_{ш(в)} = \lambda_{ш(н)}$ запишем как:

$$\frac{F'_{ш(в)}}{F_{ш(в)}} = \frac{F'_{ш(н)}}{F_{ш(н)}}, \quad (3.1)$$

где $F_{ш(в)}$ – площадь поперечного сечения верхнего участка шейки проектируемого калибра;

$F'_{ш(в)}$ – площадь поперечного сечения верхнего участка предшествующего калибра,

$F'_{ш(в)} = F_{ш(в)} + \Delta F_{ш(в)}$, где $\Delta F_{ш(в)}$ – смещаемая площадь верхнего участка шейки в проектируемом калибре;

$F_{ш(н)}$ – площадь поперечного сечения нижнего участка шейки проектируемого калибра;

$F'_{ш(н)}$ – площадь поперечного сечения нижнего участка предшествующего калибра,

$F'_{ш(н)} = F_{ш(н)} + \Delta F_{ш(н)}$, где $\Delta F_{ш(н)}$ – смещаемая площадь нижнего участка шейки в проектируемом калибре.

Коэффициент вытяжки верхнего участка шейки представим в виде:

$$\lambda_{ш(в)} = \frac{F_{ш(в)} + \Delta F_{ш(в)}}{F_{ш(в)}} \text{ или } \lambda_{ш(в)} = \frac{F_{ш(в)}}{F_{ш(в)}} + \frac{\Delta F_{ш(в)}}{F_{ш(в)}} = 1 + \frac{\Delta F_{ш(в)}}{F_{ш(в)}}.$$

Коэффициент вытяжки для нижнего участка шейки представим в виде:

$$\lambda_{ш(н)} = \frac{F_{ш(н)} + \Delta F_{ш(н)}}{F_{ш(н)}} = \frac{F_{ш(н)}}{F_{ш(н)}} + \frac{\Delta F_{ш(н)}}{F_{ш(н)}} = 1 + \frac{\Delta F_{ш(н)}}{F_{ш(н)}}.$$

Таким образом равенство $\lambda_{ш(в)} = \lambda_{ш(н)}$ можно записать таким тождественным равенством: $1 + \frac{\Delta F_{ш(в)}}{F_{ш(в)}} = 1 + \frac{\Delta F_{ш(н)}}{F_{ш(н)}}$, отсюда следует $\frac{\Delta F_{ш(в)}}{F_{ш(в)}} = \frac{\Delta F_{ш(н)}}{F_{ш(н)}}$, из условия, что $\Delta F_{ш(в)} = \Delta F_{ш(н)}$, $F_{ш(в)}$ должна быть равна $F_{ш(н)}$, т.е. $F_{ш(в)} = F_{ш(н)}$.

Разделение универсального асимметричного калибра на две части горизонтальной осью дает возможность точно определить условия формоизменения элементов профиля при соблюдении равенства коэффициентов вытяжки на верхнем и нижнем участках калибра.

Заготовка с толщиной шейки $d_{ш}'$ (Рисунок 3.2) деформируется до значения $d_{ш}$, в этом случае деформация шейки со стороны верхнего вала с шириной гребня $l_{ш(в)}$ большей ширины гребня нижнего вала $l_{ш(н)}$, в соответствии с условием равенства смещаемых площадей, изменяется на меньшую величину $\Delta d_{ш(в)}$ по сравнению с деформацией нижним валком $\Delta d_{ш(н)}$. Горизонтальная ось $X' - X'$, делит шейку калибра на равные площади $F_{ш(в)} = F_{ш(н)}$ и отстоит от гребня верхнего вала на расстоянии $d_{ш(в)}$, а от нижнего на расстоянии $d_{ш(н)}$. Ось $X - X$ — линия прокатки. Определение размещения оси $X' - X'$, по отношению гребней горизонтальных валков, с высокой достоверностью реализуется из соображений, что ось $X' - X'$ разделяет шейку калибра на две одинаковые площади. В этом случае равенство $F_{ш(в)} = F_{ш(н)}$ преобразуется к виду $l_{ш(в)} \cdot d_{ш(в)} = l_{ш(н)} \cdot d_{ш(н)}$, или $\frac{l_{ш(в)}}{l_{ш(н)}} = \frac{d_{ш(н)}}{d_{ш(в)}}$; величину $d_{ш(н)}$ находим как $d_{ш(н)} = d_{ш} - d_{ш(в)}$, отношение $\frac{d_{ш(н)}}{d_{ш(в)}}$ примет вид $\frac{d_{ш(н)}}{d_{ш(в)}} = \frac{d_{ш} - d_{ш(в)}}{d_{ш(в)}}$ отсюда $\frac{l_{ш(в)}}{l_{ш(н)}} = \frac{d_{ш} - d_{ш(в)}}{d_{ш(в)}}$ и после преобразования $\frac{l_{ш(в)}}{l_{ш(н)}} d_{ш(в)} + d_{ш(в)} = d_{ш}$ или $d_{ш(в)} \left(\frac{l_{ш(в)}}{l_{ш(н)}} + 1 \right) = d_{ш}$ таким образом:

$$d_{ш(в)} = \frac{d_{ш}}{\frac{l_{ш(в)}}{l_{ш(н)}} + 1}; \quad (3.2)$$

$$d_{ш(н)} = d_{ш} - d_{ш(в)}. \quad (3.3)$$

С учетом предложенного условия равенства смещаемых площадей при деформировании шейки со стороны верхнего и нижнего горизонтальных валков в четырехвалковом универсальном асимметричном рельсовом калибре $\Delta F_{ш(в)} = \Delta F_{ш(н)}$, были получены формулы для нахождения величины деформации шейки относительно верхнего и нижнего валков. Для этого величину смещаемых площадей шейки со стороны каждого горизонтального вала запишем следующими выражениями: $\Delta F_{ш(в)} = l_{ш(в)} \Delta d_{ш(в)}$; $\Delta F_{ш(н)} = l_{ш(н)} \Delta d_{ш(н)}$ таким образом равенство $\Delta F_{ш(в)} = \Delta F_{ш(н)}$ можно записать как $l_{ш(в)} \Delta d_{ш(в)} = l_{ш(н)} \Delta d_{ш(н)}$ или $\frac{l_{ш(в)}}{l_{ш(н)}} = \frac{\Delta d_{ш(н)}}{\Delta d_{ш(в)}}$; обозначим отношение $\frac{l_{ш(в)}}{l_{ш(н)}} = p$, тогда $\frac{\Delta d_{ш(н)}}{\Delta d_{ш(в)}}$ тоже равно p , следовательно $\Delta d_{ш(н)} =$

$p\Delta d_{ш(в)}$, обозначим суммарное обжатие шейки $\Delta d_{ш(н)} + \Delta d_{ш(в)} = q$, которая определяется как $d_{ш}' - d_{ш}$, где $d_{ш}' = d_{ш} \frac{1}{\eta_{ш}}$ (где $\frac{1}{\eta_{ш}}$ – коэффициент высотной деформации шейки в рассчитываемом калибре), тогда можно записать, что $\Delta d_{ш(в)} = q - \Delta d_{ш(н)}$. Подставляя это выражение в равенство $\Delta d_{ш(н)} = p\Delta d_{ш(в)}$ получаем $\Delta d_{ш(н)} = pq - p\Delta d_{ш(н)}$, а следовательно $\Delta d_{ш(н)} + p\Delta d_{ш(н)} = pq$ или $\Delta d_{ш(н)}(1 + p) = pq$. Таким образом:

$$\Delta d_{ш(н)} = \frac{pq}{1+p}; \quad (3.4)$$

$$\Delta d_{ш(в)} = q - \Delta d_{ш(н)}. \quad (3.5)$$

Подставляя в выражения 3.4 и 3.5 известные значения p и q определяем величину обжатия шейки со стороны верхнего и нижнего горизонтальных валков в рассчитываемом универсальном четырехвалковом калибре:

$$\Delta d_{ш(н)} = \frac{\left(d_{ш} \frac{1}{\eta_{ш}} - d_{ш}\right) \frac{l_{ш(в)}}{l_{ш(н)}}}{1 + \frac{l_{ш(в)}}{l_{ш(н)}}}; \quad (3.6)$$

$$\Delta d_{ш(в)} = \left(d_{ш} \frac{1}{\eta_{ш}} - d_{ш}\right) - \Delta d_{ш(н)}. \quad (3.7)$$

Возможность нахождения величины деформации шейки относительно верхнего и нижнего валков при прокатке асимметричных рельсовых профилей в четырехвалковом калибре дает возможность определить размеры контрольных двухвалковых открытых калибров с учетом разного приращения фланцев головки и подошвы относительно верхнего и нижнего валков при деформировании шейки. При формоизменении симметричного относительно горизонтальной оси рельсового профиля в универсальном четырехвалковом калибре линия прокатки делит профиль на две одинаковые части.

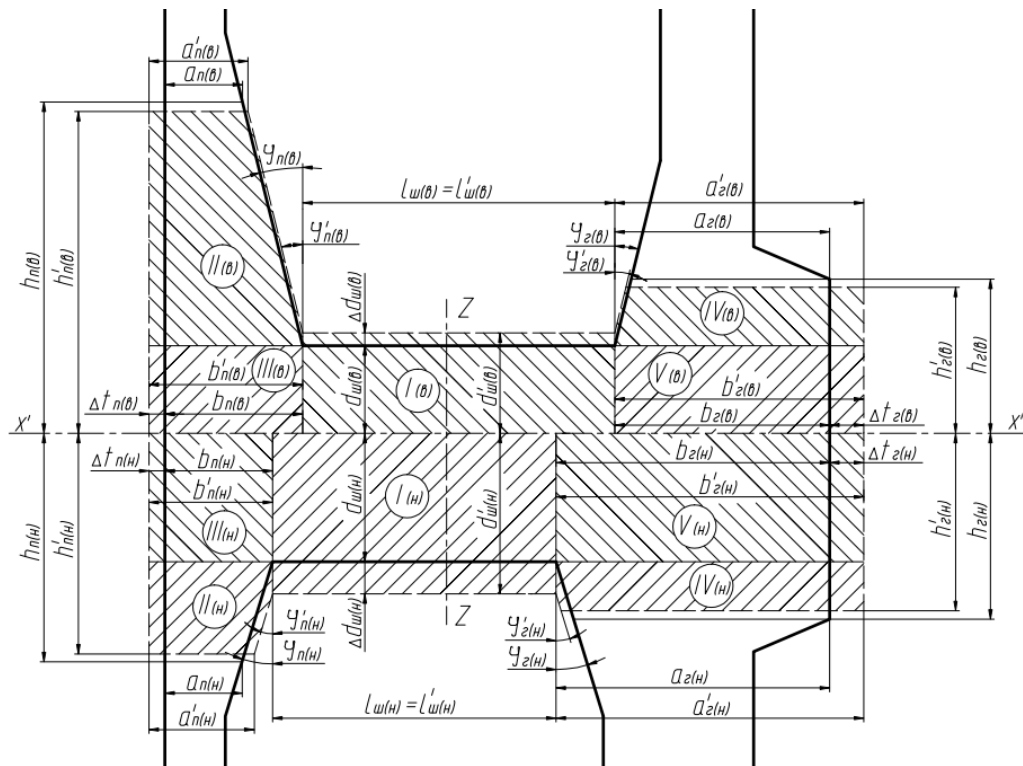
При формоизменении симметричного рельсового профиля относительно горизонтальной оси с целью упрощения расчетов можно рассматривать деформацию одной части профиля как для случая прокатки в универсальных, так и в открытых двухвалковых калибрах.

В случае прокатки асимметричных профилей информация по параметрам обжатия шейки нижним и верхним горизонтальными валками четырехвалкового

калибра дает возможность точно оценить изменение формы элементов профиля, что в свою очередь позволит обосновано определить параметры рельсовых двухвалковых открытых калибров, участвующих в прокатке. Двухвалковые открытые калибры используются в качестве подготовительного рельсового калибра в дуо-реверсивной клетки и вспомогательных (контрольных) калибрах в эджерной клетки непрерывно-реверсивной группы.

При формоизменении симметричного рельсового профиля с целью упрощения расчетов можно рассматривать деформацию одной части профиля как для случая прокатки в универсальных, так и в открытых двухвалковых калибрах.

Величину обжатия фланцев подошвы и головки в четырехвалковом калибре при формоизменении асимметричного рельсового калибра определяют исходя из информации по величине деформации в верхней и нижней части шейки этого калибра при разделении ее осью, гарантирующей одинаковые коэффициенты вытяжки частей шейки. Для этого воспользуемся геометрической моделью процесса деформирования, приведенной на Рисунке 3.3.



(пунктирными линиями показан контур задаваемого раската)

Рисунок 3.3 – Схема деформирования асимметричного рельсового профиля в четырехвалковом универсальном калибре

Профиль асимметричного острякового рельса разделим на 10 участков. Следующим этапом рассмотрим условия формоизменения каждого из участков. Шейка (участки $I_{(B)}$ и $I_{(H)}$) изменяют форму между горизонтальными валками при плоском деформируемом состоянии, т.к. $l_{ш(B)} = l'_{ш(B)}$ и $l_{ш(H)} = l'_{ш(H)}$, то отсутствует перетекание металла между элементами профиля.

При обработке участков $III_{(B)}$, $III_{(H)}$, $V_{(B)}$ и $V_{(H)}$ подошвы и головки делается допущение, что перемещение металла в сторону оси $Z - Z$ не происходит. На рассматриваемых участках подошва и головка деформируются на $\Delta t_{п(B)}$, $\Delta t_{п(H)}$, $\Delta t_{г(B)}$, $\Delta t_{г(H)}$ неприводными вертикальными валками [153].

Части $II_{(B)}$, $II_{(H)}$, $IV_{(B)}$ и $IV_{(H)}$ подошвы и головки обжимаются неприводными вертикальными валками и горизонтальными валками изменяющегося радиуса. Толщина подошвы и головки как до, так и после деформирования определяется углом наклона их внутренних граней, а величины обжатия $\Delta t_{п(B)}$, $\Delta t_{п(H)}$ и $\Delta t_{г(B)}$, $\Delta t_{г(H)}$ не меняются по высоте.

При расчете допустим, что уклоны внутренних граней подошвы и головки в процессе прокатки не изменяются:

$$tg\varphi_{п(B)} = tg\varphi'_{п(B)} = \frac{b_{п(B)} - a_{п(B)}}{h_{п(B)} - d_{ш(B)}}; \quad (3.8)$$

$$tg\varphi_{г(B)} = tg\varphi'_{г(B)} = \frac{b_{г(B)} - a_{г(B)}}{h_{г(B)} - d_{ш(B)}}; \quad (3.9)$$

$$tg\varphi_{п(H)} = tg\varphi'_{п(H)} = \frac{b_{п(H)} - a_{п(H)}}{h_{п(H)} - d_{ш(H)}}; \quad (3.10)$$

$$tg\varphi_{г(H)} = tg\varphi'_{г(H)} = \frac{b_{г(H)} - a_{г(H)}}{h_{г(H)} - d_{ш(H)}}. \quad (3.11)$$

На Рисунке 3.4 и 3.5 показаны схемы деформирования верхней и нижней частей асимметричного профиля при прокатке острякового рельса в четырехвалковом калибре, используя которую, можно найти изменение размеров фланцев головки и подошвы в различных участках калибра (пунктирными линиями отмечен контур профиля, выходящего из предыдущего калибра).

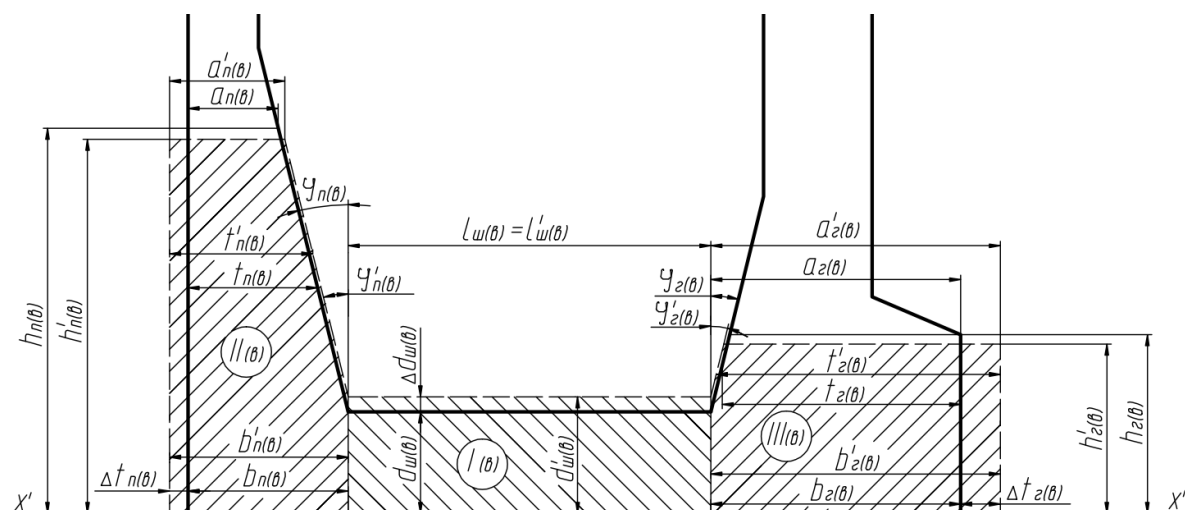


Рисунок 3.4 – Схема деформирования верхней части асимметричного профиля

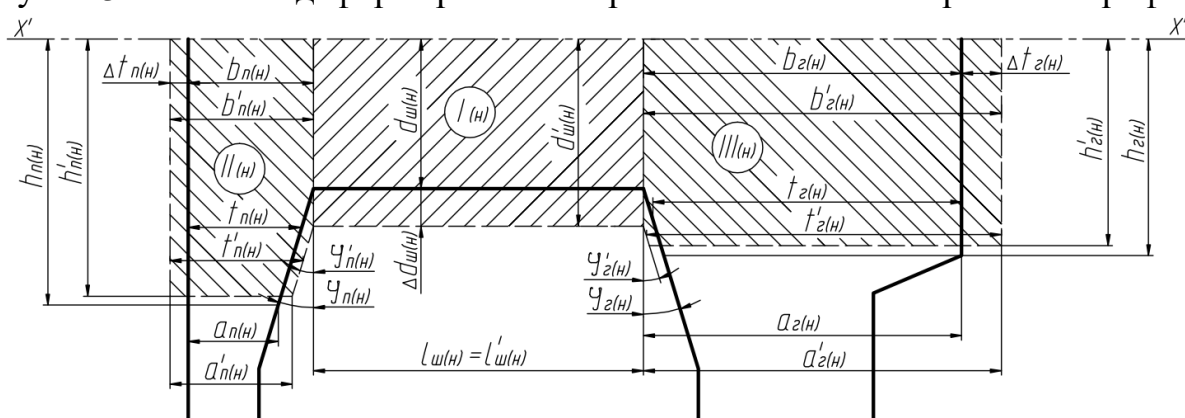


Рисунок 3.5 – Схема деформирования нижней части асимметричного профиля

Размеры фланцев подошвы и головки в предыдущем калибре можно найти по формулам:

$$t'_{п(в)} = t_{п(в)} + \Delta t_{п(в)}, \quad (3.12)$$

$$t'_{п(н)} = t_{п(н)} + \Delta t_{п(н)}, \quad (3.13)$$

$$t'_{г(в)} = t_{г(в)} + \Delta t_{г(в)}, \quad (3.14)$$

$$t'_{г(н)} = t_{г(н)} + \Delta t_{г(н)}, \quad (3.15)$$

где $t_{п(в)}$, $t_{п(н)}$ и $t_{г(в)}$, $t_{г(н)}$ – известные размеры толщины фланцев подошвы и головки в средней части их высоты после прохода.

Которые можно определить по формулам:

$$t_{п(в)} = a_{п(в)} + \left(\frac{h_{п(в)} - d_{ш(в)}}{2} \right) tg \varphi_{п(в)}; \quad (3.16)$$

$$t_{п(н)} = a_{п(н)} + \left(\frac{h_{п(н)} - d_{ш(н)}}{2} \right) tg \varphi_{п(н)}; \quad (3.17)$$

$$t_{г(в)} = a_{г(в)} + \left(\frac{h_{г(в)} - d_{г(в)}}{2} \right) tg \varphi_{г(в)}; \quad (3.18)$$

$$t_{\Gamma(H)} = a_{\Gamma(H)} + \left(\frac{h_{\Gamma(H)} - d_{\Gamma(H)}}{2} \right) tg \varphi_{\Gamma(H)}. \quad (3.19)$$

Абсолютное обжатие подошвы $\Delta t_{\Pi(B)}$, $\Delta t_{\Pi(H)}$ определяется из условия:

$\lambda_{\text{ш}(B)} = \lambda_{\Pi(B)}$, $\lambda_{\text{ш}(H)} = \lambda_{\Pi(H)}$ или

$$\frac{F'_{\text{ш}(B)}}{F_{\text{ш}(B)}} = \frac{F'_{\Pi(B)}}{F_{\Pi(B)}}, \quad (3.20)$$

$$\frac{F'_{\text{ш}(H)}}{F_{\text{ш}(H)}} = \frac{F'_{\Pi(H)}}{F_{\Pi(H)}}, \quad (3.21)$$

где $F'_{\text{ш}(B)}$ – площадь верхней части шейки до пропуска (область $I_{(B)}$);

$F_{\text{ш}(B)}$ – площадь верхней части шейки после пропуска;

$F'_{\Pi(B)}$ – площадь верхней части фланца подошвы до пропуска (участок $II_{(B)}$);

$F_{\Pi(B)}$ – площадь верхней части фланца подошвы после пропуска;

$F'_{\text{ш}(H)}$ – площадь нижней части шейки до пропуска (область $I_{(H)}$);

$F_{\text{ш}(H)}$ – площадь нижней части шейки после пропуска;

$F'_{\Pi(H)}$ – площадь нижней части фланца подошвы до пропуска (область $II_{(H)}$);

$F_{\Pi(H)}$ – площадь нижней части фланца подошвы после пропуска.

Из предположения равенства вытяжки шейки и головки для каждого участка калибра находится величина обжатия головки $\Delta t_{\Gamma(B)}$, $\Delta t_{\Gamma(H)}$:

$\lambda_{\text{ш}(B)} = \lambda_{\Gamma(B)}$, $\lambda_{\text{ш}(H)} = \lambda_{\Gamma(H)}$ или

$$\frac{F'_{\text{ш}(B)}}{F_{\text{ш}(B)}} = \frac{F'_{\Gamma(B)}}{F_{\Gamma(B)}}, \quad (3.22)$$

$$\frac{F'_{\text{ш}(H)}}{F_{\text{ш}(H)}} = \frac{F'_{\Gamma(H)}}{F_{\Gamma(H)}}, \quad (3.23)$$

где $F'_{\Gamma(B)}$ – площадь верхней части фланца головки до пропуска ($III_{(B)}$);

$F_{\Gamma(B)}$ – площадь верхней части фланца головки после пропуска;

$F'_{\Gamma(H)}$ – площадь нижней части фланца головки до пропуска ($III_{(H)}$);

$F_{\Gamma(H)}$ – площадь нижней части фланца головки после пропуска.

При неизменной длине шейки до и после пропуска ($l_{\text{ш}(B)} = l'_{\text{ш}(B)}$, $l_{\text{ш}(H)} = l'_{\text{ш}(H)}$) ее вытяжка пропорциональна обжатию:

$$\lambda_{\text{ш}(B)} = \frac{1}{\eta_{\text{ш}(B)}} = \frac{d'_{\text{ш}(B)}}{d_{\text{ш}(B)}}; \quad (3.24)$$

$$\lambda_{ш(н)} = \frac{1}{\eta_{ш(н)}} = \frac{d'_{ш(н)}}{d_{ш(н)}}; \quad (3.25)$$

Таким образом условие равенства вытяжек шейки и фланцев подошвы можно записать следующим образом:

$$\frac{d'_{ш(в)}}{d_{ш(в)}} = \frac{0,5(a'_{п(в)} + b'_{п(в)})(h'_{п(в)} - d'_{ш(в)}) + b'_{п(в)}d'_{ш(в)}}{0,5(a_{п(в)} + b_{п(в)})(h_{п(в)} - d_{ш(в)}) + b_{п(в)}d_{ш(в)}}; \quad (3.26)$$

$$\frac{d'_{ш(н)}}{d_{ш(н)}} = \frac{0,5(a'_{п(н)} + b'_{п(н)})(h'_{п(н)} - d'_{ш(н)}) + b'_{п(н)}d'_{ш(н)}}{0,5(a_{п(н)} + b_{п(н)})(h_{п(н)} - d_{ш(н)}) + b_{п(н)}d_{ш(н)}}. \quad (3.27)$$

Условие равенства вытяжек шейки и фланцев головки:

$$\frac{d'_{ш(в)}}{d_{ш(в)}} = \frac{0,5(a'_{г(в)} + b'_{г(в)})(h'_{г(в)} - d'_{ш(в)}) + b'_{г(в)}d'_{ш(в)}}{0,5(a_{г(в)} + b_{г(в)})(h_{г(в)} - d_{ш(в)}) + b_{г(в)}d_{ш(в)}}; \quad (3.28)$$

$$\frac{d'_{ш(н)}}{d_{ш(н)}} = \frac{0,5(a'_{г(н)} + b'_{г(н)})(h'_{г(н)} - d'_{ш(н)}) + b'_{г(н)}d'_{ш(н)}}{0,5(a_{г(н)} + b_{г(н)})(h_{г(н)} - d_{ш(н)}) + b_{г(н)}d_{ш(н)}}. \quad (3.29)$$

При деформации подошвы и головки имеет место увеличение или уменьшение по высоте. В силу того, что на коэффициенты увеличения (или уменьшения) фланцев подошвы ($\beta_{п(в)} = \frac{h'_{п(в)}}{h_{п(в)}}$, $\beta_{п(н)} = \frac{h'_{п(н)}}{h_{п(н)}}$) и головки ($\beta_{г(в)} = \frac{h'_{г(в)}}{h_{г(в)}}$, $\beta_{г(н)} = \frac{h'_{г(н)}}{h_{г(н)}}$) оказывает влияние много факторов их точное определение затруднено. Как следует из практики увеличение фланцев подошвы и головки незначительно по сравнению с их высотой, поэтому приращение фланцев можно не учитывать. Следовательно для расчетов задаемся условием $h'_{п(в)} = h_{п(в)}$, $h'_{п(н)} = h_{п(н)}$ и $h'_{г(в)} = h_{г(в)}$, $h'_{г(н)} = h_{г(н)}$.

С учетом принятого допущения толщину подошвы и головки задаваемого раската определяем следующим образом:

у основания

$$b'_{п(в)} = b_{п(в)} + \Delta t_{п(в)}; \quad (3.30)$$

$$b'_{г(в)} = b_{г(в)} + \Delta t_{г(в)}; \quad (3.31)$$

$$b'_{п(н)} = b_{п(н)} + \Delta t_{п(н)}; \quad (3.32)$$

$$b'_{г(н)} = b_{г(н)} + \Delta t_{г(н)}. \quad (3.33)$$

у вершины

$$a'_{п(в)} = b_{п(в)} - (h_{п(в)} - d_{ш(в)})tg\varphi_{п(в)} + \Delta t_{п(в)}; \quad (3.34)$$

$$a'_{\Gamma(B)} = b_{\Gamma(B)} - (h_{\Gamma(B)} - d_{\text{ш}(B)})tg\varphi_{\Gamma(B)} + \Delta t_{\Gamma(B)}; \quad (3.35)$$

$$a'_{\Pi(H)} = b_{\Pi(H)} - (h_{\Pi(H)} - d_{\text{ш}(H)})tg\varphi_{\Pi(H)} + \Delta t_{\Pi(H)}; \quad (3.36)$$

$$a'_{\Gamma(H)} = b_{\Gamma(H)} - (h_{\Gamma(H)} - d_{\text{ш}(H)})tg\varphi_{\Gamma(H)} + \Delta t_{\Gamma(H)}. \quad (3.37)$$

Подставляя полученные зависимости в формулы 3.26–3.29 найдем величину обжатия по подошве и головке для каждого участка калибра.

Для подошвы:

$$\begin{aligned} \frac{d'_{\text{ш}(B)}}{d_{\text{ш}(B)}} &= \frac{0,5[b_{\Pi(B)} - (h_{\Pi(B)} - d_{\text{ш}(B)})tg\varphi_{\Pi(B)} + \Delta t_{\Pi(B)} + (b_{\Pi(B)} + \Delta t_{\Pi(B)})](h_{\Pi(B)} - d'_{\text{ш}(B)}) + (b_{\Pi(B)} + \Delta t_{\Pi(B)})d'_{\text{ш}(B)}}{0,5(a_{\Pi(B)} + b_{\Pi(B)})(h_{\Pi(B)} - d_{\text{ш}(B)}) + b_{\Pi(B)}d_{\text{ш}(B)}} = \\ &= \frac{0,5[2b_{\Pi(B)} - (h_{\Pi(B)} - d_{\text{ш}(B)})tg\varphi_{\Pi(B)} + 2\Delta t_{\Pi(B)}](h_{\Pi(B)} - d'_{\text{ш}(B)}) + (b_{\Pi(B)} + \Delta t_{\Pi(B)})d'_{\text{ш}(B)}}{0,5(a_{\Pi(B)} + b_{\Pi(B)})(h_{\Pi(B)} - d_{\text{ш}(B)}) + b_{\Pi(B)}d_{\text{ш}(B)}} = \\ &= \frac{\left(b_{\Pi(B)} - \frac{(h_{\Pi(B)} - d_{\text{ш}(B)})tg\varphi_{\Pi(B)}}{2} + \Delta t_{\Pi(B)}\right)(h_{\Pi(B)} - d'_{\text{ш}(B)}) + (b_{\Pi(B)} + \Delta t_{\Pi(B)})d'_{\text{ш}(B)}}{0,5(a_{\Pi(B)} + b_{\Pi(B)})(h_{\Pi(B)} - d_{\text{ш}(B)}) + b_{\Pi(B)}d_{\text{ш}(B)}} \end{aligned} \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned} \frac{d'_{\text{ш}(H)}}{d_{\text{ш}(H)}} &= \frac{0,5[b_{\Pi(H)} - (h_{\Pi(H)} - d_{\text{ш}(H)})tg\varphi_{\Pi(H)} + \Delta t_{\Pi(H)} + (b_{\Pi(H)} + \Delta t_{\Pi(H)})](h_{\Pi(H)} - d'_{\text{ш}(H)}) + (b_{\Pi(H)} + \Delta t_{\Pi(H)})d'_{\text{ш}(H)}}{0,5(a_{\Pi(H)} + b_{\Pi(H)})(h_{\Pi(H)} - d_{\text{ш}(H)}) + b_{\Pi(H)}d_{\text{ш}(H)}} = \\ &= \frac{0,5[2b_{\Pi(H)} - (h_{\Pi(H)} - d_{\text{ш}(H)})tg\varphi_{\Pi(H)} + 2\Delta t_{\Pi(H)}](h_{\Pi(H)} - d'_{\text{ш}(H)}) + (b_{\Pi(H)} + \Delta t_{\Pi(H)})d'_{\text{ш}(H)}}{0,5(a_{\Pi(H)} + b_{\Pi(H)})(h_{\Pi(H)} - d_{\text{ш}(H)}) + b_{\Pi(H)}d_{\text{ш}(H)}} = \\ &= \frac{\left(b_{\Pi(H)} - \frac{(h_{\Pi(H)} - d_{\text{ш}(H)})tg\varphi_{\Pi(H)}}{2} + \Delta t_{\Pi(H)}\right)(h_{\Pi(H)} - d'_{\text{ш}(H)}) + (b_{\Pi(H)} + \Delta t_{\Pi(H)})d'_{\text{ш}(H)}}{0,5(a_{\Pi(H)} + b_{\Pi(H)})(h_{\Pi(H)} - d_{\text{ш}(H)}) + b_{\Pi(H)}d_{\text{ш}(H)}} \end{aligned} \quad (3.39)$$

Исходя из этих равенств рассчитывается обжатие подошвы вертикальным роликом:

$$\begin{aligned} \Delta t_{n(B)} &= \frac{\frac{d'_{\text{ш}(B)}}{d_{\text{ш}(B)}} \left[0,5(a_{n(B)} + b_{n(B)})(h_{n(B)} - d_{\text{ш}(B)}) + b_{n(B)} \cdot d_{\text{ш}(B)} \right]}{h_{n(B)}} - \\ &- \frac{\left[b_{n(B)}(h_{n(B)} - d'_{\text{ш}(B)}) - \frac{(h_{n(B)} - d_{\text{ш}(B)})(h_{n(B)} - d'_{\text{ш}(B)})tg\varphi_{n(B)}}{2} + b_{n(B)} \cdot d'_{\text{ш}(B)} \right]}{h_{n(B)}} \quad ; \end{aligned} \quad (3.40)$$

$$\begin{aligned} \Delta t_{n(H)} &= \frac{\frac{d'_{\text{ш}(H)}}{d_{\text{ш}(H)}} \left[0,5(a_{n(H)} + b_{n(H)})(h_{n(H)} - d_{\text{ш}(H)}) + b_{n(H)} \cdot d_{\text{ш}(H)} \right]}{h_{n(H)}} - \\ &- \frac{\left[b_{n(H)}(h_{n(H)} - d'_{\text{ш}(H)}) - \frac{(h_{n(H)} - d_{\text{ш}(H)})(h_{n(H)} - d'_{\text{ш}(H)})tg\varphi_{n(H)}}{2} + b_{n(H)} \cdot d'_{\text{ш}(H)} \right]}{h_{n(H)}} \quad . \end{aligned} \quad (3.41)$$

Абсолютное обжатие головки для каждой части универсального калибра находим с использованием зависимостей вида:

$$\frac{d'_{ш(В)}}{d_{ш(В)}} = \frac{0,5[b_{Г(В)} - (h_{Г(В)} - d_{ш(В)})tg\varphi_{Г(В)} + \Delta t_{Г(В)} + b_{Г(В)} + \Delta t_{Г(В)}] \cdot (h_{Г(В)} - d'_{ш(В)}) + (b_{Г(В)} + \Delta t_{Г(В)})d'_{ш(В)}}{0,5(a_{Г(В)} + b_{Г(В)})(h_{Г(В)} - d_{ш(В)}) + b_{Г(В)}d_{ш(В)}} \quad (3.42)$$

$$\frac{d'_{ш(Н)}}{d_{ш(Н)}} = \frac{0,5[b_{Г(Н)} - (h_{Г(Н)} - d_{ш(Н)})tg\varphi_{Г(Н)} + \Delta t_{Г(Н)} + b_{Г(Н)} + \Delta t_{Г(Н)}] \cdot (h_{Г(Н)} - d'_{ш(Н)}) + (b_{Г(Н)} + \Delta t_{Г(Н)})d'_{ш(Н)}}{0,5(a_{Г(Н)} + b_{Г(Н)})(h_{Г(Н)} - d_{ш(Н)}) + b_{Г(Н)}d_{ш(Н)}} \quad (3.43)$$

Исходя из этого определим $\Delta t_{Г(В)}$, $\Delta t_{Г(Н)}$:

$$\Delta t_{Г(В)} = \frac{\frac{d'_{ш(В)}}{d_{ш(В)}} [0,5(a_{Г(В)} + b_{Г(В)})(h_{Г(В)} - d_{ш(В)}) + b_{Г(В)} \cdot d_{ш(В)}]}{h_{Г(В)}} - \frac{\left[b_{Г(В)}(h_{Г(В)} - d'_{ш(В)}) - \frac{(h_{Г(В)} - d_{ш(В)})(h_{Г(В)} - d'_{ш(В)})tg\varphi_{Г(В)}}{2} + b_{Г(В)} \cdot d'_{ш(В)} \right]}{h_{Г(В)}} \quad (3.44)$$

$$\Delta t_{Г(Н)} = \frac{\frac{d'_{ш(Н)}}{d_{ш(Н)}} [0,5(a_{Г(Н)} + b_{Г(Н)})(h_{Г(Н)} - d_{ш(Н)}) + b_{Г(Н)} \cdot d_{ш(Н)}]}{h_{Г(Н)}} - \frac{\left[b_{Г(Н)}(h_{Г(Н)} - d'_{ш(Н)}) - \frac{(h_{Г(Н)} - d_{ш(Н)})(h_{Г(Н)} - d'_{ш(Н)})tg\varphi_{Г(Н)}}{2} + b_{Г(Н)} \cdot d'_{ш(Н)} \right]}{h_{Г(Н)}} \quad (3.45)$$

Применяя формулы 3.40–3.45, при полученных коэффициентах деформации шейки в четырехвалковых калибрах, можно найти величину деформации фланцев подошвы и головки профиля в разных частях калибров из допущения о равенстве коэффициентов вытяжек шейки и фланцев. При различных вычисленных значениях деформации фланцев, производимом вертикальными валками, выбирается в пределах между расчетным обжатием фланца с наибольшей площадью в соответствующем элементе профиля и средним значением расчетных обжатий фланцев этого элемента:

$$\Delta t_{п(Сmax)} > \Delta t_{п(факт.)} > \frac{\Delta t_{п(В)} + \Delta t_{п(Н)}}{2} \quad (3.46)$$

$$\Delta t_{Г(Сmax)} > \Delta t_{Г(факт.)} > \frac{\Delta t_{Г(В)} + \Delta t_{Г(Н)}}{2} \quad (3.47)$$

где $\Delta t_{п(Сmax)}$, $\Delta t_{Г(Сmax)}$ – расчетное обжатие фланца с большей площадью;

$\Delta t_{п(факт.)}$, $\Delta t_{Г(факт.)}$ – выбираемое фактическое обжатие фланцев;

$\Delta t_{п(в)}, \Delta t_{г(в)}$ – расчетное обжатие фланца в верхней части калибра;

$\Delta t_{п(н)}, \Delta t_{г(н)}$ – расчетное обжатие фланца в нижней части калибра.

Определение данной области обжатий фланцев подошвы и головки в универсальном рельсовом калибре связано с необходимостью выполнения требования к равенству коэффициентов вытяжки элементов профиля нижней и верхней части калибра по отношению к оси, разделяющей шейку на одинаковые площади. Не выполнение данного условия приводит к нестабильности выхода полосы из калибра.

При прокатке в универсальных калибрах клетей UR1 и UF обжатие фланцев подошвы и головки происходит одновременно благодаря обжатию вертикальными валками и благодаря уширению длины шейки. В этом случае при расчете обжатия фланцев выполнение условия равенства коэффициентов вытяжки элементов профиля в верхней и нижней частях калибра можно обеспечить за счет равных обжатий вертикальными валками и дополнительного обжатия фланцев со стороны шейки горизонтальным валком.

После нахождения обжатий фланцев подошвы и головки ($\Delta t_{п(факт.)}$, $\Delta t_{г(факт.)}$) находится толщина фланцев этих элементов у вершины и основания для каждой части универсального калибра, из условия что уклоны внутренних граней подошвы и головки в универсальных калибрах остаются неизменными:

$$a'_{п(в)} = a_{п(в)} + \Delta t_{п(факт.)}; \quad (3.48)$$

$$a'_{п(н)} = a_{п(н)} + \Delta t_{п(факт.)}; \quad (3.49)$$

$$a'_{г(в)} = a_{г(в)} + \Delta t_{г(факт.)}; \quad (3.50)$$

$$a'_{г(н)} = a_{г(н)} + \Delta t_{г(факт.)}; \quad (3.51)$$

$$b'_{п(в)} = b_{п(в)} + \Delta t_{п(факт.)}; \quad (3.52)$$

$$b'_{п(н)} = b_{п(н)} + \Delta t_{п(факт.)}; \quad (3.53)$$

$$b'_{г(в)} = b_{г(в)} + \Delta t_{г(факт.)}; \quad (3.54)$$

$$b'_{г(н)} = b_{г(н)} + \Delta t_{г(факт.)}. \quad (3.55)$$

Следующим этапом определяются коэффициенты обжатия фланцев подошвы и головки по основанию и вершине в каждой части универсального калибра:

$$\frac{1}{\eta_{b_{п(в)}}} = \frac{b'_{п(в)}}{b_{п(в)}}; \quad (3.56)$$

$$\frac{1}{\eta_{b_{п(н)}}} = \frac{b'_{п(н)}}{b_{п(н)}}; \quad (3.57)$$

$$\frac{1}{\eta_{b_{г(в)}}} = \frac{b'_{г(в)}}{b_{г(в)}}; \quad (3.58)$$

$$\frac{1}{\eta_{b_{г(н)}}} = \frac{b'_{г(н)}}{b_{г(н)}}; \quad (3.59)$$

$$\frac{1}{\eta_{a_{п(в)}}} = \frac{a'_{п(в)}}{a_{п(в)}}; \quad (3.60)$$

$$\frac{1}{\eta_{a_{п(н)}}} = \frac{a'_{п(н)}}{a_{п(н)}}; \quad (3.61)$$

$$\frac{1}{\eta_{a_{г(в)}}} = \frac{a'_{г(в)}}{a_{г(в)}}; \quad (3.62)$$

$$\frac{1}{\eta_{a_{г(н)}}} = \frac{a'_{г(н)}}{a_{г(н)}}. \quad (3.63)$$

Увеличение фланцев подошвы и головки для каждой части калибра целесообразно определять по формуле Ф.Е. Долженкова и др. [6]:

$$\Delta B_{п(в)} = 2,54(a'_{п(в)} + a_{п(в)}) \frac{\eta_{ш(в)} - \eta_{a_{п(в)}}}{1 - \eta_{a_{п(в)}}}; \quad (3.64)$$

$$\Delta B_{п(н)} = 2,54(a'_{п(н)} + a_{п(н)}) \frac{\eta_{ш(н)} - \eta_{a_{п(н)}}}{1 - \eta_{a_{п(н)}}}; \quad (3.65)$$

$$\Delta B_{г(в)} = 2,54(a'_{г(в)} + a_{г(в)}) \frac{\eta_{ш(в)} - \eta_{a_{г(в)}}}{1 - \eta_{a_{г(в)}}}; \quad (3.66)$$

$$\Delta B_{г(н)} = 2,54(a'_{г(н)} + a_{г(н)}) \frac{\eta_{ш(н)} - \eta_{a_{г(н)}}}{1 - \eta_{a_{г(н)}}}. \quad (3.67)$$

При получении асимметричных рельсовых профилей увеличение фланцев подошвы и головки в четырехвалковых рельсовых калибрах устанавливается исходя из оценки экспериментальных результатов изменения этих элементов в процессе деформации $\Delta h_{п} = 0 \div 2,0$ мм, $\Delta h_{г} = 0 \div 1,0$.

3.3 Определение формоизменения металла в чистовом трехвалковом универсальном калибре при прокатке асимметричных рельсовых профилей

Из анализа специальной литературы [148, 152, 153] установлено, что существующая технология прокатки рельсов на универсальных рельсобалочных станах

предусматривает окончательное формирование профиля в трехвалковом универсальном калибре чистовой клетки с вертикальным валком со стороны подошвы, а толщина шейки и ширина головки готового рельса формируются в двухвалковом участке калибра с разъемом в средней части поверхности катания головки рельса.

Данный способ прокатки рельсов в чистовом трехвалковом калибре хорошо себя зарекомендовал при производстве рельсовых профилей симметричных относительно вертикальной оси. Формирование поверхности катания головки рельса за счет свободного уширения при обжатии шейки и головки в универсальном калибре за счет симметричности профиля относительно оси прокатки, позволяет выполнить ее геометрию согласно требованиям стандарта.

Получение в чистовом трехвалковом универсальном калибре асимметричного в двух плоскостях рельсового профиля, в котором высота шейки, высота и ширина головки и подошвы асимметричны относительно вертикальной оси, а поверхность катания головки имеет сложную форму и выполняется за счет свободного уширения металла в калибре, является трудоемким процессом требующим постоянной настройки стана.

Чистовой калибр проектируется с учетом коэффициента объемной усадки профиля после прокатки.

После определения коэффициента обжатия и величины уширения шейки в чистовом калибре, осуществляется расчет предчистового калибра, который в схеме прокатки является двухвалковым открытым рельсовым калибром. Для обеспечения равномерной деформации металла по всем элементам профиля в чистовом универсальном трехвалковом калибре также, как и в четырехвалковом универсальном калибре, приняли условие равенства коэффициентов вытяжки шейки, головки и подошвы прокатываемого в нем профиля.

На Рисунке 3.6 представлена схема деформирования в трехвалковом чистовом универсальном калибре рельсового асимметричного профиля типа остряковый рельс.

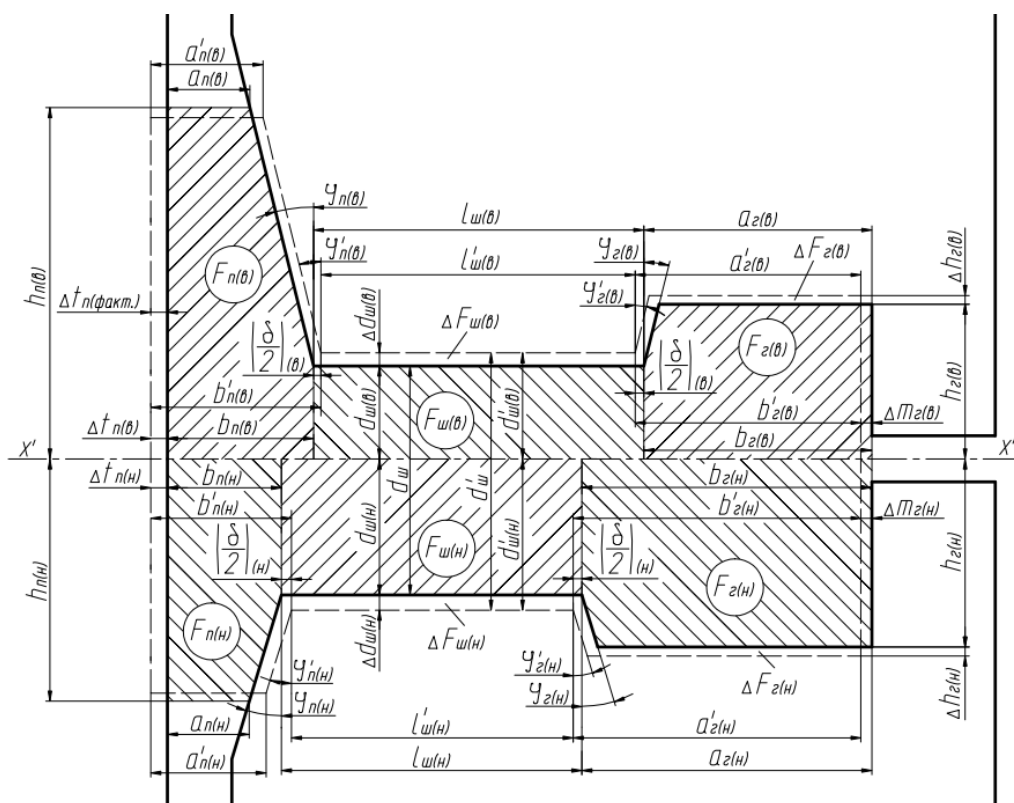


Рисунок 3.6 – Схема деформирования раската в трехвалковом чистовом универсальном калибре

Расчет элементов задаваемого в трехвалковый чистовой калибр профиля, как уже было сказано выше, осуществляется по методике, предусматривающей равенство коэффициентов вытяжек шейки, головки и подошвы в этом калибре.

Для расчета асимметричный рельсовый трехвалковый калибр делится на две части относительно горизонтальной оси обеспечивающей одинаковую площадь и вытяжку шейки в этих частях $F_{ш(в)} = F_{ш(н)}$, $\lambda_{ш(в)} = \lambda_{ш(н)}$ (Рисунок 3.2).

Расчет положения горизонтальной оси относительно гребней горизонтальных валков $d_{ш(в)}$, $d_{ш(н)}$ определяется по формулам 3.2 и 3.3. Определение величины обжатия шейки со стороны верхнего и нижнего валков $\Delta d_{ш(в)}$, $\Delta d_{ш(н)}$ осуществляется по формулам 3.4 и 3.5. Обжатие головки профиля в трехвалковом калибре производится аналогично обжатию шейки горизонтальными валками.

Для выполнения условия $\lambda_{ш(в)} = \lambda_{г(в)}$ и $\lambda_{ш(н)} = \lambda_{г(н)}$ определяются величины обжатия головки профиля в верхней и нижней частях калибра $\Delta h_{г(в)}$, $\Delta h_{г(н)}$.

Величина вытяжки шейки определяется выражением:

$$\lambda_{\text{ш(В)}} = \frac{F'_{\text{ш(В)}}}{F_{\text{ш(В)}}}; \quad (3.68)$$

$$\lambda_{\text{ш(Н)}} = \frac{F'_{\text{ш(Н)}}}{F_{\text{ш(Н)}}}; \quad (3.69)$$

$$F'_{\text{ш(В)}} = F_{\text{ш(В)}} + \Delta F_{\text{ш(В)}}; \quad (3.70)$$

$$F'_{\text{ш(Н)}} = F_{\text{ш(Н)}} + \Delta F_{\text{ш(Н)}}; \quad (3.71)$$

$$F_{\text{ш(В)}} = d_{\text{ш(В)}} l_{\text{ш(В)}}; \quad (3.72)$$

$$F_{\text{ш(Н)}} = d_{\text{ш(Н)}} l_{\text{ш(Н)}}; \quad (3.73)$$

$$\Delta F_{\text{ш(В)}} = \Delta d_{\text{ш(В)}} l'_{\text{ш(В)}}; \quad (3.74)$$

$$\Delta F_{\text{ш(Н)}} = \Delta d_{\text{ш(Н)}} l'_{\text{ш(Н)}}; \quad (3.75)$$

$$l'_{\text{ш(В)}} = l_{\text{ш(В)}} - \delta_{(\text{В})}; \quad (3.76)$$

$$l'_{\text{ш(Н)}} = l_{\text{ш(Н)}} - \delta_{(\text{Н})}, \quad (3.77)$$

где $\delta_{(\text{В})}$, $\delta_{(\text{Н})}$ – уширение верхней и нижней частей шейки соответственно.

Величина вытяжки головки определяется выражением:

$$\lambda_{\Gamma(\text{В})} = \frac{F'_{\Gamma(\text{В})}}{F_{\Gamma(\text{В})}}; \quad (3.78)$$

$$\lambda_{\Gamma(\text{Н})} = \frac{F'_{\Gamma(\text{Н})}}{F_{\Gamma(\text{Н})}}; \quad (3.79)$$

$$F'_{\Gamma(\text{В})} = F_{\Gamma(\text{В})} + \Delta F_{\Gamma(\text{В})}; \quad (3.80)$$

$$F'_{\Gamma(\text{Н})} = F_{\Gamma(\text{Н})} + \Delta F_{\Gamma(\text{Н})}; \quad (3.81)$$

$$F_{\Gamma(\text{В})} = \left(b_{\Gamma(\text{В})} d_{\text{ш(В)}} \frac{a_{\Gamma(\text{В})} + b_{\Gamma(\text{В})}}{2} \right) (h_{\Gamma(\text{В})} - d_{\text{ш(В)}}); \quad (3.82)$$

$$F_{\Gamma(\text{Н})} = \left(b_{\Gamma(\text{Н})} d_{\text{ш(Н)}} \frac{a_{\Gamma(\text{Н})} + b_{\Gamma(\text{Н})}}{2} \right) (h_{\Gamma(\text{Н})} - d_{\text{ш(Н)}}). \quad (3.83)$$

Смещение площади по верхней и нижней частям головки $\Delta F_{\Gamma(\text{В})}$ и $\Delta F_{\Gamma(\text{Н})}$ рассчитываются как площади прямоугольников со сторонами $\Delta h_{\Gamma(\text{В})}$ и $a'_{\Gamma(\text{В})}$ и $\Delta h_{\Gamma(\text{Н})}$ и $a'_{\Gamma(\text{Н})}$, что упрощает расчет и не приводит к большим погрешностям в определение величины смещаемых площадей по головке в связи с малыми величинами обжатия головки в чистовом трехвалковом калибре.

$$\Delta F_{\Gamma(\text{В})} = \Delta h_{\Gamma(\text{В})} a'_{\Gamma(\text{В})}; \quad (3.84)$$

$$\Delta F_{\Gamma(\text{Н})} = \Delta h_{\Gamma(\text{Н})} a'_{\Gamma(\text{Н})}, \quad (3.85)$$

где $\Delta h_{\Gamma(B)}$, $\Delta h_{\Gamma(H)}$ – обжатие верхней и нижней частей головки соответственно;

$$a'_{\Gamma(B)} = a_{\Gamma(B)} + \left(\frac{\delta}{2}\right)_{(B)} - \Delta m_{\Gamma(B)}; \quad (3.86)$$

$$a'_{\Gamma(H)} = a_{\Gamma(H)} + \left(\frac{\delta}{2}\right)_{(H)} - \Delta m_{\Gamma(H)}, \quad (3.87)$$

где $\Delta m_{\Gamma(B)}$, $\Delta m_{\Gamma(H)}$ – принимаемое уширение верхней и нижней частей головки соответственно.

На основе практических данных формоизменения этих элементов при прокатке $\Delta m_{\Gamma(B)}$ и $\Delta m_{\Gamma(H)}$ равно $1,0 \div 2,0$ мм.

Т.к. $\lambda_{ш(B)} = \lambda_{\Gamma(B)}$, $\lambda_{ш(H)} = \lambda_{\Gamma(H)}$, можно записать:

$$\lambda_{ш(B)} = \frac{F_{\Gamma(B)} + \Delta h_{\Gamma(B)} a'_{\Gamma(B)}}{F_{\Gamma(B)}}; \quad (3.88)$$

$$\lambda_{ш(H)} = \frac{F_{\Gamma(H)} + \Delta h_{\Gamma(H)} a'_{\Gamma(H)}}{F_{\Gamma(H)}}; \quad (3.89)$$

после преобразований:

$$\lambda_{ш(B)} F_{\Gamma(B)} = F_{\Gamma(B)} + \Delta h_{\Gamma(B)} a'_{\Gamma(B)}; \quad (3.90)$$

$$\lambda_{ш(H)} F_{\Gamma(H)} = F_{\Gamma(H)} + \Delta h_{\Gamma(H)} a'_{\Gamma(H)}; \quad (3.91)$$

$$\frac{\lambda_{ш(B)} F_{\Gamma(B)} - F_{\Gamma(B)}}{a'_{\Gamma(B)}} = \Delta h_{\Gamma(B)}; \quad (3.92)$$

$$\frac{\lambda_{ш(H)} F_{\Gamma(H)} - F_{\Gamma(H)}}{a'_{\Gamma(H)}} = \Delta h_{\Gamma(H)}; \quad (3.93)$$

$$\Delta h_{\Gamma(B)} = \frac{F_{\Gamma(B)} (\lambda_{ш(B)} - 1)}{a'_{\Gamma(B)}}; \quad (3.94)$$

$$\Delta h_{\Gamma(H)} = \frac{F_{\Gamma(H)} (\lambda_{ш(H)} - 1)}{a'_{\Gamma(H)}}. \quad (3.95)$$

В трехвалковом универсальном калибре фланцы подошвы формируются в трехвалковом участке калибра за счет обжатия подошвы вертикальными и горизонтальными валками и за счет задаваемого уширения шейки в этом калибре. Толщину фланцев подошвы в двухвалковом предчистовом калибре определяют из условия равенства вытяжек шейки и фланцев в каждой части чистового калибра разделенного относительно горизонтальной оси, обеспечивающей одинаковую площадь $F_{ш(B)} = F_{ш(H)}$ и вытяжку шейки $\lambda_{ш(B)} = \lambda_{ш(H)}$ в этих частях по формулам 3.12 и 3.13.

В связи с тем, что прокатка в чистовом трехвалковом универсальном калибре осуществляется с уширением шейки в каждой части калибра условие равенства вытяжек шейки и фланцев подошвы в этом случае можно записать следующим образом: $\lambda_{ш(в)} = \lambda_{п(в)}$, $\lambda_{ш(н)} = \lambda_{п(н)}$ или:

$$\frac{F'_{ш(в)}}{F_{ш(в)}} = \frac{F'_{п(в)}}{F_{п(в)}}, \frac{F'_{ш(н)}}{F_{ш(н)}} = \frac{F'_{п(н)}}{F_{п(н)}}, \quad (3.96)$$

где $F'_{ш(в)}$ – площадь верхней части шейки каждого рассматриваемого участка раската из предчистового калибра;

$F'_{ш(н)}$ – площадь нижней части шейки каждого рассматриваемого участка раската из предчистового калибра;

$F_{ш(в)}$ – площадь верхней части шейки каждого рассматриваемого участка раската в чистовом трехвалковом калибре;

$F_{ш(н)}$ – площадь нижней части шейки каждого рассматриваемого участка раската в чистовом трехвалковом калибре;

$F'_{п(в)}$ – площадь верхней части фланца подошвы каждого рассматриваемого участка раската из предчистового калибра;

$F'_{п(н)}$ – площадь нижней части фланца подошвы каждого рассматриваемого участка раската из предчистового калибра;

$F_{п(в)}$ – площадь верхней части фланца подошвы каждого рассматриваемого участка раската в чистовом трехвалковом калибре;

$F_{п(н)}$ – площадь нижней части фланца подошвы каждого рассматриваемого участка раската в чистовом трехвалковом калибре.

Условие равенства вытяжек шейки и фланцев подошвы для каждого участка трехвалкового калибра можно записать следующим выражением:

$$\frac{d'_{ш(в)}l'_{ш(в)}}{d_{ш(в)}l_{ш(в)}} = \frac{0,5(a'_{п(в)}+b'_{п(в)})(h_{п(в)}-d'_{ш(в)})+b'_{п(в)}d'_{ш(в)}}{0,5(a_{п(в)}+b_{п(в)})(h_{п(в)}-d_{ш(в)})+b_{п(в)}d_{ш(в)}}, \quad (3.97)$$

$$\frac{d'_{ш(н)}l'_{ш(н)}}{d_{ш(н)}l_{ш(н)}} = \frac{0,5(a'_{п(н)}+b'_{п(н)})(h_{п(н)}-d'_{ш(н)})+b'_{п(н)}d'_{ш(н)}}{0,5(a_{п(н)}+b_{п(н)})(h_{п(н)}-d_{ш(н)})+b_{п(н)}d_{ш(н)}}. \quad (3.98)$$

Данные равенства справедливы при условии, что приращение фланцев подошвы для расчетов в первом приближении не учитывается (т.к. оно достаточно

мало по сравнению с высотой фланцев). С учетом принятого допущения толщину подошвы задаваемого раската найдем по формулам 3.29–3.36:

у основания:

$$b'_{\Pi(B)} = b_{\Pi(B)} + \Delta t_{\Pi(B)} + \left(\frac{\delta}{2}\right)_{(B)}; \quad (3.99)$$

$$b'_{\Pi(H)} = b_{\Pi(H)} + \Delta t_{\Pi(H)} + \left(\frac{\delta}{2}\right)_{(H)}; \quad (3.100)$$

у вершины:

$$a'_{\Pi(B)} = b_{\Pi(B)} - (h_{\Pi(B)} - d_{\Pi(B)}) \operatorname{tg} \varphi_{\Pi(B)} + \Delta t_{\Pi(B)} + \left(\frac{\delta}{2}\right)_{(B)}; \quad (3.101)$$

$$a'_{\Pi(H)} = b_{\Pi(H)} - (h_{\Pi(H)} - d_{\Pi(H)}) \operatorname{tg} \varphi_{\Pi(H)} + \Delta t_{\Pi(H)} + \left(\frac{\delta}{2}\right)_{(H)}. \quad (3.102)$$

После определения толщины подошвы задаваемого раската условие равенства вытяжек шейки и фланцев подошвы для каждого участка трехвалкового калибра примет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{d'_{\Pi(B)} l'_{\Pi(B)}}{d_{\Pi(B)} l_{\Pi(B)}} = \\ & \frac{0,5 \left[b_{\Pi(B)} - (h_{\Pi(B)} - d_{\Pi(B)}) \operatorname{tg} \varphi_{\Pi(B)} + \Delta t_{\Pi(B)} + \left(\frac{\delta}{2}\right)_{(B)} + \left(b_{\Pi(B)} + \Delta t_{\Pi(B)} + \left(\frac{\delta}{2}\right)_{(B)} \right) \right] (h_{\Pi(B)} - d'_{\Pi(B)}) + \left(b_{\Pi(B)} + \Delta t_{\Pi(B)} + \left(\frac{\delta}{2}\right)_{(B)} \right) d'_{\Pi(B)}}{0,5 (a_{\Pi(B)} + b_{\Pi(B)}) (h_{\Pi(B)} - d_{\Pi(B)}) + b_{\Pi(B)} d_{\Pi(B)}} = \\ & \frac{0,5 [2b_{\Pi(B)} - (h_{\Pi(B)} - d_{\Pi(B)}) \operatorname{tg} \varphi_{\Pi(B)} + 2\Delta t_{\Pi(B)} + \delta_{(B)}] (h_{\Pi(B)} - d'_{\Pi(B)}) + \left(b_{\Pi(B)} + \Delta t_{\Pi(B)} + \left(\frac{\delta}{2}\right)_{(B)} \right) d'_{\Pi(B)}}{0,5 (a_{\Pi(B)} + b_{\Pi(B)}) (h_{\Pi(B)} - d_{\Pi(B)}) + b_{\Pi(B)} d_{\Pi(B)}} = \\ & \frac{\left[b_{\Pi(B)} - \left(\frac{h_{\Pi(B)} - d_{\Pi(B)}}{2} \right) \operatorname{tg} \varphi_{\Pi(B)} + \Delta t_{\Pi(B)} + \left(\frac{\delta}{2}\right)_{(B)} \right] (h_{\Pi(B)} - d'_{\Pi(B)}) + \left(b_{\Pi(B)} + \Delta t_{\Pi(B)} + \left(\frac{\delta}{2}\right)_{(B)} \right) d'_{\Pi(B)}}{0,5 (a_{\Pi(B)} + b_{\Pi(B)}) (h_{\Pi(B)} - d_{\Pi(B)}) + b_{\Pi(B)} d_{\Pi(B)}} \end{aligned} \quad (3.103)$$

$$\begin{aligned} & \frac{d'_{\Pi(H)} l'_{\Pi(H)}}{d_{\Pi(H)} l_{\Pi(H)}} = \\ & \frac{0,5 \left[b_{\Pi(H)} - (h_{\Pi(H)} - d_{\Pi(H)}) \operatorname{tg} \varphi_{\Pi(H)} + \Delta t_{\Pi(H)} + \left(\frac{\delta}{2}\right)_{(H)} + \left(b_{\Pi(H)} + \Delta t_{\Pi(H)} + \left(\frac{\delta}{2}\right)_{(H)} \right) \right] (h_{\Pi(H)} - d'_{\Pi(H)}) + \left(b_{\Pi(H)} + \Delta t_{\Pi(H)} + \left(\frac{\delta}{2}\right)_{(H)} \right) d'_{\Pi(H)}}{0,5 (a_{\Pi(H)} + b_{\Pi(H)}) (h_{\Pi(H)} - d_{\Pi(H)}) + b_{\Pi(H)} d_{\Pi(H)}} = \\ & \frac{0,5 [2b_{\Pi(H)} - (h_{\Pi(H)} - d_{\Pi(H)}) \operatorname{tg} \varphi_{\Pi(H)} + 2\Delta t_{\Pi(H)} + \delta_{(H)}] (h_{\Pi(H)} - d'_{\Pi(H)}) + \left(b_{\Pi(H)} + \Delta t_{\Pi(H)} + \left(\frac{\delta}{2}\right)_{(H)} \right) d'_{\Pi(H)}}{0,5 (a_{\Pi(H)} + b_{\Pi(H)}) (h_{\Pi(H)} - d_{\Pi(H)}) + b_{\Pi(H)} d_{\Pi(H)}} = \\ & \frac{\left[b_{\Pi(H)} - \left(\frac{h_{\Pi(H)} - d_{\Pi(H)}}{2} \right) \operatorname{tg} \varphi_{\Pi(H)} + \Delta t_{\Pi(H)} + \left(\frac{\delta}{2}\right)_{(H)} \right] (h_{\Pi(H)} - d'_{\Pi(H)}) + \left(b_{\Pi(H)} + \Delta t_{\Pi(H)} + \left(\frac{\delta}{2}\right)_{(H)} \right) d'_{\Pi(H)}}{0,5 (a_{\Pi(H)} + b_{\Pi(H)}) (h_{\Pi(H)} - d_{\Pi(H)}) + b_{\Pi(H)} d_{\Pi(H)}} \end{aligned} \quad (3.104)$$

После проведенных преобразований при условии равенства вытяжек шейки и фланцев подошвы величина обжатия подошвы для каждого участка трехвалкового калибра определяется из выражений:

$$\Delta t_{n(B)} = \frac{\frac{d'_{u(B)} l'_{u(B)}}{d_{u(B)} l_{u(B)}} \left[0,5(a_{n(B)} + b_{n(B)})(h_{n(B)} - d_{u(B)}) + b_{n(B)} d_{n(B)} \right]}{h_{n(B)}} -$$

$$\frac{\left[\left(b_{n(B)} + \left(\frac{\delta}{2} \right)_{(B)} - \frac{h_{n(B)} - d_{u(B)}}{2} \operatorname{tg} \varphi_{n(B)} \right) (h_{n(B)} - d'_{u(B)}) \right] + b_{n(B)} d'_{u(B)} + \left(\frac{\delta}{2} \right)_{(B)} d'_{u(B)}}{h_{n(B)}} \quad (3.105)$$

$$\Delta t_{n(H)} = \frac{\frac{d'_{u(H)} l'_{u(H)}}{d_{u(H)} l_{u(H)}} \left[0,5(a_{n(H)} + b_{n(H)})(h_{n(H)} - d_{u(H)}) + b_{n(H)} d_{n(H)} \right]}{h_{n(H)}} -$$

$$\frac{\left[\left(b_{n(H)} + \left(\frac{\delta}{2} \right)_{(H)} \right) (h_{n(H)} - d'_{u(H)}) \right] - \frac{h_{n(H)} - d_{u(H)}}{2} (h_{n(H)} - d'_{u(H)}) \operatorname{tg} \varphi_{n(H)} + b_{n(H)} d'_{u(H)} + \left(\frac{\delta}{2} \right)_{(B)} d'_{u(B)}}{h_{n(H)}} \quad (3.106)$$

Таким образом по формулам 3.105 и 3.106 рассчитывается обжатие фланцев подошвы в верхней и нижней частях универсального трехвалкового калибра, в котором предусмотрено уширение шейки профиля.

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 их выравнивания можно осуществлять подбор уширения шейки в верхней и нижней частях калибра. При невозможности использования такого приема, единую величину обжатия фланцев подошвы со стороны вертикального вала для обеих частей калибра устанавливают в диапазоне между расчетным обжатием наиболее объемного из соответствующих рассчитываемых элементов профиля и средним значением расчетных обжатий фланцев в верхней и нижней частях калибра $\Delta t_{п(сmax)} > \Delta t_{п(факт.)} > \frac{\Delta t_{п(в)} + \Delta t_{п(н)}}{2}$.

При использовании в качестве чистового калибра для окончательного формирования асимметричного рельсового профиля, четырехвалкового универсального калибра (Рисунок 3.7), расчет обжатия головки в нем осуществляется аналогично расчету подошвы для трехвалкового калибра.

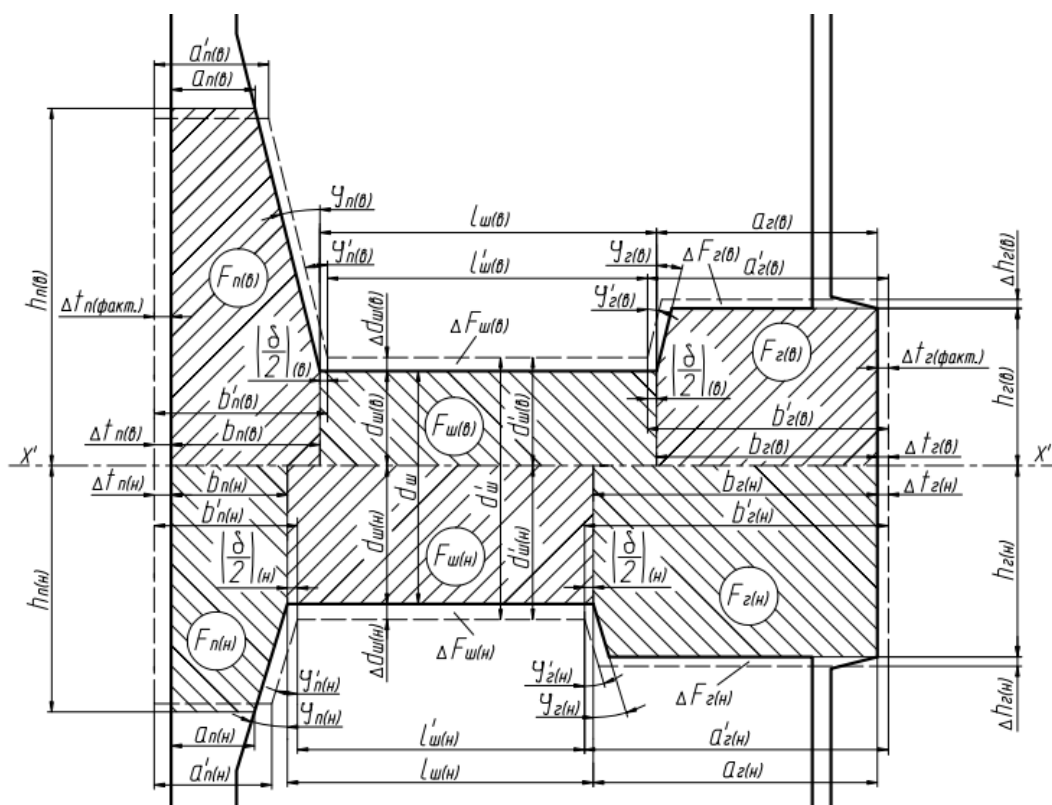


Рисунок 3.7 – Схема деформирования рельсового асимметричного профиля в четырехвалковом универсальном калибре с уширением шейки профиля

Для этого расчет предчистового двухвалкового калибра проведем с увеличением ширины и уменьшением высоты головки для выполнения условия равенства вытяжек шейки и фланцев подошвы и головки профиля в чистовом калибре: $\lambda_{ш(в)} = \lambda_{п(в)} = \lambda_{г(в)}$; $\lambda_{ш(н)} = \lambda_{п(н)} = \lambda_{г(н)}$, т.к. $\lambda_{ш(в)} = \lambda_{ш(н)}$, то первоначальный расчет осуществляется при выполнении условия: $\lambda_{ш(в)} = \lambda_{ш(н)} = \lambda_{п(в)} = \lambda_{п(н)} = \lambda_{г(в)} = \lambda_{г(н)}$.

Величину обжатия фланцев в головке верхней и нижней частей в чистовом четырехвалковом калибре, в котором предусматривается уширение шейки профиля, осуществляют по следующей зависимости:

$$\Delta t_{г(в)} = \frac{\frac{d'_{ш(в)} l'_{ш(в)}}{d_{ш(в)} l_{ш(в)}} \left[0,5(a_{г(в)} + b_{г(в)})(h_{г(в)} - d_{ш(в)}) + b_{г(в)} d_{ш(в)} \right]}{h_{г(в)}} - \frac{\left[\left(b_{г(в)} - \left(\frac{h_{г(в)} - d_{ш(в)}}{2} \right) \operatorname{tg} \varphi_{г(в)} + \left(\frac{\delta}{2} \right)_{(в)} \right) (h_{г(в)} - d'_{ш(в)}) + \left(b_{г(в)} + \left(\frac{\delta}{2} \right)_{(в)} \right) d'_{ш(в)} \right]}{h_{г(в)}} \quad (3.107)$$

$$\Delta t_{\Gamma(H)} = \frac{\frac{d'_{w(H)} l'_{w(H)}}{d_{w(H)} l_{w(H)}} \left[0,5(a_{\Gamma(H)} + b_{\Gamma(H)})(h_{\Gamma(H)} - d_{w(H)}) + b_{\Gamma(H)} d_{w(H)} \right]}{h_{\Gamma(H)}} - \frac{\left[\left(b_{\Gamma(H)} - \left(\frac{h_{\Gamma(H)} - d_{w(H)}}{2} \right) \operatorname{tg} \varphi_{\Gamma(H)} + \left(\frac{\delta}{2} \right)_{(H)} \right) (h_{\Gamma(H)} - d'_{w(H)}) + \left(b_{\Gamma(H)} + \left(\frac{\delta}{2} \right)_{(H)} \right) d'_{w(H)} \right]}{h_{\Gamma(H)}} \quad (3.108)$$

В случае, если расчетная величина обжатий фланцев головки вертикальным валков в верхней и нижней частях калибра будет неодинаковой, то приведение обжатий к равной величине со стороны вертикального валка можно осуществить путем подбора уширения шеек в верхней и нижней частях калибра.

При невозможности использования такого приема, одинаковую величину обжатия фланцев со стороны вертикального валка для обеих частей калибра устанавливают в диапазоне между расчетным обжатием наиболее, объемного из рассчитываемых соответствующих элементов профиля и средним значением расчетных обжатий фланцев в верхней и нижней частях этого калибра $\Delta t_{\Gamma(Smax)} > \Delta t_{\Gamma(\text{факт.})} > \frac{\Delta t_{\Gamma(B)} + \Delta t_{\Gamma(H)}}{2}$.

3.4 Определение формоизменения металла в двухвалковых (вспомогательных) калибрах эджерной клетки при прокатке асимметричных рельсовых профилей

В схеме прокатки асимметричных рельсовых профилей в непрерывно-реверсивной группе клеток после универсальных четырехвалковых калибрах UR1 и UR3 раскат контролируется в промежуточном двухвалковом (вспомогательном) калибре и предчистовом двухвалковом калибре. После расчета деформационных параметров элементов в чистовом трехвалковом универсальном калибре проектируется предчистовой двухвалковый калибр эджерной клетки EF, а после расчета деформационных параметров в четырехвалковом универсальном калибре UR2 проектируется промежуточный двухвалковый калибр ER.

На Рисунке 3.8 в упрощенном виде представлена схема деформирования раската в двухвалковом калибре.

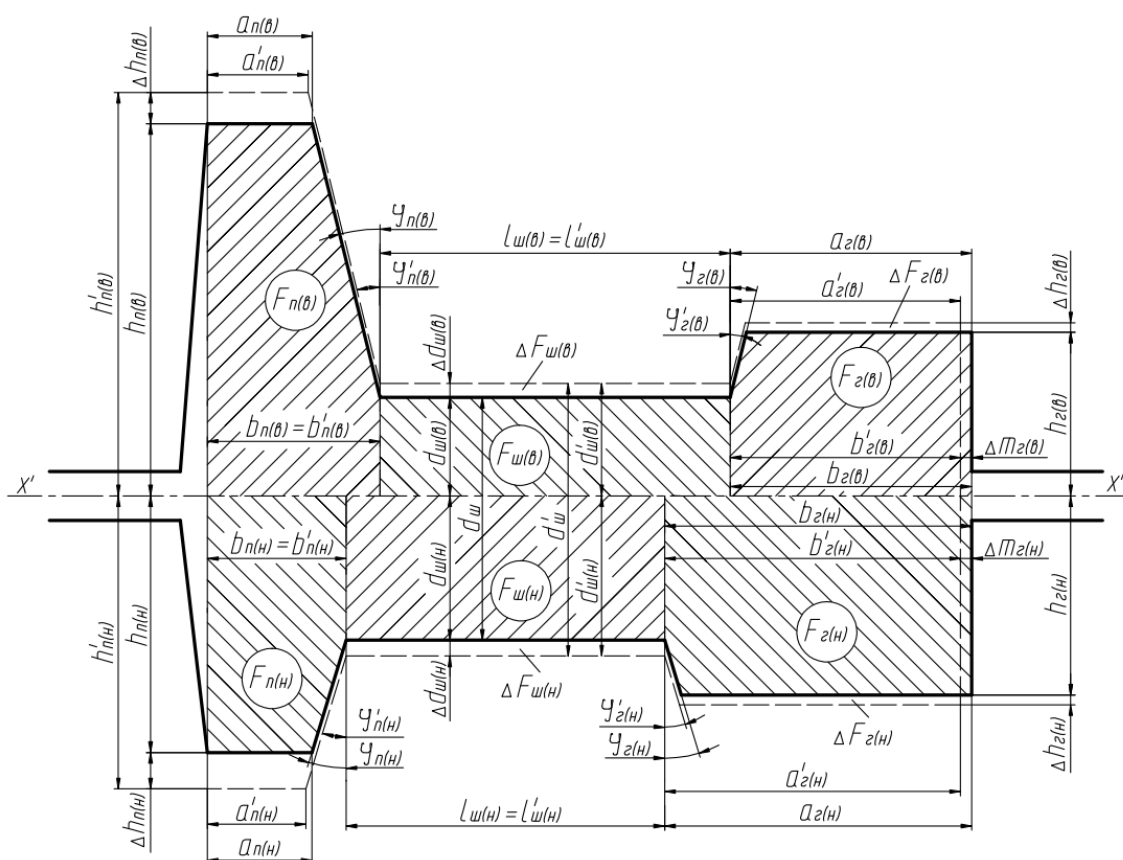


Рисунок 3.8 – Схема деформирования рельсового асимметричного профиля в двухвалковом вспомогательном калибре

Обжатия головки и подошвы в двухвалковых вспомогательных калибрах осуществляется аналогично обжатию шейки. Для выполнения условия $\lambda_{ш(в)} = \lambda_{п(в)} = \lambda_{г(в)}$ и $\lambda_{ш(н)} = \lambda_{п(н)} = \lambda_{г(н)}$, где $\lambda_{ш(в)} = \lambda_{ш(н)}$, определяются величины обжатия головки и подошвы профиля в верхней и нижней частях калибра $\Delta h_{г(в)}$, $\Delta h_{г(н)}$, $\Delta h_{п(в)}$, $\Delta h_{п(н)}$.

Расчет обжатия головки осуществляется по формулам 3.94 и 3.95.

Для верхней части:

$$\Delta h_{г(в)} = \frac{F_{г(в)}(\lambda_{ш(в)} - 1)}{a'_{г(в)}}, \quad (3.109)$$

где $F_{г(в)}$ – площадь верхней части головки двухвалкового калибра эджерной клетки.

$$a'_{г(в)} = a_{г(в)} - \Delta m_{г(в)}, \quad (3.110)$$

где $\Delta m_{\Gamma(B)}$ – принимаемая величина уширения головки в верхней части калибра (в пределах $1,0 \div 2,0$ мм).

Для нижней части:

$$\Delta h_{\Gamma(H)} = \frac{F_{\Gamma(H)}(\lambda_{\text{ш}(H)} - 1)}{a'_{\Gamma(H)}}, \quad (3.111)$$

где $F_{\Gamma(H)}$ – площадь нижней части головки двухвалкового калибра эджерной клетки.

$$a'_{\Gamma(H)} = a_{\Gamma(H)} - \Delta m_{(H)}, \quad (3.112)$$

где $\Delta m_{(H)}$ – принимаемая величина уширения головки в нижней части калибра (в пределах $1,0 \div 2,0$ мм).

Схема обжатия подошвы в этом калибре аналогична обжатию шейки и головки.

Величина вытяжки верхней и нижней частей подошвы в двухвалковом калибре определяется как отношение площадей соответствующих элементов профиля в предыдущем универсальном четырехвалковом калибре и рассматриваемом двухвалковом. Площади верхней и нижней частей подошвы в двухвалковом, трехвалковом и четырехвалковом калибрах определяются как сумма прямоугольника и трапеции относительно оси калибра $X' - X'$, обеспечивающей одинаковую вытяжку частей шейки профиля в этих калибрах. Зная высоту фланцев подошвы и толщину шейки в каждой части калибра определяется площадь фланцев подошвы в каждой его части.

Величина вытяжки подошвы со стороны верхней части калибра определяется по выражению:

$$\lambda_{\Pi(B)} = \frac{F'_{\Pi(B)}}{F_{\Pi(B)}}; \quad (3.113)$$

$$F_{\Pi(B)} = d_{\text{ш}(B)} b_{\Pi(B)} + \frac{b_{\Pi(B)} + a_{\Pi(B)}}{2} (h_{\Pi(B)} - d_{\text{ш}(B)}); \quad (3.114)$$

$$F'_{\Pi(B)} = F_{\Pi(B)} + \Delta h_{\Pi(B)} \frac{a'_{\Pi(B)} + a_{\Pi(B)}}{2}. \quad (3.115)$$

При условии $\lambda_{\text{ш}(B)} = \lambda_{\Pi(B)}$, можно записать:

$$\lambda_{\text{ш}(B)} = \frac{F_{\Pi(B)} + \Delta h_{\Pi(B)} \frac{a'_{\Pi(B)} + a_{\Pi(B)}}{2}}{F_{\Pi(B)}}. \quad (3.116)$$

После преобразования высота обжатия фланца подошвы верхней части калибра рассчитывается по следующей зависимости:

$$\Delta h_{П(В)} = \frac{2F_{П(В)}(\lambda_{Ш(В)} - 1)}{\alpha'_{П(В)} + \alpha_{П(В)}}. \quad (3.117)$$

Аналогичным образом определяется обжатие подошвы со стороны нижней части калибра:

$$\Delta h_{П(Н)} = \frac{2F_{П(Н)}(\lambda_{Ш(Н)} - 1)}{\alpha'_{П(Н)} + \alpha_{П(Н)}}. \quad (3.118)$$

В зависимостях 3.117 и 3.118 по определению обжатий фланцев подошвы в верхней и нижней частях калибра величины $\alpha'_{П(В)}$ и $\alpha'_{П(Н)}$ являются величинами неизвестными. Для упрощения расчетов смещаемых площадей в верхней и нижней частях подошвы профиля в двухвалковом калибре площади трапеций заменяются площадями прямоугольников со сторонами $a_{П(В)}\Delta h_{П(В)}$ и $a_{П(Н)}\Delta h_{П(Н)}$, что не приводит к большим погрешностям (не более 3%) в определение величины смещаемых площадей по подошве в связи с незначительными величинами обжатия подошвы. В этом случае предварительные обжатия подошвы со стороны верхней и нижней частей подошвы в двухвалковом калибре будут рассчитываться по следующим зависимостям:

$$\Delta h_{П(В)} = \frac{F_{П(В)}(\lambda_{Ш(В)} - 1)}{a_{П(В)}}; \quad (3.119)$$

$$\Delta h_{П(Н)} = \frac{F_{П(Н)}(\lambda_{Ш(Н)} - 1)}{a_{П(Н)}}. \quad (3.120)$$

После определения обжатий фланцев головки и подошвы в двухвалковом вспомогательном калибре проектируется предыдущий по ходу прокатки универсальный четырехвалковый калибр.

Расчет обжатий головки и подошвы в этом калибре при задаваемом коэффициенте обжатия шейки осуществляется согласно расчету четырехвалкового калибра по формулам 3.40–3.45.

3.5 Алгоритм проектирования калибровок валков асимметричных рельсовых профилей в непрерывно-реверсивной группе клетей

Для облегчения практического использования разработанных методик расчета калибровок асимметричных рельсовых профилей, с использованием непрерывно-реверсивной прокатки в универсальных клетях, предлагается приведенный ниже обобщенный алгоритм расчетов.

1. Устанавливают значения коэффициентов высотной деформации шейки профиля ($\frac{1}{\eta_{ш}} = \frac{d_{ш}'}{d_{ш}}$, где $d_{ш}$ и $d_{ш}'$ – толщина шейки в известном и рассчитываемом калибрах) в трех последних по ходу прокатки универсальных калибрах – чистовом (UF), предчистовом (UR3) и предшествующем предчистовому (UR2) – равными коэффициентам обжатия шейки в соответствующих калибрах при прокатке аналогичного профиля в двухвалковых калибрах (Таблица 1.1).

Коэффициент высотной деформации шейки в первом универсальном калибре (UR1) принимается в пределах $(1,00 \div 1,02) \frac{1}{\eta_{UR2}}$.

2. Коэффициенты высотной деформации шейки в двухвалковых вспомогательных калибрах ER клетки эджер принимаются в пределах $\frac{1}{\eta_{ER}} = 1,00 \div 1,01$, с целью выполнения заданной по калибровке необходимой асимметрии фланцев по высоте, т.к. такая операция при деформации элементов профиля в открытых вспомогательных двухвалковых калибрах может быть выполнена только при условии совместного обжатия шейки и фланцев профиля или при обеспечении равенства толщины шейки эджерного калибра и толщины шейки задаваемого в него раската.

3. При расчета универсальных калибров используется условие равенства коэффициентов вытяжки шейки, головки, подошвы рельса ($\lambda_{ш} = \lambda_{п} = \lambda_{г}$). Данное положение достигается при определенных соотношениях коэффициентов высотной деформации шейки и обжатий фланцев головки и подошвы, которые получили при следующих допущениях (Рисунок 3.1) [6]:

- приращение фланцев подошвы и головки достаточно мало по сравнению с их высотой, и им можно пренебречь, следовательно $h'_п = h_п$ и $h'_г = h_г$;
- длина шейки между внутренними гранями фланцев не изменяется в процессе прокатки, т.е. $l'_ш = l_ш$ в калибрах UR1, UR2, UR3, ER и EF;
- уклоны внутренних граней фланцев (боковых граней горизонтального вала) не изменяются в процессе прокатки, т.е. $tg\varphi_п = const$ и $tg\varphi_г = const$.

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.

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 перераспределение металла между головкой, шейкой и подошвой [17, 83].

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

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 клеток.

С учетом температурного расширения и допускаемых отклонений определяют размеры готового профиля и соответствующие размеры чистового калибра.

Размеры калибров и формоизменение металла рассчитывают против направления прокатки от чистового прохода. От вида применяемых калибров зависит последовательность расчета: универсальных вспомогательных и двухвалковых рельсовых.

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 обеспечивающей одинаковую площадь и вытяжку шейки в этих частях $F_{ш(в)} = F_{ш(н)}$ и $\lambda_{ш(в)} = \lambda_{ш(н)}$.

Расчет положения горизонтальной оси относительно гребней горизонтальных валков определяется по формулам 3.2 и 3.3. Определение величины обжатия шейки со стороны верхнего и нижнего валков $\Delta d_{ш(в)}$, $\Delta d_{ш(н)}$ по формулам 3.6 и 3.7.

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 3.94 и 3.95.

Для выполнения условия $\lambda_{ш(в)} = \lambda_{п(в)}$ и $\lambda_{ш(н)} = \lambda_{п(н)}$, определяют величины обжатий подошвы для каждого участка трехвалкового калибра по формулам 3.105 и 3.106.

В случае, если расчетные величины обжатий фланцев подошвы в верхней и нижней частях калибра со стороны вертикального валка при принятых уширениях шейки не будут равны, то в этом случае для обеих частей калибра устанавливают обжатия подошвы в диапазоне по формуле 3.46.

При использовании в качестве чистового калибра для окончательного формирования асимметричного рельсового профиля четырехвалкового универсального калибра, расчет обжатия головки в нем осуществляют аналогично расчету подошвы для трехвалкового калибра. Величину обжатия фланцев головки в верхней и нижней частях в чистовом четырехвалковом калибре осуществляют по формулам 3.107 и 3.108.

б) двухвалковые (вспомогательные) калибры эджерной клетки

При расчете против хода прокатки двухвалковых калибров за исходный профиль принимают:

- чистовой рельсовый профиль, полученный в результате расчета трехвалкового универсального калибра или в результате расчета четырехвалкового универсального калибра;
- промежуточный рельсовый профиль, полученный в результате расчета четырехвалкового универсального калибра UR2.

Обжатие головки и подошвы в двухвалковых вспомогательных калибрах осуществляются аналогично обжатию шейки. Для выполнения условия $\lambda_{ш(в)} = \lambda_{п(в)} = \lambda_{г(в)}$ и $\lambda_{ш(н)} = \lambda_{п(н)} = \lambda_{г(н)}$ расчет обжатия головки осуществляют по формулам 3.94 и 3.95, а подошвы по формулам 3.119 и 3.120, предварительно рассчитывают обжатие шейки по формуле 3.6 и 3.7.

в) универсальные четырехвалковые калибры

Формоизменение металла в универсальных четырехвалковых калибрах рассчитывают в следующем порядке:

- определяют по формулам 3.6 и 3.7 коэффициенты обжатия шейки со стороны верхнего и нижнего валков;
- определяют величину бокового обжатия головки и подошвы по формулам 3.40, 3.41, 3.44 и 3.45. При различных расчетных значениях деформации фланцев профиля, производимые 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 3.46 и 3.47;
- по формулам 3.48–3.55 определяют толщины фланцев головки и подошвы для каждой части универсального калибра;
- по формулам 3.56–3.63 рассчитывают коэффициенты бокового обжатия фланцев подошвы и головки по основанию и вершине в каждой части универсального калибра;

- при получении асимметричных рельсовых профилей увеличение фланцев подошвы и головки в четырехвалковых рельсовых калибрах устанавливается исходя из анализа экспериментальных данных формоизменения этих элементов при прокатке $\Delta h_{\text{п}} = 0 \div 2,0$ мм, $\Delta h_{\text{г}} = 0 \div 1,0$;

- расчеты выполняют последовательно для каждого калибра против направления прокатки до получения чернового рельсового профиля, выдаваемого из двухвалкового рельсового калибра.

Материалы, приведенные в главе опубликованы в печати [148, 152, 155–158, 162, 164].

3.6 Выводы

1. Впервые предложена геометрическая модель прокатки асимметричных рельсовых профилей в универсальных четырех, трехвалковых калибрах, позволяющая выполнить равенство коэффициентов вытяжки в нижней и верхней частях калибра, относительно горизонтальной оси, разделяющей шейку калибра на одинаковые площади.

2. Разработана отсутствующая в литературе методика расчета формоизменения металла в универсальных четырехвалковых, универсальных трехвалковых и двухвалковых (вспомогательных) калибров в непрерывно-реверсивной группе клеток для прокатки асимметричных рельсовых профилей.

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

4 Внедрение результатов диссертационной работы

4.1 Внедрение рациональных способов прокатки асимметричных рельсовых профилей на универсальном рельсобалочном стане филиал «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ»

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» занимающие в сортаменте РБЦ 4% (25000 т за 2025 г.).

Для проектирования калибровки асимметричных рельсовых профилей использовали рассмотренный в предыдущей главе подход.

На основе представленных в работе методик формоизменения металла в универсальных и вспомогательных двухвалковых калибрах и способов прокатки асимметричных рельсовых профилей разработаны рациональные калибровки и режимы прокатки асимметричных рельсовых профилей на универсальном рельсобалочном стане филиал «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ». В частности, был предложен способ прокатки несимметричных рельсовых профилей в черновых калибрах. Разработанный способ прокатки несимметричных рельсовых профилей защищен патентом РФ 2721968 [1]. С целью четкого формирования сложной поверхности катания головки профиля усовиковых рельсов типа УР65 и заготовки трамвайных рельсов Т62 разработан способ прокатки рельсов в котором в качестве чистового калибра вместо общепринятого трехвалкового универсального калибра используется четырехвалковый универсальный калибр. Разработанный способ прокатки рельсов защищен патентом РФ 2627140 [2].

4.2 Совершенствование калибровки валков и режима прокатки остряковых рельсов типа ОР65 на универсальном рельсобалочном стане

С целью устранения недостатков действующей калибровки остряковых рельсов типа ОР65 на универсальном рельсобалочном стане с учетом проведенных исследований, рассмотренных в предыдущих главах необходимо выполнить следующее:

1) разработать усовершенствованную схему прокатки в черновых клетях, которая отличается от действующей, переносом трапециевидного осевого калибра с клетки BD2 в клетку BD1, что позволит исключить два пропуска в клетки BD2 и увеличением обжатий в прямоугольных калибрах клетки BD1;

2) заменить прямой закрытый рельсовый калибр клетки BD2 на косой закрытый рельсовый калибр.

Предлагаемая усовершенствованная схема для прокатки остряковых рельсов приведена на Рисунке 4.1.

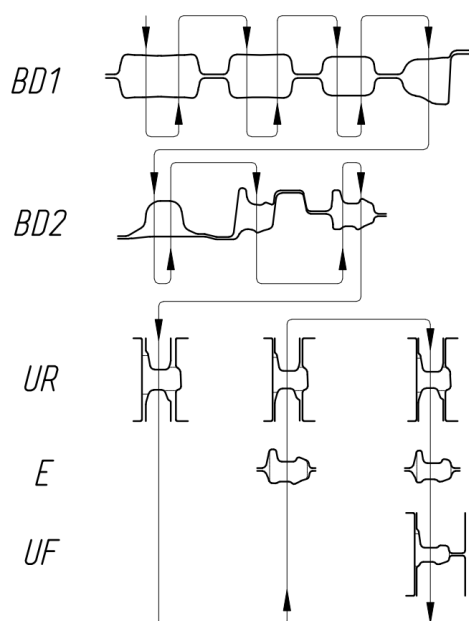


Рисунок 4.1 – Усовершенствованная последовательность получения рельсов ОР65 на универсальном рельсобалочном стане филиал «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ»

В Таблице 4.1 представлены расчетные данные по формированию профиля острякового рельса ОР65 в клетях BD1 и BD2 по предлагаемой усовершенствованной схеме.

Таблица 4.1 – Усовершенствованная схема формирования рельсов типа ОР65 в клетях BD1 и BD2

Пропуск	Клеть	Калибр	Форма калибра	Размеры, мм		Обжатие	Уширение	Сечение раската	Относительное уменьшение площади	Коэффициент вытяжки	Кантовка
				В	Н	мм	мм	мм ²	%		
1	BD1	B1		305	300	65	5	91157	17,72	1,215	1
2		B1		315	240	65	15	75257	17,44	1,211	1
3		B2		252	252	63	12	63161	16,07	1,192	1
4		B2		262	207	45	10	53891	14,68	1,172	1
5		B3		217	197	65	10	42406	21,31	1,271	1
6		B3		204	180	37	7	36377	14,22	1,166	1
7		D		194	187,2	11	14	31276	14,02	1,163	1
1	BD2	C		209	157	40	15	24513	21,62	1,276	1
2		C		219	147	11	7	23418	4,47	1,047	0
3		B		156	104	56,3	13	19519	16,65	1,200	1
4		A		162,5	95,5	10,7	7,5	18471	5,37	1,057	0
5		A		163,5	94,5	1	0	18308	0,88	1,009	0

1 – означает кантовка на 90° перед пропуском; 0 – отсутствие кантовки

На Рисунке 4.1 показана новая разработанная схема калибровки валков при прокатке остроговых рельсов типа ОР65 на универсальном рельсобалочном стане филиал «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ».

Используя коэффициенты высотного обжатия шейки в калибрах непрерывно-реверсивной группы можно найти толщину шейки в каждом из используемых калибров, а также в калибрах обжимной реверсивной клетки.

Величину обжатия шейки со стороны верхнего и нижнего валков в универсальных калибрах непрерывно-реверсивной группе клеток рассчитывают по разработанной методике проектирования формоизменения металла для асимметричных рельсовых профилей. На Рисунке 4.2 и Таблице 4.2 представлены расчетные значения размеров раската в непрерывно-реверсивной группе клеток при прокатке остроговых рельсов типа ОР65.

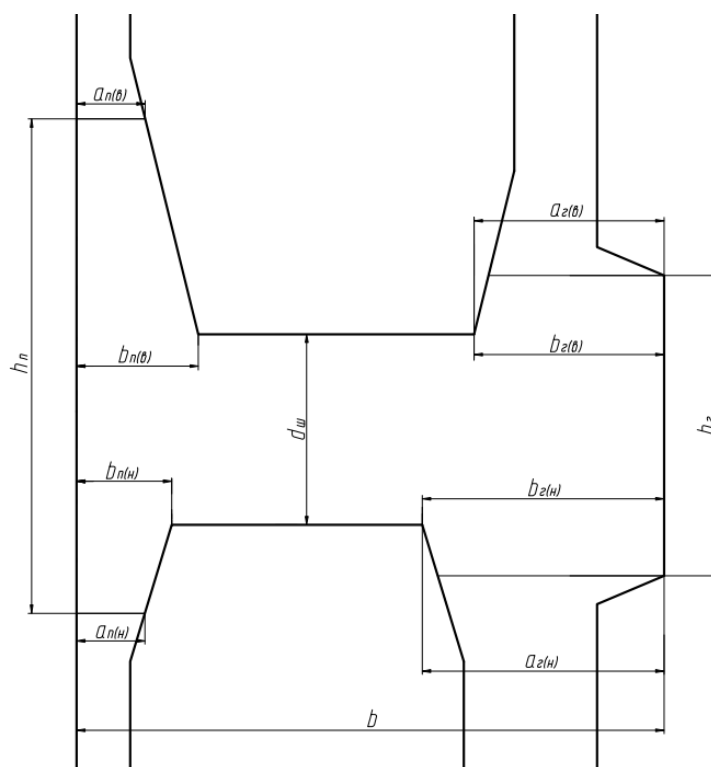


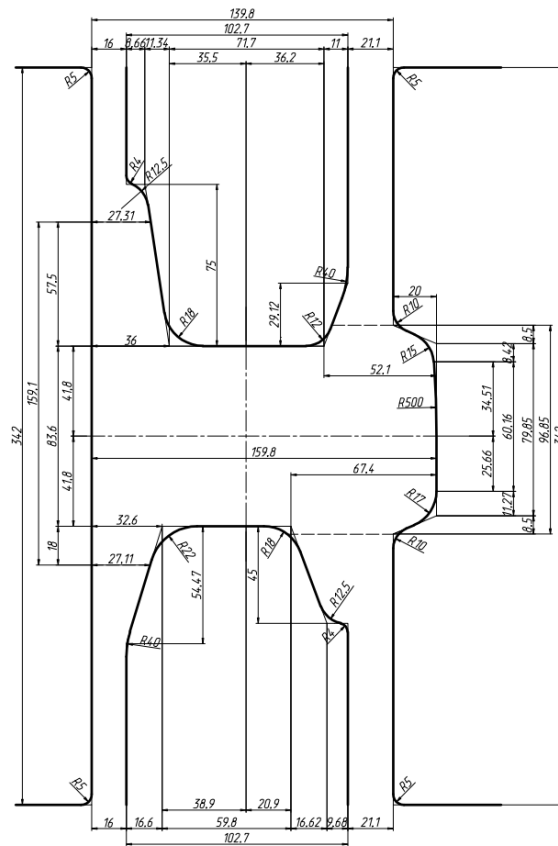
Рисунок 4.2 – Расчетные значения размеров раската в непрерывно-реверсивной группе клеток при прокатке острых рельсов типа ОР65

Таблица 4.2 – Расчетные значения размеров раската в непрерывно-реверсивной группе клеток при прокатке острых рельсов типа ОР65

Пропуск	Наименование клетки/калибра	Форма калибра	Размеры раската, мм											
			$d_{ш}$	$a_{п(в)}$	$b_{п(в)}$	$a_{п(н)}$	$b_{п(н)}$	$a_{г(в)}$ $(b_{г(в)})$	$a_{г(н)}$ $(b_{г(н)})$	$h_{п}$	$h_{г}$	b	$S,$ $мм^2$	λ
	BD2 A		94,5	30,0	39,0	31,1	39,2	58,2	72,3	161,5	125,7	163,5	18307,9	—
1	UR1		83,6	26,3	36,4	27,1	32,6	52,2	67,5	159,1	96,9	159,9	16379,5	1,118
	ER		82,0	25,8	35,0	28,9	31,2	48,0	63,3	141,5	106,5	154,3	14966,5	1,094
2	UR2		72,5	19,3	29,0	20,3	25,2	43,3	58,6	144,0	96,9	143,6	13202,1	1,134
3	UR3		67,5	18,0	27,8	18,8	24,0	39,9	55,2	140,2	96,9	139,0	12221,2	1,080
	EF		66,5	19,3	28,5	19,4	24,8	40,9	52,3	132,9	90,4	140,9	11701,2	1,044
	UF		58,5	18,2	26,7	18,3	23,1	40,5	53,5	134,1	78,4	142,8	10662,5	1,097

После расчета формоизменения металла в первом универсальном четырехвалковом калибре (Рисунок 4.3) конструируется первый асимметричный рель-

совый калибр открытого типа обжимной дуо-реверсивной клетки BD2 [154–156], рассчитанный для прокатки остряковых рельсов типа ОР65 (Рисунок 4.4).



Форму следующего по ходу расчета рельсового калибра клетки BD2 который (согласно схеме прокатки, является разрезным) сконструировали с учетом недостатков существующей калибровки. Вместо прямого разрезного закрытого рельсового калибра был спроектирован разрезной косой рельсовый калибр (Рисунок 4.5) [158].

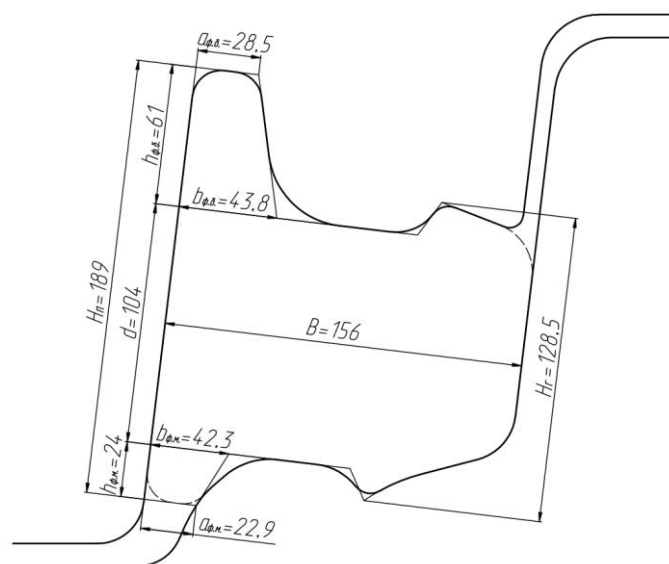


Рисунок 4.5 – Разрезной рельсовый калибр

Как было сказано выше при расчете наклонных и черновых рельсовых двухвалковых калибров дуо-реверсивной клетки BD2 пользовались методом Б.П. Бахтинова и М.М. Штернова, который разработан с учетом общности профиля рельса и двутавровой балки, в основу метода положено равенство коэффициентов деформации шейки, открытого и закрытого фланцев профиля [8].

Рельсовый разрезной калибр врезается в валки с разъемами со стороны короткого фланца подошвы и головки профиля. Размеры трапециевидного ребрового калибра определили с учетом установленных практикой соотношений и коэффициентов деформации. Исходя из формы и размеров полученного разрезного калибра, рассчитывали основные размеры трапециевидного ребрового калибра [6, 159]. Размеры трапециевидных калибров определили с учетом установленных практикой соотношений и коэффициентов деформации. Исходя из формы и размеров полученного разрезного калибра, рассчитывали основные размеры трапециевидного ребрового калибра.

б) Утяжку подошвы и головки в разрезном калибре приняли соответственно 30 мм (25 ÷ 55 мм) и 7,5 мм (3 ÷ 10 мм). Определили ширину подошвы и головки трапециевидного профиля: $B_{\Pi} = 189 + 30 = 219$ мм; $B_{\Gamma} = 128,5 + 7,5 = 136$ мм.

в) Уклон граней подошвы берется равным уклону внутренних граней фланцев подошвы разрезного калибра $tg\varphi = 0,25$.

г) Уклоны граней соединяющих головку и подошву трапециевидного профиля $tg\psi = 0,1$ (0,06 ÷ 0,15), $\psi = 5^{\circ}43'$.

д) Толщина фланца подошвы на конце берется на 0,5 ÷ 1,5 мм тоньше, чем соответствующий размер закрытого фланца разрезного калибра. Для выполнения условия соотношения длин фланцев в трапециевидном ребровом калибре в пределах 1,3 ÷ 1,7 величины отношения длин соответствующих фланцев в рельсовом разрезном калибре расчет длины большого и малого фланцев производили по формуле, полученной из решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} c_{\text{ф.б.}} + c_{\text{ф.м.}} = l \\ \frac{c_{\text{ф.б.}}}{c_{\text{ф.м.}}} = (1,3 \div 1,7) \frac{b_1}{b_2} \end{cases} \quad (4.1)$$

где $c_{\text{ф.б.}}$ – длина большого фланца в трапециевидном ребровом калибре, мм;

$c_{\text{ф.м.}}$ – длина малого фланца в трапециевидном ребровом калибре, мм;

l – сумма длин большого и малого фланцев в трапециевидном ребровом калибре, мм;

$\frac{b_1}{b_2}$ – отношение длины большого и малого фланцев в рельсовом разрезном калибре, которое равно 2,54.

$$l = B_{\Pi} - d, \quad (4.2)$$

где B_{Π} – ширина подошвы, мм;

d – ширина основания трапеции трапециевидного ребрового калибра, мм.

$$d = B_{\Gamma} + 2H\sin\psi. \quad (4.3)$$

Рассчитываем длину большого и малого фланцев в трапециевидном ребровом калибре:

$$\frac{c_{\phi.б.}}{c_{\phi.м.}} = 1,4 \cdot 2,54 = 3,56; \quad (4.4)$$

$$c_{\phi.б.} = 3,56c_{\phi.м.}; \quad (4.5)$$

$$c_{\phi.б.} + c_{\phi.м.} = l; \quad (4.6)$$

$$l = B_{\Pi} - d = 219 - (136 + 2 \cdot 147 \cdot \sin 5^{\circ}43') = 53,7 \text{ мм};$$

$$3,56c_{\phi.м.} + c_{\phi.м.} = 53,7 \text{ мм}; 4,56c_{\phi.м.} = 53,7 \text{ мм}; c_{\phi.м.} = \frac{53,7}{4,56} = 11,78 \text{ мм};$$

$$c_{\phi.б.} = 3,56 \cdot 11,78 = 41,94 \text{ мм}.$$

е) Толщина большого фланца подошвы на конце берется на 0,5 мм меньше величины на соответствующем фланце разрезного калибр: $a_{\phi.б.} = 28,5 - 0,5 = 28 \text{ мм}.$

ж) Толщину подошвы у основания большого фланца $b_{\phi.б.}$ рассчитывают по формуле, полученной из геометрических соотношений для асимметричного трапециевидного ребрового калибра (Рисунок 4.6):

$$b_{\phi.б.} = \frac{a_{\phi.б.} + c_{\phi.б.} \operatorname{tg} \varphi}{1 - \operatorname{tg} \psi \operatorname{tg} \varphi}; \quad (4.7)$$

$$b_{\phi.б.} = \frac{28 + 41,94 \cdot 0,25}{1 - 0,1 \cdot 0,25} = 39,47 \text{ мм}.$$

з) Толщину подошвы малого фланца принимают на 10 мм меньше большого при одинаковой величине уклонов этих фланцев. Таким образом, толщина основания малого фланца рассчитывается по формуле:

$$b_{\phi.м.} = b_{\phi.б.} - 10 \text{ мм}; \quad (4.8)$$

$$b_{\phi.м.} = 39,47 - 10 = 29,47 \text{ мм}.$$

и) Толщину подошвы на конце малого фланца рассчитывают по формуле, полученной из геометрических соотношений:

$$a_{\phi.м.} = b_{\phi.м.} - (b_{\phi.м.} \operatorname{tg} \psi + c_{\phi.м.}) \operatorname{tg} \varphi; \quad (4.9)$$

$$a_{\phi.м.} = 29,47 - (29,47 \cdot 0,1 + 11,78) \cdot 0,25 = 25,79 \text{ мм}.$$

По результатам расчетов строится трапециевидный ребровой калибра (Рисунок 4.6).

4.3.2 Проектирование и расчет трапециевидного осевого калибра

Расчет осуществляют следующим образом (Рисунок 4.7):

а) Принимают коэффициент обжатия раската в трапециевидном ребровом калибре посередине трапеции $\frac{1}{\eta_T} = 1,32$ ($\frac{1}{\eta_T} = 1,3 \div 1,4$) и рассчитывают ширину трапециевидного осевого калибра:

$$B = H_{\text{тр.реб.}} \cdot \frac{1}{\eta_T}; \quad (4.10)$$

$$B = 147 \cdot 1,32 = 194,04 \text{ мм.}$$

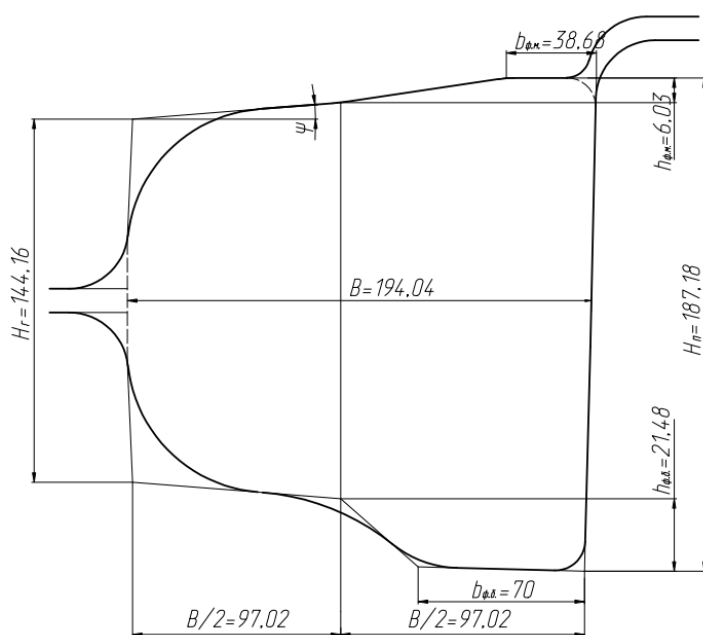


Рисунок 4.7 – Трапециевидный осевой калибр

б) Высоту калибра со стороны головки определяют с учетом бокового защемления (обжатия) раската из трапециевидного осевого калибра в трапециевидном ребровом калибре:

$$H_T = (1,06 \div 1,09) B_{\text{г.реб.}} \quad (4.11)$$

Принимаем коэффициент защемления равным 1,06: $H_T = 1,06 \cdot 136 = 144,16 \text{ мм.}$

в) Рассчитываем ширину участков подошвы формирующих фланцы принимая коэффициенты обжатия этих участков в трапециевидном ребровом калибре по рекомендациям Б.П. Бахтинова $\frac{1}{\eta_n} = 1,5 \div 2,5$, причем верхний предел указан-

ного диапазона принимается для большого фланца подошвы, а нижний – для малого.

Принимаем коэффициент обжатия подошвы в трапецевидном ребровом калибре со стороны большого фланца $\frac{1}{\eta_{ф.б.}} = 2,5$, со стороны малого $\frac{1}{\eta_{ф.б.}} = 1,5$ и определяем ширину элементов ручьев калибра идущих на формирование фланцев профиля: $b_{ф.б.} = a_{ф.б.} \cdot 2,5 = 28 \cdot 2,5 = 70$ мм; $b_{ф.м.} = a_{ф.м.} \cdot 1,5 = 25,79 \cdot 1,5 = 38,68$ мм.

г) Рассчитываем коэффициент уширения подошвы в трапецевидном ребровом калибре при принятых значения $\frac{1}{\eta_t}$ и $\frac{1}{\eta_n}$ по статической формуле:

$$\beta_n = 1 + 0,306 \left(\frac{1}{\eta_t} - 1 \right) + 0,071 \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right), \quad (4.12)$$

где коэффициент $\frac{1}{\eta_n}$ для трапецевидного ребрового калибра с разными коэффициентами обжатия фланцев берется как средняя арифметическая величина этих коэффициентов, и определяют средний коэффициент обжатия фланцев:

$$\frac{1}{\eta_{ср}} = \frac{1,5 + 2,5}{2} = 2. \quad (4.13)$$

Коэффициент уширения равен: $\beta = 1 + 0,306(1,32 - 1) + 0,071(2 - 1) = 1,17$.

Определяем высоту подошвы в трапецевидном осевом калибре: $H_n = \frac{219}{1,17} = 187,18$ мм.

д) Уклон ручьев со стороны головки до середины ширины калибра ($tg\psi$) принимаются на 2% меньше уклонов граней соединяющих головку и подошву в трапецевидном ребровом калибре: $tg\psi = 0,08$; $\psi = 4^\circ 35'$.

Для выполнения в трапецевидном ребровом калибре фланцев разной длины и величиной их отношения в пределах $1,3 \div 1,7$ величины отношения длин соответствующих фланцев в рельсовом разрезном калибре в трапецевидном осевом калибре величину отношения высот элементов идущих на формирование фланцев профиля принимают равной отношению соответствующих фланцев в трапецевидном ребровом калибре.

Рассчитываем высоту элементов калибра формирующих большой и малый фланцы подошвы.

Отношения ширины большого фланца подошвы к ширине малого фланца в трапециевидном ребровом калибре:

$$\frac{h_{\text{ф.б.}}}{h_{\text{ф.м.}}} = 3,56. \quad (4.14)$$

Для выполнения условия отношения фланцев подошвы в трапециевидном осевом калибре равном 3,56 расчет высоты большого и малого элементов калибра, идущих на образование соответствующих фланцев в трапециевидном ребровом калибре, производится по формуле, полученной из решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} h_{\text{ф.б.}} + h_{\text{ф.м.}} = H_{\text{п}} - (H_{\text{г}} + 2\frac{B}{2}\sin\psi) \\ \frac{h_{\text{ф.б.}}}{h_{\text{ф.м.}}} = 3,56 \end{cases}. \quad (4.15)$$

Подставляя значения получим:

$$h_{\text{ф.б.}} + h_{\text{ф.м.}} = 187,18 - \left(144,16 + 2\frac{194,04}{2}\sin 4^{\circ}35'\right) = 27,51 \text{ мм};$$

$$h_{\text{ф.б.}} = h_{\text{ф.м.}} \cdot 3,56$$

Тогда:

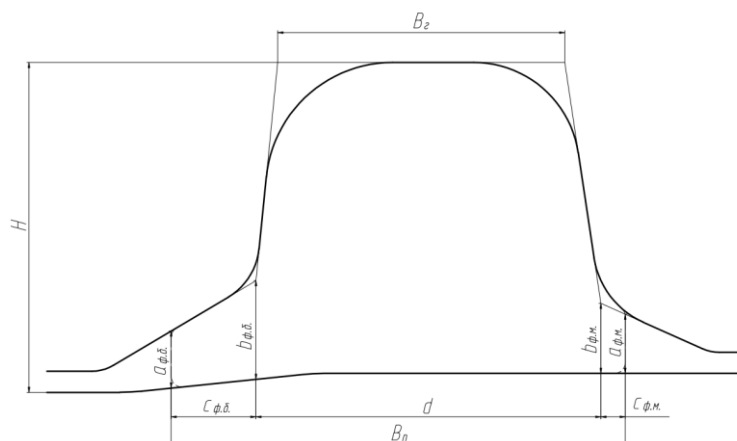
$$h_{\text{ф.м.}} \cdot 3,56 + h_{\text{ф.м.}} = 27,51 \text{ мм}; 4,56h_{\text{ф.м.}} = 27,51 \text{ мм}; h_{\text{ф.м.}} = 6,03 \text{ мм};$$

$$h_{\text{ф.б.}} = 27,51 - 6,03 = 21,48 \text{ мм}.$$

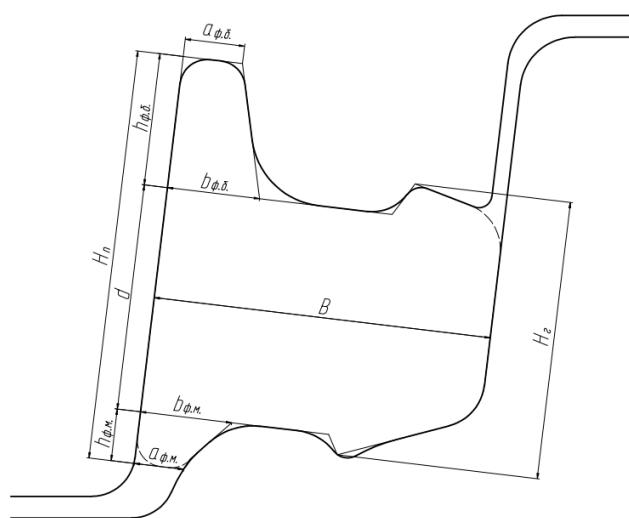
Исходя из указанных рекомендаций, определили размеры трапециевидного осевого калибра, а рассчитанные размеры позволяют построить калибры, используя традиционные правила и приемы. При этом радиусы закруглений углов калибров принимаются конструктивно с целью обеспечения благоприятных условий входа раската в калибр (Рисунок 4.7).

На Рисунке 4.8 и Таблице 4.3 приведены режимы обжатий металла в калибрах дуо-реверсивной клетки BD2 при прокатке острякового рельса типа ОР65.

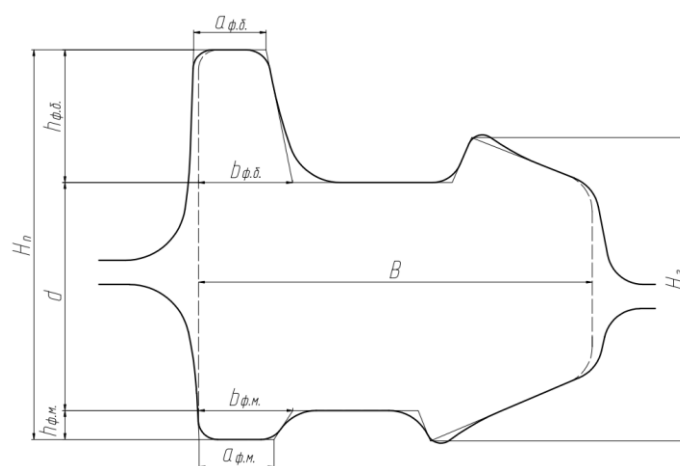
На Рисунке 4.9 и Таблице 4.4 приведены режимы обжатий металла в калибрах клетки BD1 при прокатке острякового рельса типа ОР65.



калибр С



калибр В

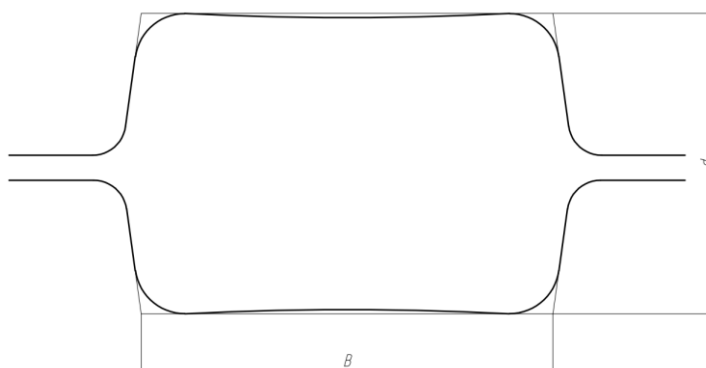


калибр А

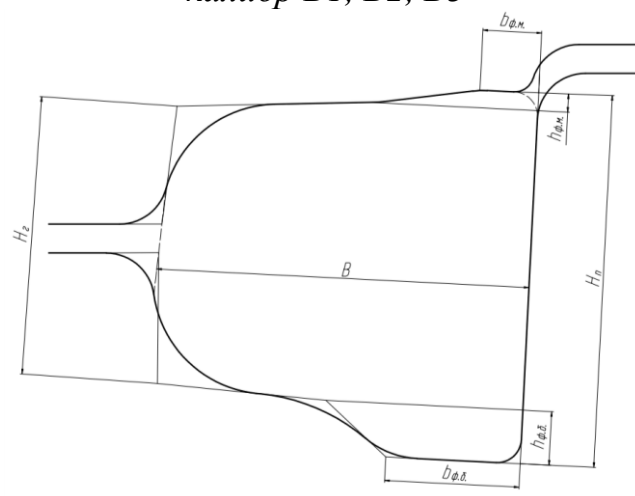
Рисунок 4.8 – Режим обжатий металла в дуо-реверсивной клети BD2 при прокатке острякового рельса типа ОР65

Таблица 4.3 – Режим обжатий металла в дуо-реверсивной клети BD2 при прокатке острогового рельса типа ОР65

Пропуск	Наименование клети/калибра	Форма калибра	Размеры раската, мм											
			d	$a_{ф.б.}$	$b_{ф.б.}$	$a_{ф.м.}$	$b_{ф.м.}$	$h_{ф.б.}$ ($c_{ф.б.}$)	$h_{ф.м.}$ ($c_{ф.м.}$)	$H_{п.}$ ($B_{п.}$)	$H_{г.}$ ($B_{г.}$)	B (H)	S , мм ²	λ
	BD1 D		159,7	–	70,0	–	38,7	21,5	6,0	187,2	144,2	194,0	31276,3	–
кантовка на 90°														
1	BD2 C		165,3	38,0	49,5	35,8	39,5	36,9	6,8	209,0	136,0	157,0	24512,6	1,276
2	BD2 C		165,3	28,0	39,5	25,8	29,5	41,9	11,8	219,0	136,0	147,0	23417,7	1,047
кантовка на 90°														
3	BD2 B		104,0	28,5	43,8	22,9	42,3	61,0	24,0	189,0	128,5	156,0	19519,2	1,200
4	BD2 A		95,5	30,0	39,0	31,1	39,2	55,0	12,0	162,5	126,7	162,5	18471,4	1,057
5	BD2 A		94,5	30,0	39,0	31,1	39,2	55,0	12,0	161,5	125,7	163,5	18307,9	1,009



калибр B1, B2, B3



калибр D

Рисунок 4.9 – Режим обжатий металла в обжимной дуо-реверсивной клети BD1 при прокатке острогового рельса типа ОР65

Таблица 4.4 – Режим обжатий металла в обжимной дуо-реверсивной клетке BD1 при прокатке острякового рельса типа ОР65

Пропуск	Наименование клетки/калибра	Форма калибра	Размеры раската, мм									
			d	$b_{ф.б.}$	$b_{ф.м.}$	$h_{ф.б.}$	$h_{ф.м.}$	$H_{п.}$	$H_{г.}$	B	$S, \text{мм}^2$	λ
			300,0	–	–	–	–	–	–	365,0	109157,0	–
кантовка на 90°												
1	BD1 B1		300,0	–	–	–	–	–	–	305,0	91157,0	1,197
кантовка на 90°												
2	BD1 B1		240,0	–	–	–	–	–	–	315,0	75257,0	1,211
кантовка на 90°												
3	BD1 B2		252,0	–	–	–	–	–	–	252,0	63161,0	1,191
кантовка на 90°												
4	BD1 B2		207,0	–	–	–	–	–	–	262,0	53891,0	1,172
кантовка на 90°												
5	BD1 B3		197,0	–	–	–	–	–	–	217,0	42406,0	1,271
кантовка на 90°												
6	BD1 B3		180,0	–	–	–	–	–	–	204,0	36377,0	1,166
кантовка на 90°												
7	BD1 D		159,7	70,0	38,7	21,5	6,0	187,2	144,2	194,0	31276,3	1,163

После кантовки раската из трапецевидного ребрового калибра на 90° его угол наклона относительно горизонтали равен $\alpha = 17^\circ$. Уклон оси шейки следующего по ходу прокатки рельсового разрезного калибра наклонного типа с разъемами со стороны короткого фланца подошвы и головки по диагонали совпадает по направлению с уклоном задаваемого в него раската. Угол (β) наклона рельсового разрезного калибра наклонного типа выбирают из условия не получения «поднутрения» граней фланца подошвы в закрытом ручье. В этом случае угол наклона рельсового разрезного калибра наклонного типа должен быть в пределах $0^\circ \leq \beta \leq \delta$, где δ – угол между гранями фланца подошвы в закрытом ручье (Рисунок 4.10) [160].

На практике наиболее целесообразно выбирать уклон оси шейки рельсового разрезного калибра наклонного типа с таким расчетом, чтобы обе боковые грани закрытого фланца подошвы имели одинаковые уклоны от вертикали. Из геометрических соотношений следует, что при этом угол наклона калибра (β) должен

быть равным половине угла между гранями закрытого ручья: $\beta = \frac{\delta}{2}$ (Рисунок 4.10).

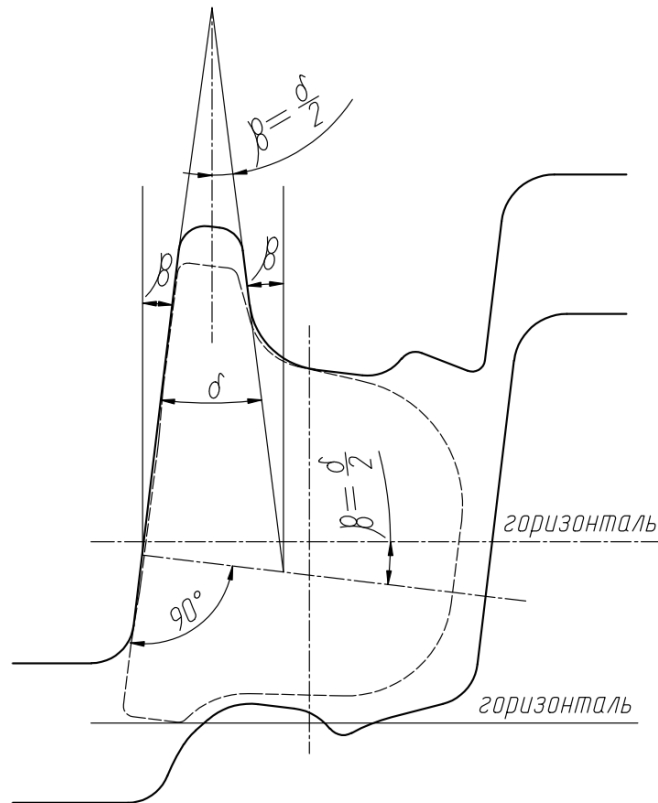


Рисунок 4.10 – Момент захвата раската из трапецевидного ребрового калибра после кантовки на 90° в рельсовом разрезном калибре наклонного типа

Исходя из калибровки валков острякового рельса типа ОР65 угол между гранями фланца подошвы в закрытом ручье рельсового разрезного калибра наклонного типа равен $\delta = 14^\circ$.

Используя материалы диссертации была спроектирована новая схема прокатки, рассчитана калибровка валков для прокатки острякового рельса типа ОР65 и прокатана партия рельсов, показанных на Рисунке 4.11.



Рисунок 4.11 – Остряковые рельсы типа ОР65 прокатанные по новой калибровке

Экспериментальные и теоретические исследования возможности уменьшения числа пропусков в черновых клетях BD1 и BD2 приведенные в главе 2 показали, что для такого решения есть резервы оборудования и пластических свойств деформируемого материала. Базируясь на полученной информации разработана усовершенствованная схема прокатки острякового рельса типа ОР65 с уменьшенным количеством пропусков в клети BD2. Разработанные новые режимы обжатий в черновых клетях приведены в Таблицах 4.3 и 4.4.

Для проверки разработанной схемы прокатки асимметричного рельса ОР65 в черновых клетях было проведено моделирование в программном пакете QForm результаты, которого показаны на Рисунках 4.12–4.15.

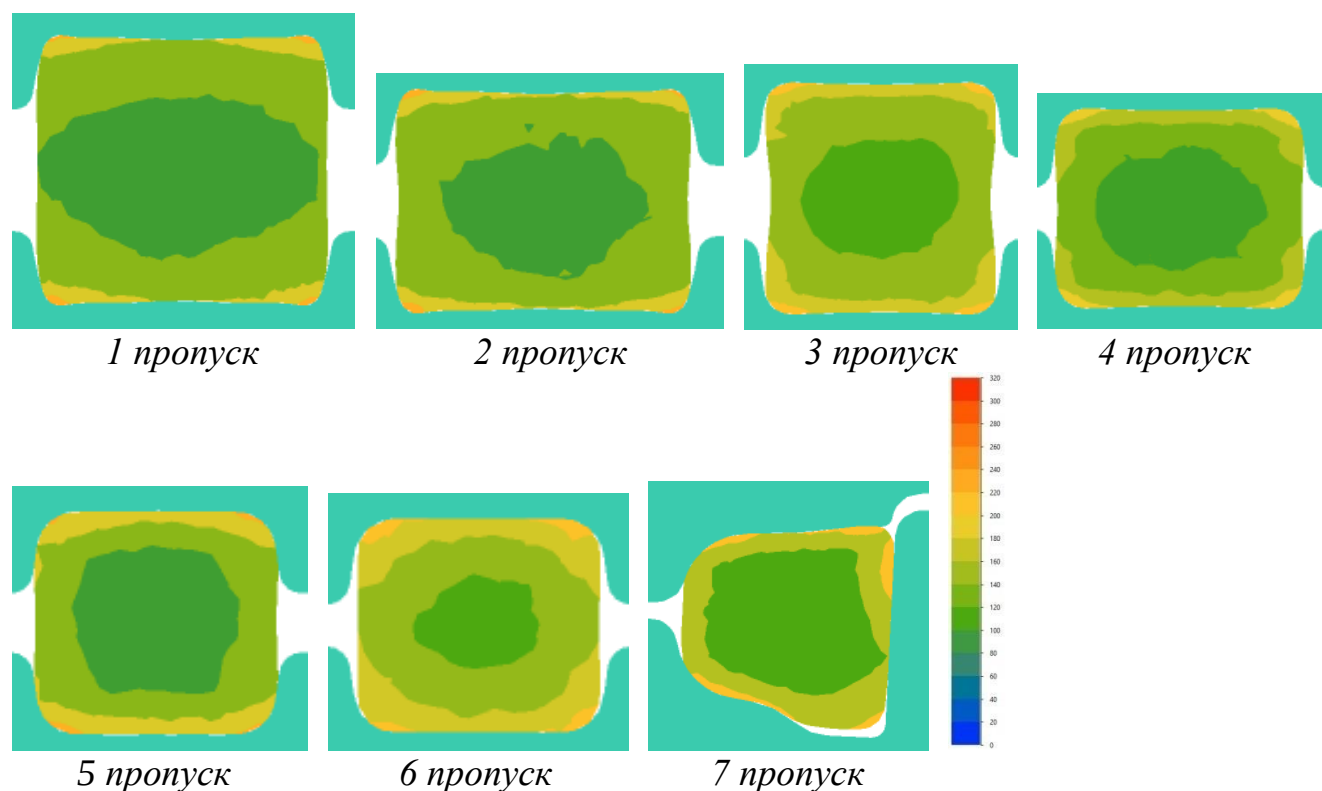


Рисунок 4.12 – Интенсивность напряжения при прокатке в клети BD1

по разработанной схеме

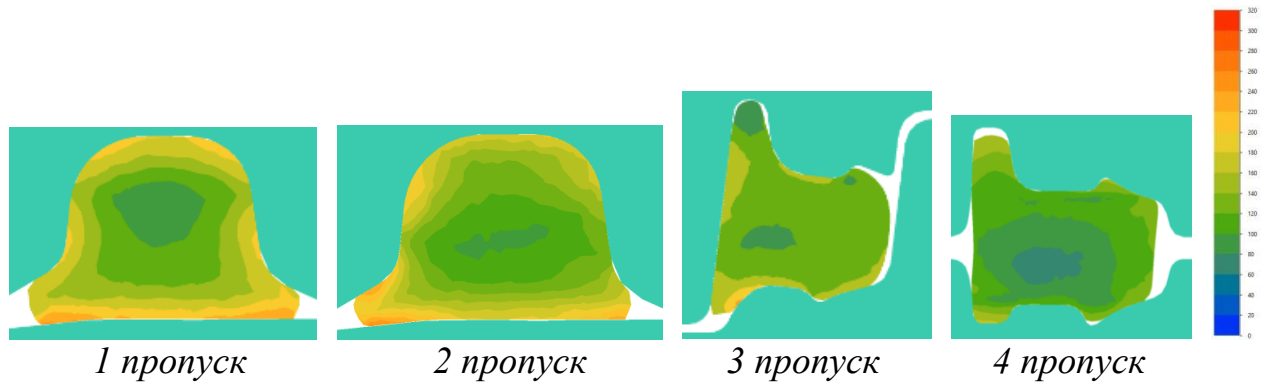


Рисунок 4.13 – Интенсивность напряжения при прокатке в клетки BD2

по разработанной схеме

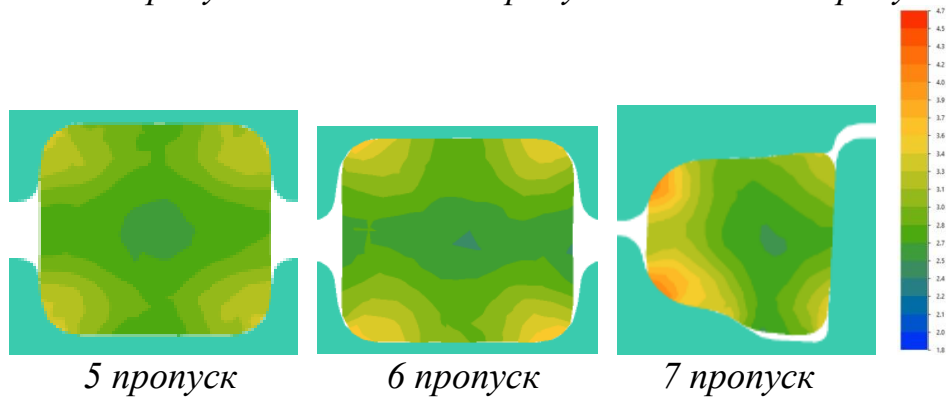
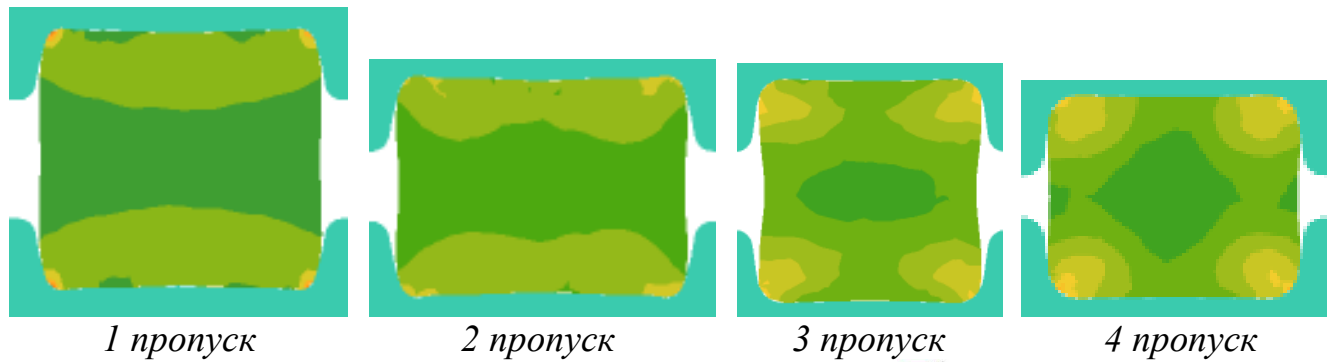


Рисунок 4.14 – Интенсивность деформаций при прокатке в клетки BD1

по разработанной схеме

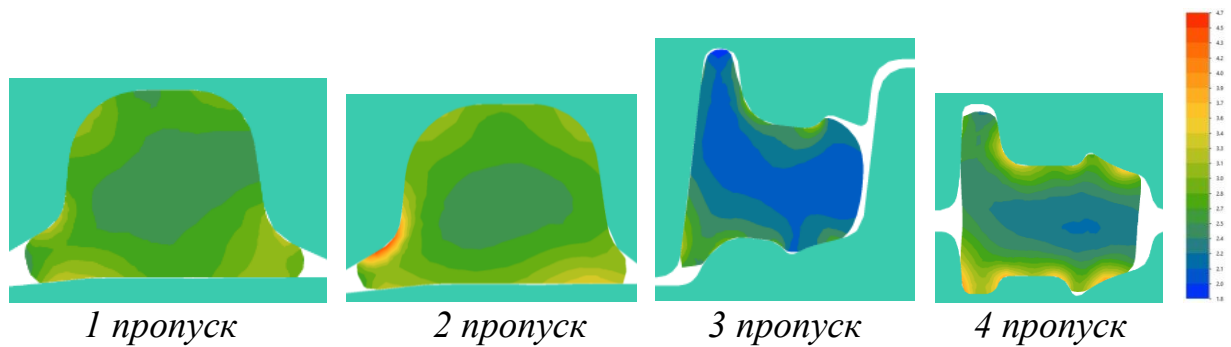


Рисунок 4.15 – Интенсивность деформаций при прокатке в клетки BD2

по разработанной схеме

Как видно из приведенных Рисунков 4.12–4.15 картина распределения интенсивности напряжений и интенсивности деформаций в усовершенствованной схеме прокатки по сравнению с действующей несколько изменилась. Сравнивая Рисунки 2.5–2.8 и Рисунки 4.12– 4.15 видно, что интенсивность напряжений изменились в сторону увеличения в клетях BD1 и BD2 в среднем на 9,2% и находятся в пределах от 35,5 до 76 МПа, причем максимальные значения имеются в ящичном калибре В1 74,4 МПа первый пропуск клетки BD1 и в калибре С типа «стоячая трапеция» 76 МПа первый пропуск клетки BD2 и интенсивность деформаций изменились в сторону увеличения в клетях BD1 и BD2 в среднем на 15,5% и находятся в пределах от 0,2 до 0,82, максимальные величины присутствуют в ящичном калибре В1 0,82 первый пропуск клетки BD1 и в калибре А открытый рельсовый 0,74 четвертый пропуск клетки BD2.

Однако изменения рассматриваемых величин при реализации усовершенствованной схемы прокатки рельсов типа ОР65 не являются критическими с точки зрения пластичности, что также подтверждается результатами натурного промышленного эксперимента.

Согласно разработанного усовершенствованного режима прокатки формоизменение в клетях BD1, также как при контрактной схемы, производится за 7 пропусков, но при этом прокатка в прямоугольных калибрах производится в первых 6 пропусках, а в седьмом пропуске в трапецевидном осевом калибре.

Прокатка в клетях BD2 производится за 5 пропусков: 1 и 2 в трапецевидном ребровом калибре, 3, после кантовки, в рельсовом разрезном наклонного типа, 4 и 5 в рельсовом несимметричном открытого типа калибре. После клетей BD1 и BD2 заготовка, как и по контрактной схеме, прокатывается в клетях стана-тандем.

Для нового режима прокатки при проведении расчетов усилия прокатки в проходах, осуществляемых в трапецевидных и рельсовых калибрах использовали значение не абсолютного (как в предыдущих проходах в ящичных калибрах), а приведенного обжатия:

$$\Delta h_{\text{пр}} = h_0 - h_{1\text{пр}} = h_0 - \frac{s_1}{B_1}, \quad (4.16)$$

где $\Delta h_{\text{пр}}$ – приведенное обжатие, мм;

h_0 – высота полосы в ящичном калибре до обжатия, мм;

$h_{1\text{пр}}$ – высота приведенной полосы после обжатия в калибре, мм.

Принятая методика расчета объясняется сложной формой калибров. Сопоставление результатов моделирования в программном пакете QForm с данными натурных исследований усилия прокатки в клетях BD1 и BD2 при формировании профиля острякового рельса ОР65 в условиях универсального рельсобалочного стана филиал «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ» по усовершенствованному режиму прокатки приведено на Рисунке 4.16 и 4.17.



BD1



BD2

Рисунок 4.16 – Прокатка острякового рельса в клетях BD1 и BD2
по усовершенствованной схеме

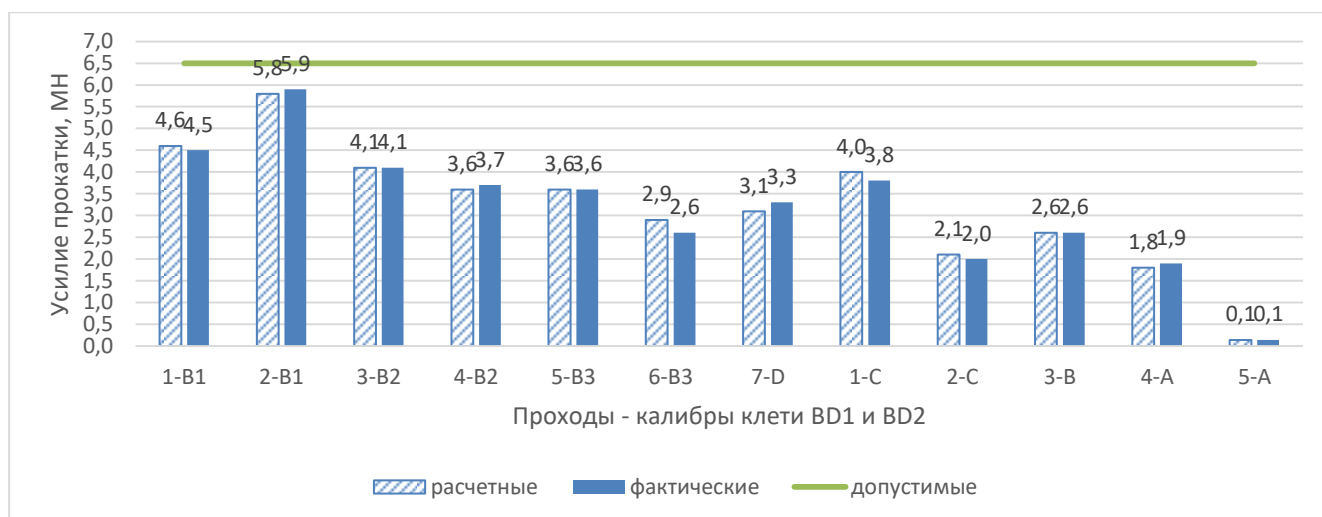


Рисунок 4.17 – Фактические и расчетные значения усилия прокатке в клетях BD1 и BD2 по усовершенствованной схеме

Из Рисунка 4.17 следует, что фактическая величина усилия прокатки, хорошо согласуется с расчетными значениями, полученными при моделировании в QForm отклонение не превышает 10%. По полученным фактическим результатам при реализации предлагаемых условий прокатки острых рельсов усилие для деформирования не превышает 90% от допустимого усилия прокатки.

На Рисунке 4.18 приведены фактические значения усилия при прокатке рельсов ОР65 в клетях BD1 и BD2 универсального рельсобалочного стана филиал «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ» по контрактной и усовершенствованной схеме прокатки.

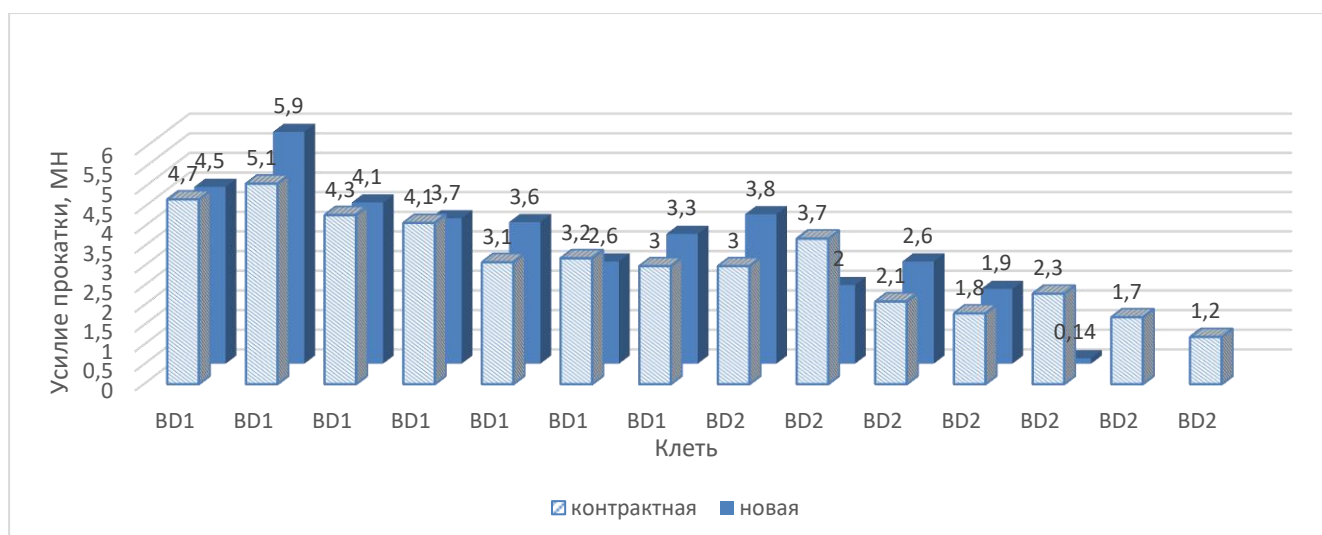
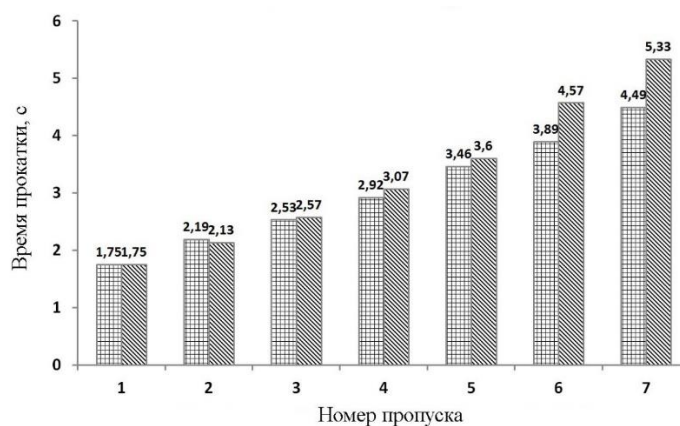


Рисунок 4.18 – Усилия прокатки ОР65 при деформациях в обжимных клетях универсального рельсобалочного стана филиал «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ» по контрактной и усовершенствованной схеме прокатки

В результате внедрения нового режима прокатки остряковых рельсов типа ОР65 благодаря снижению количества пропусков в клети BD2 достигнуто уменьшение цикла прокатки на 13,2 сек. (Рисунок 4.19 и 4.20), что обусловило повышение производительности стана при производстве данного вида продукции на 39,8 т/ч. Также положительным моментом явилось более равномерная загрузка клетей BD1 и BD2.

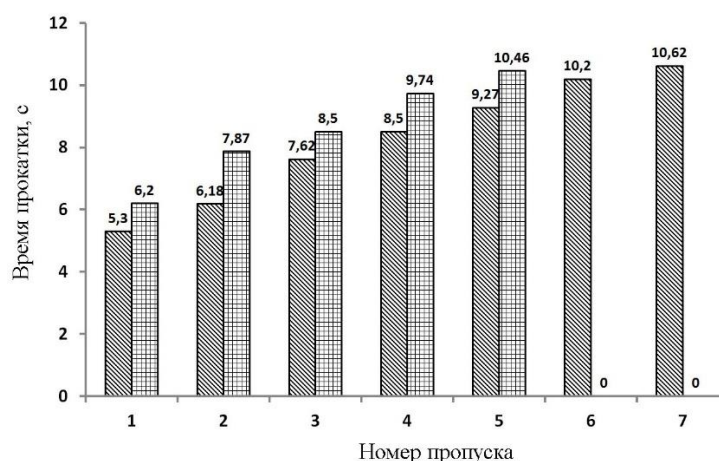


▨ по существующей схеме прокатки

▩ предлагаемая схема прокатки

Рисунок 4.19 – График времени по проходам в клети BD1

до и после внедрения новой схемы прокатки



▨ по существующей схеме прокатки

▩ предлагаемая схема прокатки

Рисунок 4.20 – График времени по проходам в клети BD2

до и после внедрения новой схемы прокатки

Использование наклонного расположения рельсового разрезного калибра позволило получить преимуществ по сравнению с контрактной калибровкой:

- перетачивать валков без изменения ширины калибров;

- увеличить интенсивность обжата;
- исключить возможность «окова» валков;
- гарантировать стабильную задачу раската в валки.

4.4 Проектирование и внедрение калибровки валков, режимов прокатки асимметричных рельсовых профилей – усовиковых рельсов типа УР65 и заготовки трамвайных рельсов Т62

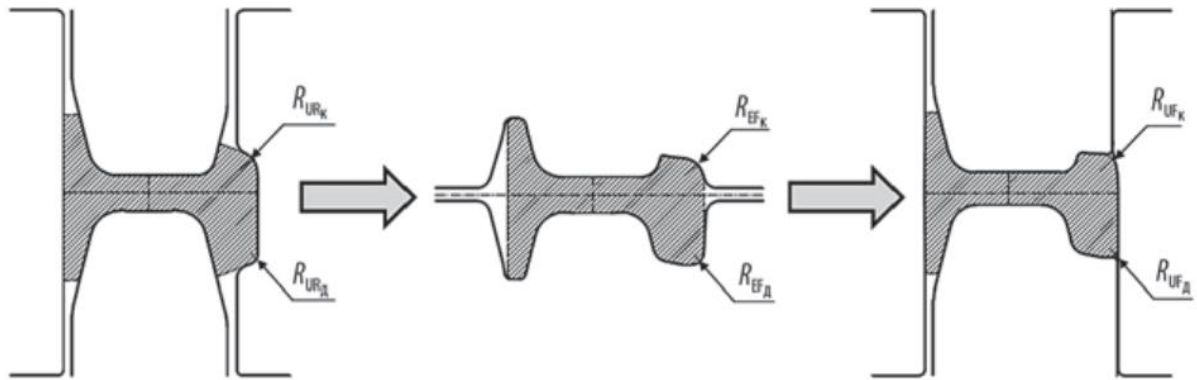
За основу технологии прокатки усовиковых рельсов и заготовки трамвайных рельсов в непрерывно-реверсивной группе клетей универсального рельсобалочного стана принимается схема, аналогичная схеме прокатки остряковых рельсов, за три прохода.

Расчет формоизменения металла и размеры универсальных и вспомогательных рельсовых калибров производится по разработанной методике расчета асимметричных рельсовых профилей, где с целью обеспечения условия равенства вытяжек по элементам рассчитываемых калибров они делятся на две части относительно горизонтальной оси, которая обеспечивает равенство вытяжек участков шейки в обеих частях калибров при деформации раската в них.

Отличительной особенностью прокатки асимметричных рельсовых профилей усовиковый рельс типа УР65 и заготовка трамвайных рельсов Т62 от схемы прокатки остряковых рельсов в непрерывно-реверсивной группе клетей является использование в качестве чистового не трехвалкового калибра, а четырехвалкового универсального калибра [161]. Это связано с тем, что в данных профилях поверхность катания головки имеет сложную форму и получить ее за счет свободного уширения при деформации металла в чистовом трехвалковом калибре является процессом трудновыполнимым (Рисунок 1.6 и 1.8).

Поэтому с целью четкого формирования поверхности катания головки в этих профилях был разработан новый способ прокатки рельсов [2]. В данном способе на финишной стадии формирования профиля прокатку осуществляют последовательно в трех калибрах: в четырехвалковом универсальном (клеть UR), пред-

чистовом вспомогательном открытом двухвалковом (клеть Эджер) и четырехвалковом универсальном чистовом (клеть UF) (Рисунок 4.21) [162].



R_{UR_k} , R_{EF_k} , R_{UF_k} – радиусы сопряжения поверхности катания с боковыми поверхностями головки рельса со стороны короткого фланца в калибрах клетки UR, EF и UF соответственно; R_{UR_d} , R_{EF_d} , R_{UF_d} – радиусы сопряжения поверхности катания с боковыми поверхностями головки рельса со стороны длинного фланца в калибрах клеток UR, EF и UF соответственно

Рисунок 4.21 – Схема прокатки усовиковых рельсов в последнем проходе непрерывной группы универсальных клеток рельсобалочного стана филиал «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ»

Согласно разработанной схеме, имеющей патентную защиту патент РФ 2627140 [2] требуемые радиусы сопряжения поверхности катания с боковыми поверхностями головки готового рельса, получают в результате свободного уширения, т.е. неконтролируемого течения металла в разьеме валков чистового универсального четырехвалкового калибра. При этом указанные радиусы зависят от вертикального и горизонтального обжатий головки, а также от радиусов сопряжения в предчистовом калибре. Для определения величины последних получена эмпирическая формула:

$$R_{EF} = \frac{R_{UF}}{k} + \frac{\Delta h}{2} + \Delta b, \quad (4.17)$$

где R_{EF} и R_{UF} – радиусы сопряжения поверхности катания с боковыми поверхностями головки рельса в предчистовом калибре клетки UF соответственно, мм;

Δh и Δb – вертикальное и горизонтальное обжатие головки в чистовом калибре UF, мм;

k – коэффициент формоизменения радиуса сопряжения поверхности катания с боковыми поверхностями головки рельса в чистовом калибре клетки UF.

На основании результатов моделирования процессов течения металла, подтвержденных практическими результатами прокатки рельсовых профилей на универсальном рельсобалочном стане филиал «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ», было установлено, что гарантированное выполнение требуемой величины внешних радиусов сопряжения поверхностей головки профиля обеспечивается при вертикальном и горизонтальном обжатиях головки в пределах $\Delta h = 2 \div 4$ мм и $\Delta b = 3 \div 6$ мм соответственно. При значениях вертикального и горизонтального обжатий ниже установленного интервала существует высокая вероятность нечеткого оформления поверхности катания головки профиля, а при использовании обжатий выше рекомендуемых значений возрастает вероятность переполнения калибра, в результате чего не будет достигнут требуемый внешний радиус сопряжения поверхностей головки рельса. Эмпирическим путем также установлен рациональный интервал коэффициента формоизменения радиуса сопряжения $k = 0,85 \div 0,95$. При этом минимальное значение коэффициента принимается для максимальных значений обжатий головки профиля, а максимальное – для минимальных значений обжатия [163, 164].

Расчет черновых рельсовых калибров дуо-реверсивных клеток BD1 и BD2 при прокатке усовиковых рельсов типа УР65 и заготовки трамвайных рельсов Т62, также как и для остряковых рельсов, осуществляется по методике Б.П. Бахтинова и М.М. Штернова в основу которого положено равенство коэффициентов деформации шейки, открытых и закрытых фланцев [8].

Отличительная особенность прокатки усовиковых рельсов типа УР65 (Рисунок 4.22) и заготовки трамвайных рельсов Т62 (Рисунок 4.23) от прокатки остряковых рельсов в черновых рельсовых калибрах дуо-реверсивной клетки является отсутствие в схеме прокатки трапецевидных калибров, что позволяет исключить кантовки раскатов из этих калибров, так как прокатка рельсового профиля осу-

ществляется подобно балки, что стало возможным из сравнительно меньшей разницы в соотношениях ширины подошвы и головки в этих профилях по сравнению с остряковыми рельсами.

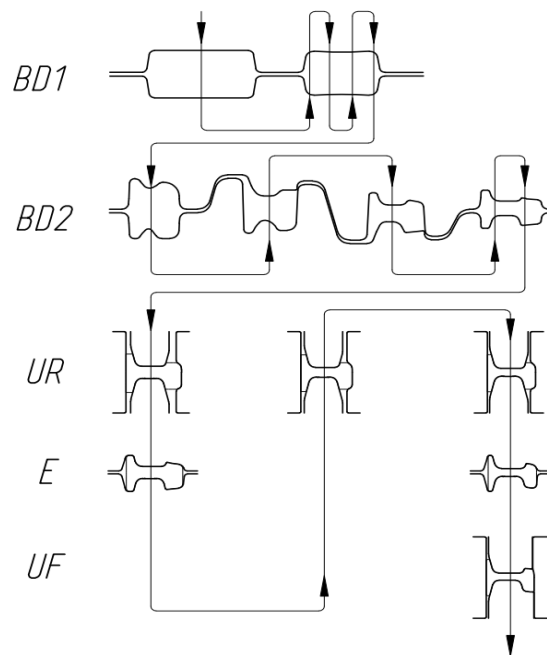


Рисунок 4.22 – Схема прокатки усовиковых рельсов типа УР65

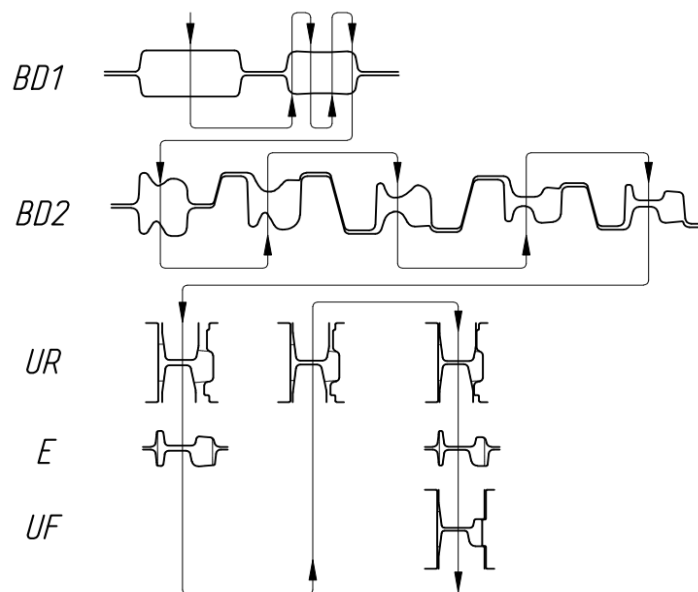


Рисунок 4.23 – Схема прокатки заготовки трамвайных рельсов Т62

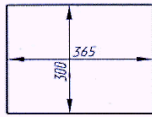
Проектирование рельсовых калибров проводилось с использованием полученных в диссертации зависимостей.

На Рисунках 4.24 и 4.25 представлены режимы обжатий металла в калибрах стана-тандем, клетей BD1 и BD2 при прокатке усовиковых рельсов типа УР65 и заготовки трамвайных рельсов Т62.

Рельсобалочный цех

Программа калибровки рельсов типа УР65

Сечение НЛЗ - 300х365 мм .



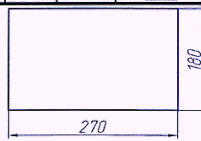
Вес 1 п.м. НЛЗ: 855 кг;
 Длина НЛЗ: 6,56 м;
 Вес 1 п.м. УР65: 84,7 кг.

5 проходов в клетке BD1.

Кантовка с задней стороны клетки BD1.

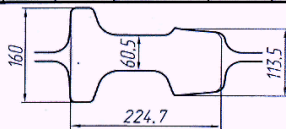
Пропуск	Клеть	Калибр	Форма калибров	Размеры, мм		Обжатие	Имя в базе данных			УР65 BD1 5 pass ZAD							Кантовка	Дата калибра
							Уширение	Рабочий зазор	Сечение раската	Относительное уменьшение площади	Коэффициент вытяжки	Длина раската	Рабочий диаметр	Скорость прокатки	Усилие прокатки			
				В	Н	мм	мм	мм	мм²	%	-	м	мм	м/с	кН			
1	BD1	1/B1		375	260	40	10	93	97 157	10,99	1,124	7,4	920	3,5	2848	0	03.03.2014	
2		2/B2		270	315	60	10	148	84 707	12,81	1,147	8,5	920	3,5	2548	1	03.03.2014	
3		2/B2		280	250	65	10	83	69 657	17,77	1,216	10,3	920	3,5	2839	0	03.03.2014	
4		2/B2		260	225	55	10	58	58 157	16,51	1,198	12,3	920	4,0	2458	1	03.03.2014	
5		2/B2		270	180	45	10	13	48 257	17,02	1,205	14,8	920	4,0	2617	0	03.03.2014	

1 - означает кантовка на 90 перед пропуском; 0 - отсутствие кантовки



270				Имя в базе данных						УР65 BD2								
Пропуск	Клеть	Калибр	Форма калибров	Размеры, мм		Обжатие	Уширение	Рабочий зазор	Сечение раската	Относительное уменьшение площади	Коэффициент вытяжки	Длина раската	Рабочий диаметр	Скорость прокатки	Усилие прокатки	Кантовка	Дата калибра	
				B	H													мм
1	BD2	1/D		195	170	100	15	13	41 607	13,78	1,160	17,2	876	2,6	3237	1	03.03.2014	
2		2o3/C		205	101	69	10	13	30 558	26,55	1,362	23,4	935	3,0	4157	0	03.03.2014	
3		4o5/B		213	71	30	8	13	24 174	20,89	1,264	29,6	973	3,7	3800	0	03.03.2014	
4		6/A		219	62,5	8,5	6	15	21 714	10,17	1,113	33,0	1001	3,5	3699	0	03.03.2014	
5		6/A		224,7	60,5	2	5,7	13	21 265	2,07	1,021	33,7	1018	5,0	3224	0	03.03.2014	

1 - означает кантовка на 90 перед пропуском; 0 - отсутствие кантовки



Пропуск		Клеть/калибр	Обжатие по шейке	Имя в базе данных					УР65 TDM							Кантовка	Дата калибра	
				Зазоры по валкам			Усилие прокатки			Сечение раската	Относительное уменьшение площади	Коэффициент вытяжки	Длина раската	Рабочий диаметр	Скорость прокатки			Клеть работает (1); Клеть в холостом режиме (0)
				Шейка	Сторона оператора (OS)	Сторона привода (DS)	Горизонтальные валки	Сторона оператора (OS)	Сторона привода (DS)									
1	UR1	10,0	50,5	27,7	17,5	3000	2700	2700	19 144	9,97	1,111	37,4	1169	3,28	1	0	03.03.2014	
	ER	0,5	10,0 (50,0)	-	-	2000	-	-	18 307	4,37	1,046	39,1	923	3,50	1		03.03.2014	
	UF	-	60,0	90,0	40,0	2000	0	0	18 307	0,00	1,000	39,1	1200	3,50	0		03.03.2014	
2	UF	-	60,0	90,0	40,0	2000	0	0	18 307	0,00	1,000	39,1	1200	2,89	0	0	03.03.2014	
	ER	0,0	10,0 (50,0)	-	-	2000	-	-	18 307	0,00	1,000	39,1	923	2,89	1		03.03.2014	
	UR2	9,0	41,0	16,5	12,5	2000	2010	3093	15 426	15,74	1,187	46,4	1173	3,50	1		03.03.2014	
3	UR3	8,0	33,0	9,0	8,0	3700	2000	3999	12 763	17,26	1,209	56,1	1171	2,94	1	0	03.03.2014	
	EF	0,0	10,0 (33,0)	-	-	2500	-	-	12 213	4,31	1,045	58,6	940	3,13	1		03.03.2014	
	UF	2,7	30,3	1,0	8,0	2000	2000	2000	11 160	8,63	1,094	64,2	1169	3,50	1		03.03.2014	

в скобках указаны фактические размеры по толщине шейки

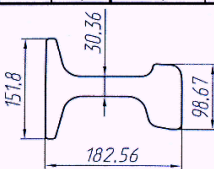
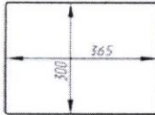


Рисунок 4.24 – Программа калибровки усовиковых рельсов типа УР65

Рельсобалочный цех

Программа калибровки рельсов типа 3Т62

Сечение НЛЗ - 300х365 мм.

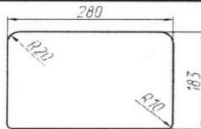


Вес 1 п.м. НЛЗ: 852 кг;
 Длина НЛЗ: 4,0 м;
 Вес 1 п.м. 3Т62: 71,07 кг.

5 проходов в клети BD1, комп. 1 от P50
 Кантовка с задней стороны клети BD1.

Пропуск	Клеть	Калибр	форма калибров	Размеры, мм		Обжатие	Имя в базе данных			T62 BD1 5Z							Кантовка	Дата калибра
							Уширение	Рабочий зазор	Сечение раската	Относительное уменьшение площади	Коэффициент вытяжки	Длина раската	Рабочий диаметр	Скорость прокатки	Усилие прокатки			
				В	Н	мм										мм		
1	BD1	1/B1		375	259	41	10	72	96 782	10,81	1,121	4,5	841,9	3,5	4000	0	19.05.2017	
2		2/B2		269	315	60	10	143	84 392	12,80	1,147	5,2	786,3	3,5	4000	1	19.05.2017	
3		2/B2		279	260	55	10	88	72 197	14,45	1,169	6,1	841,2	3,0	3800	0	19.05.2017	
4		2/B2		270	225	54	10	53	60 407	16,33	1,195	7,3	876,3	3,5	2500	1	19.05.2017	
5		2/B2		280	183	42	10	11	50 897	15,74	1,187	8,6	918,2	5,0	1500	0	19.05.2017	

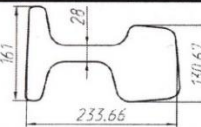
1 - означает кантовка на 90 перед пропуском; 0 - отсутствие кантовки



5 проходов в клети BD2.
 Кантовка с передней стороны клети BD1.

Пропуск	Клеть	Калибр	Форма калибров	Имя в базе данных						T62 BD2 5P							Кантовка	Дата калибра
				Размеры, мм		Обжатие	Уширение	Рабочий зазор	Сечение раската	Относительное уменьшение площади	Коэффициент вытяжки	Длина раската	Рабочий диаметр	Скорость прокатки	Усилие прокатки			
				В	Н											мм		
1	BD2	1/E		200,0	152,0	128,0	17,0	13	43 342	14,84	1,174	10,1	883,3	4,2	2800	1	07.03.2019	
2		2/D		210,7	90,0	62,0	10,7	13	35 481	18,14	1,222	12,4	931,6	4,5	3700	0	07.03.2019	
3		3/C		220,0	60,0	30,0	9,3	13	28 405	19,94	1,249	15,4	970,9	4,0	2500	0	07.03.2019	
4		4/B		226,6	40,0	20,0	6,6	13	23 366	17,74	1,216	18,8	996,9	3,8	2000	0	07.03.2019	
5		5/A		233,7	28,0	12,0	7,1	13	19 786	15,32	1,181	22,2	1015,3	5,0	2000	0	07.03.2019	

1 - означает кантовка на 90 перед пропуском; 0 - отсутствие кантовки



Пропуск	Клеть/калибр	Обжатие по шейке	Имя в базе данных						3Т62 TDM							Кантовка	Дата калибра	
			Зазоры по валам				Усилие прокатки			Сечение раската	Относительное уменьшение площади	Коэффициент вытяжки	Длина раската	Рабочий диаметр	Скорость прокатки			Клеть работает (1); Клеть в холостом режиме (0)
			Шейка	Сторона оператора (OS)	Сторона привода (DS)	Горизонтальные валки	Сторона оператора (OS)	Сторона привода (DS)										
									мм									
1	UR1	5,7	22,3	30,0	14,5	3500	1500	2700	16 430	16,96	1,204	26,7	1171	3,24	1	0	07.03.2019	
	ER	-	12,0 (23,5)	-	-	1600	-	-	15 200	7,49	1,081	28,8	940	3,50	1		07.03.2019	
	UF	-	60,0	90,0	50,0	0	0	0	15 200	0,00	1,000	28,8	1200	3,50	0		01.02.2016	
2	UF	-	60,0	90,0	50,0	0	0	0	15 200	0,00	1,000	28,8	1200	2,94	0	0	01.02.2016	
	ER	-	12,0 (23,5)	-	-	1600	-	-	15 200	0,00	1,000	28,8	940	2,94	1		07.03.2019	
	UR2	6,3	16,0	14,0	10,0	3500	1500	2500	12 766	16,01	1,191	34,3	1171	3,50	1		07.03.2019	
3	UR3	3,0	13,0	5,2	6,4	3500	1500	2500	10 422	18,37	1,225	42,1	1170	3,13	1	0	07.03.2019	
	EF	-	10,6 (14,1)	-	-	1600	-	-	9 900	5,00	1,053	44,3	955	3,29	1		07.03.2019	
	UF	2,7	10,3	6,1	4,6	2000	2000	2000	9 306	6,00	1,064	47,1	1168	3,50	1		01.02.2016	

в скобках указаны фактические размеры по толщине шейки

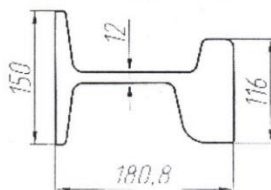


Рисунок 4.25 – Программа калибровки заготовки трамвайных рельсов Т62

По разработанной калибровке прокатаны усовиковые рельсы типа УР65, которые показаны на Рисунке 4.26.

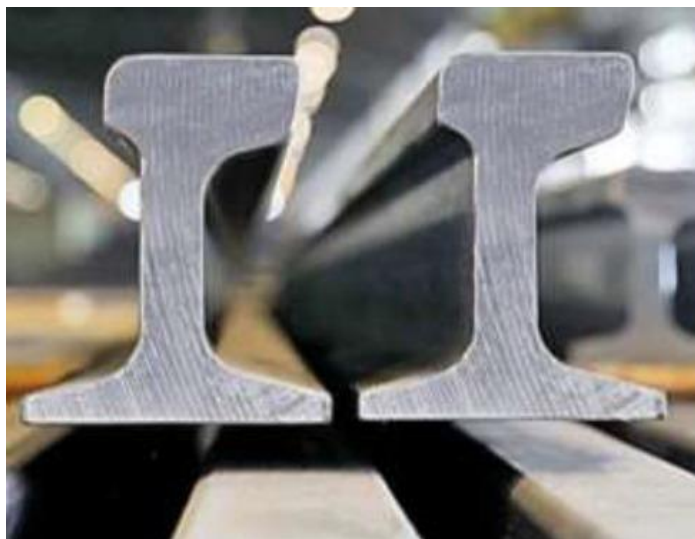


Рисунок 4.26 – Усовиковые рельсы типа УР65, прокатанные по разработанной калибровке

Материалы, приведенные в главе опубликованы в печати [1, 2, 148, 155, 158, 160, 162–164].

Использование разработанных методик расчета формоизменения металла в универсальных калибрах при прокатке асимметричных профилей в условиях рельсобалочного цеха филиала «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ» позволило сократить количество брака по дефекту «плена», увеличить производительность стана и за счет этого получить годовой экономический эффект в 31,6 млн. руб. при долевом участии автора 15,8 млн. руб. (Приложение 2).

Методики расчета калибров при получении асимметричных рельсовых профилей используются в учебном процессе при обучении бакалавров по направлению подготовки 22.03.02 Metallurgy (Приложение 3).

4.5 Выводы

1. Разработана усовершенствованная схема прокатки острияковых рельсов типа ОР65 в обжимных двухвалковых реверсивных клетях BD1 и BD2 универсального рельсобалочного стана филиала «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ», отличающаяся

от используемой, переносом трапециевидного осевого калибра с клетки BD2 в клетку BD1, что позволяет исключить два пропуска в клетки BD2 и увеличить обжатия в прямоугольных калибрах клетки BD1. Разработанная схема прокатки в черновых клетях сокращает количество пропусков с 14 до 12 и внедрена в производство с годовым экономическим эффектом в 10,8 млн. руб. при доленом участии автора 5,4 млн. руб. Экономический эффект получен за счет снижения брака, увеличения производительности, снижения удельного расхода прокатных валков и подтвержден соответствующим актом и расчетами (Приложение 1).

2. Применительно к условиям универсального рельсобалочного стана филиала «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ» разработан новый способ прокатки острых 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 раскатки кантующим оборудованием, что способствовало интенсификации процесса прокатки в черновых клетях и сокращению двух пропусков.

3. Разработан новый способ прокатки асимметричных рельсовых профилей с формированием чистового профиля в четырехвалковом универсальном калибре отличающийся от известных тем, что для гарантированного выполнения радиусов сопряжения поверхности катания головки профиля с ее боковыми поверхностями получаемых за счет неконтролируемого течения металла в разъемах валков чистового калибра, одноименные радиусы в предчистовом двухвалковом контролируемом калибре определяются по формуле в зависимости от горизонтального и вертикального обжатий головки в чистовом калибре и от коэффициента формоизменения радиусов сопряжения поверхности катания с боковыми поверхностями головки в чистовом четырехвалковом универсальном калибре.

4. Разработаны калибровки для прокатки асимметричных рельсовых профилей: усовикового рельса типа УР65 и заготовки трамвайных рельсов Т62 по предложенной методике проектирования формоизменения металла в универсальных калибрах и с формированием чистового профиля в четырехвалковом универсальном калибре, что позволило снизить объем отбраковки, увеличило производительность рельсобалочного стана и дало экономический эффект 31,6 млн. руб. в год при доленом участии автора 15,8 млн. руб. (Приложение 2).

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 клетей при равных коэффициентах вытяжки верхней и нижней частей шеек относительно горизонтальной оси.

3. Разработана методика проектирования универсальных четырехвалковых, универсальных трехвалковых и двухвалковых (вспомогательных) калибров, используемых 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) острых 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 с и получение экономического эффекта 10,8 млн. руб. в год при доле участия 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 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 Metallurgy, что подтверждено соответствующей Справкой.

Список литературы

1. Патент РФ 2721968, МПК В 21 В 1/08. Способ прокатки несимметричных рельсовых профилей в черновых калибрах [Текст] / 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 [Текст] / 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.
3. Павлов В.В. Разработка прогрессивных калибровок и технологий прокатки на станах Новокузнецкого металлургического комбината [Текст] / В.В. Павлов, В.В. Дорофеев, В.В. Пятайкин [и др.] // Новосибирск: Наука. – 2006. – 224С.
4. Бейнон Росс Е. Калибровка валков и расположение прокатных станов [Текст] // М.: Металлургиздат. – 1960. – 204С.
5. Френкель В.Я. Пауль Эрэнфест [Текст] // 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Атомиздат. – 1977. – 192С.
6. Смирнов В.К. Калибровка прокатных валков [Текст] / В.К. Смирнов, В.А. Шилов, Ю.В. Инатович // М.: Теплотехника. – 2008. – 490С.
7. Илюкович Б.М. Прокатка и калибровка. Справочник [Текст] // Днепропетровск: РВА – «Дніро–ВАЛ». – 2004. – Том 6. – 824С.
8. Бахтинов Б.П. Калибровка прокатных валков [Текст] / Б.П. Бахтинов, М.М. Штернов // М.: Металлургиздат. – 1953. – 784С.
9. Шилов В.А. Моделирование формоизменения металла при прокатке рельсов в универсальных калибрах [Текст] / В.А. Шилов, Р.А. Литвинов, Д.Л. Шварц // Труды Международной научно-практической конференции «Инженерные системы – 2009». Москва, 6–9 апреля 2009 г. М.: РУДН. – 2009. – Т.1. – С.173–178.

10. Шварц Д.Л. Теоретическое исследование прокатки рельсового профиля в универсальном калибре. Сообщение 2 [Текст] // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2015. – Т.58. – №7. – С.526–530.
11. Литовченко Н.В. Калибровка профилей и прокатных валков [Текст] // М.: Металлургия. – 1990. – 432С.
12. Диомидов Б.Б. Калибровка прокатных валков [Текст] / Б.Б. Диомидов, Н.В. Литовченко // М.: Металлургия. – 1970. – 312С.
13. Литовченко Н.В. Калибровка валков сортовых станов [Текст] / Н.В. Литовченко, Б.Б. Диомидов, В.А. Курдюмова // М.: Металлургия. – 1964. – 640С.
14. Nigris G. Profile sizing process for high-quality medium heavy sections and rails / G. Nigris, J. Schroder // MPT International. – 2002. – №3. – P.48–54.
15. Зиновьев А.В. Процесс PSP для производства средне- и крупносортовых профилей и рельсов [Текст] // Новости черной металлургии за рубежом. – 2003. – №2. – С.69–72.
16. Поляков В.В. Развитие прокатки рельсов за рубежом [Текст] / В.В. Поляков, Е.А. Артамонова // Обзор. информ. – М.: Ин-т «Черметинформация». – 1989. – 30С.
17. Бондин А.Р. Исследование закономерностей прокатки рельсов в четырехвалковых калибрах с целью определения основных параметров для проектирования универсальных клетей: дисс. канд. техн. наук: 05.16.05. Свердловск. Уральский политехн. ин-т. Свердловск, 1985. – 194С.
18. Матвеев Б.Н. Современные рельсопрокатные станы [Текст] // Бюлл. «Черная металлургия». М.: ОАО «Черметинформация». – 2006. – №2. – С.40–43.
19. Свейковски У. Производство рельсов высокого качества с использованием компактных универсальных клетей и технологий Rail Cool [Текст] / У. Свейковски, Т. Нерзак // Металлургическое производство и технология (МРТ). Русское издание. – 2006. – №2. – С.50–56.
20. Смирнов В.К. Производство рельсов с применением универсальных клетей за рубежом [Текст] / В.К. Смирнов, В.А. Паршин, М.В. Смирнов [и др.] // Черная металлургия: Бюлл. ин-та «Черметинформация». – 1983. – №20. – С.28–39.

21. Stambach R. Das Walzen von Trägern und Schienen an Triegergerüsten der Kontinuum Universalwalzverfahren. Kalibreur. – 1968. – №9.
22. Lassent A. Le train à poutrelles et à rails de l'usine d'Hayange (SASILOR). Revue de métallurgie. – 1974. – Vol.11. – №10. – P.733–748.
23. Mennel G. Schienenwalzung in Universal Gerüst der Modernisierung der Straße Hayange. Der Kalibreur. – 1981. – №35. – S.15–16.
24. Kinoshita K. On reconstruction of Rail Mill and Newly – developed rails of Nippon Steel Corporation / K. Kinoshita, M. Hattori, H. Hagashiga, K. Isozumi // Nippon: Steel Technical Report Overseas. – 1973. – №3.
25. Schienenstrassen in USA und Canada. Stahl und Eisen. – 1983. – Vol.103. – №1. – P.12.
26. Svejkský U. Newest technologies for economical sections production // AISE Steel Technology. – 2002. – №2. – P.33–39.
27. Frank E. Föhrer. Steel Dynamics Commissions Its New Structural and Rail Division // AISE Steel Technology. – 2002. – №11–12. – P.27–35.
28. Зиновьев А.В. Ввод в эксплуатацию нового рельсобалочного стана фирмы «STEEL DYNAMICS» [Текст] // Новости черной металлургии за рубежом. – 2003. – №2. – С.73–74.
29. Ulrich Svejkský and Roy E. Peralta. State of the Art of Rail Rolling // AISE Steel Technology. – October 2005. – P.5.
30. Матвеев Б.Н. Стан с калибрующей клетью для прокатки высококачественных средне- и крупносортовых профилей и рельсов [Текст] // Производство проката. – 2003. – №10. – С.47–48.
31. Пфайлер Х. Новый сверхсовременный рельсопрокатный стан фирмы Voestalpine Schienen GmbH (Leoben/Donawitz) [Текст] / Х. Пфайлер, Н. Кек, Дж. Шрейдер, Л. Маэструтти // 2006. – 8С.
32. Свейковский У. Производство рельсов с использованием кассетных клетей и современных технологий охлаждения [Текст] / У. Свейковский, Т. Нерзак // Черные металлы. – 2008. – №1. – С.32–36.

33. Universal rail and section rolling mill for Wisco // NEWSletter SMS metallurge. – September 2006. – №2. – P.78.

34. Головатенко А.В. Развитие технологии прокатки и процессов калибровки железнодорожных рельсов [Текст] / А.В. Головатенко, К.В. Волков, В.В. Дорофеев [и др.] // Производство проката. – 2014. – №2. – С.25–39.

35. Добрянский А.В. К вопросу об оптимизации профиля острякового рельса [Текст] / А.В. Добрянский, Е.В. Полевой, В.В. Дорофеев [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2024. – №5. – С.19–21.

36. ГОСТ Р 55820–2013. Рельсы железнодорожные остряковые. Технические условия. – Введ. 2014-07-01. – М. Стандартинформ. – 2014. – 70С.

37. Глюзберг Б.Э. Элементы стрелочных переводов для Российских железных дорог [Текст] / Б.Э. Глюзберг, В.В. Королев, И.В. Шишкина // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевом хозяйстве. – 2019. Т. 14 (14). – №14. – С.17–20.

38. EN 13674-2:2011-01 Железные дороги – Верхнее строение пути – Рельсы – Часть 2: Рельсы для стрелочных переводов и крестовин, применяемые совместно с рельсами Виньоля 46 кг/м и более.

39. ТУ 32 ЦП 804–94. Рельсы усовиковые типа УР65. Технические условия. – Введ. 1995-01-01. ПТКБ. ЦП. МПС – 7С.

40. ТС 05757676–43–2016. Заготовка рельса Т62. Техническое соглашение. – Введ. 2016-07-13. 6С.

41. Головатенко А.В. Развитие технологии прокатки и процессов калибровки железнодорожных рельсов [Текст] / А.В. Головатенко, К.В. Волков, А.В. Добрянский [и др.] // Производство проката. – 2014. – №2. – С.25–39.

42. Авторское свидетельство СССР 1667952, МКИ⁵ В 21 В 1/08. Способ прокатки несимметричных рельсовых профилей [Текст] / И.А. Шарапов, Е.Л. Кравченко, В.В. Дорофеев // заявитель и патентообладатель «Кузнецкий металлургический комбинат». – №466674/02; заявл. 27.03.1989; опубл. 07.08.1991; Бюл. №29.

43. Перетяцько В.Н. Формоизменение металла в трапецевидных калибрах при прокатке рельсов Р65 [Текст] / В.Н. Перетяцько, Е.М. Пятайкин, Е.Р. Браунштейн // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1998. – №8. – С.41–43.

44. Шарапов И.А. Рациональная система калибров для прокатки рельсов в черновых пропусках [Текст] / И.А. Шарапов, В.В. Дорофеев, В.А. Бердышев [и др.] // Сталь. – 1997. – №6. – С.61–62.

45. Дорофеев В.В. Усовершенствование технологии прокатки железнодорожных рельсов [Текст] / В.В. Дорофеев, В.А. Бердышев, И.А. Шарапов [и др.] // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1997. – №4. – С.39–41.

46. Чельшев Н.А. Прокатка заготовки рельсов [Текст] / Н.А. Чельшев, Н.В. Дадочкин // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1994. – №2. – С.30–33.

47. Шарапов И.А. Калибровка несимметричных рельсовых профилей [Текст] / И.А. Шарапов, Е.Л. Кравченко, В.В. Дорофеев // Сталь. – 1990. – №12. – С.47–51.

48. Авторское свидетельство СССР 1445823, МКИ⁴ В 21 В 1/08. Способ калибровки рельсов [Текст] / А.Ф. Кузнецов, И.К. Лысенко, И.А. Шарапов [и др.] // заявитель и патентообладатель «Кузнецкий металлургический комбинат». – №4251569/23–02; заявл. 01.06.1987; опубл. 23.12.1988; Бюл. №47.

49. Авторское свидетельство СССР 1614869, МКИ⁵ В 21 В 1/08. Способ прокатки рельсов [Текст] / А.Ф. Кузнецов, И.А. Шарапов, Е.Л. Кравченко [и др.] // заявитель и патентообладатель «Кузнецкий металлургический комбинат». – №4404236/27–02; заявл. 06.04.1988; опубл. 23.12.1988; Бюл. №47.

50. Авторское свидетельство СССР 1694271, МКИ⁵ В 21 В 1/08. Способ прокатки рельсов [Текст] / А.Ф. Кузнецов, Е.Л. Кравченко, И.А. Шарапов // заявитель и патентообладатель «Кузнецкий металлургический комбинат». – №4426971/02; заявл. 16.05.1988; опубл. 30.11.1991; Бюл. №44.

51. Патент РФ 2097154, МКИ⁶ В 21 В 1/08. Способ производства железнодорожных рельсов [Текст] / Г.А. Галицын, В.А. Рейхарт, В.И. Лебедев [и др.] // патентообладатели Уральский институт металлов; АО «Кузнецкий металлургический комбинат». – №96114792/02; заявл. 23.07.1996; опубл. 27.11.1997; Бюл. №33.

52. Патент РФ 2394660, МПК В 21 В 1/08. Способ прокатки рельсов [Текст] / В.В. Дорофеев, А.Б. Юрьев, А.Ю. Каретников [и др.] // заявитель и патентообладатель АО «Новокузнецкий металлургический комбинат». – №2008135537/02; заявл. 01.09.2008; опубл. 20.07.2010; Бюл. №20.

53. Патент РФ 2103077, МПК⁶ В 21 В 1/08. Система калибров для прокатки рельсов в черновых пропусках [Текст] / И.А. Шарапов, В.В. Дорофеев, Г.Н. Юнин // заявитель и патентообладатель Кузнецкий металлургический комбинат им. В.И. Ленина. – №93001973/02; заявл. 12.01.1994; опубл. 27.01.1998; Бюл. №3 (II ч.).

54. Патент РФ 2223156, МПК⁷ В 21 В 1/08, В 21 В 108:02. Способ прокатки рельсов [Текст] / В.В. Дорофеев, С.Г. Литвин, Е.М. Пятайкин [и др.] // заявитель и патентообладатель АО «Кузнецкий металлургический комбинат». – №2001131270/02; заявл. 19.11.2001; опубл. 10.02.2004; Бюл. №4 (III ч.).

55. Патент РФ 2241556, МПК⁷ В 21 В 1/08, В 21 В 108:02. Способ прокатки рельсов [Текст] / В.В. Павлов, В.В. Дорофеев, Е.Л. Кравченко [и др.] // патентообладатель ООО «Рельсы Кузнецкого металлургического комбината». – №2003124405/02; заявл. 04.08.2003; опубл. 10.12.2004; Бюл. №34 (IV ч.).

56. Патент РФ 2288045, МПК⁸ В 21 В 1/088. Способ прокатки симметричных профилей сложной формы [Текст] / Е.М. Пятайкин, Е.Л. Кравченко, И.А. Шарапов [и др.] // патентообладатель АО «Новокузнецкий металлургический комбинат». – №2005112379; заявл. 25.04.2005; опубл. 27.11.2006; Бюл. №33 (I ч.).

57. Патент РФ 2429090, МПК В 21 В 1/08. Способ прокатки рельсов [Текст] / А.В. Кушнарев, А.А. Киричков, В.Д. Егоров [и др.] // заявитель и патентообладатель АО «Нижнетагильский металлургический комбинат». – №2010114609/02; заявл. 12.04.2010; опубл. 20.09.2011; Бюл. №26.

58. Поляков В.В. Состояние рельсопрокатного производства в СССР и за рубежом. Обзор. информ. [Текст] / В.В. Поляков, И.Г. Бухвостов, Е.А. Артамонова // М.: Ин-т «Черметинформация». – 1990. – 73С.

59. Артамонова Е.А. Производство рельсового проката повышенного качества за рубежом [Текст] // Бюллетень «Черная металлургия». – 1984. – №6. – С.16–24.

60. Янг Р. Прокатка швеллеров с использованием универсальной клетки на заводе фирмы «Нукор Стил-Техас», шт. Техас, США. [Текст] / Р. Янг, М. Сирайт // Iron and Steel Technology. – 2007. – Vol. 4. – №9. – P.41–48.
61. Stalinskii D.V. Production and quality of rails [Text] / D.V. Stalinskii, A.S. Rudyuk // Steel in Translation. – 2011. – Vol. 41. – №5 – P.73–77.
62. Forner E. Steel Dynamics Commissions Ist new struchtural and rail division [Text] / E. Forner, Frank // AISI Steel Technology. – 2002. – №12. – P.27–35.
63. Desvallees J. Universal rolling of rails – State of the art [Text] / J. Desvallees, A. Faessey, G. Gouth, G. Mennel // Iron and Steel engineer – 1987. – March. – P.25–31.
64. Исследование и разработка технологии прокатки рельсов с использованием универсальных клеток. Отчет о НИР. УПИ, Урал НИИЧМ. Рук. В.К. Смирнов. № Г.Р. 81067219. Свердловск. – 1982. – 103С.
65. Шварц Д.Л. опережение при прокатке рельсового профиля в универсальном калибре [Текст] / Д.Л. Шварц, В.А. Шилов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. – 2016. – Т.16. – №1. – С.66–71.
66. Шварц Д.Л. Новые вариационные решения по прокатке фланцевых профилей в универсальных калибрах [Текст] / Д.Л. Шварц, С.О. Непряхин, В.А. Шилов // Metallurg. – 2016. – №12. – С.54–58.
67. Шилов В.А. Развитие методов расчета калибровок валков для прокатки рельсов [Текст] / В.А. Шилов, Д.Л. Шварц, Р.А. Литвинов // Производство проката. – 2008. – №1. – С.29–32.
68. Shilov V.A. Shaping of metal when rolling rails in universal grooves [Text] / V.A. Shilov, D.L. Shvarts, R.A. Litvinov // Steel in Translation. – 2008. – Vol. 38. – №3. – P.214–216.
69. Шилов В.А. Рациональный режим обжатий при прокатке рельсов в универсальных калибрах [Текст] / В.А. Шилов, Д.Л. Шварц, Р.А. Литвинов // Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов. Труды международной научно-технической конференции. Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета. – 2007. – С.434–439.

70. Шилов В.А. Метод расчета режимов деформации металла при прокатке рельсов в универсальных калибрах [Текст] / В.А. Шилов, Д.Л. Шварц, Р.А. Литвинов // Труды седьмого конгресса прокатчиков. Т.1 (Москва, 15–18 октября 2007 г.). М.: МОО «Объединение прокатчиков», Корпорация производителей черных металлов. – 2007. – С.519–524.

71. Шилов В.А. Теоретические основы расчета рациональных режимов прокатки рельсов в универсальных калибрах [Текст] / В.А. Шилов, Д.Л. Шварц, Р.А. Литвинов // Современные технологии производства транспортного металла. Материалы 3-ей Международной конференции «Трансмет – 2007». – 2008. – С.178–181.

72. Шилов В.А. Моделирование процесса прокатки рельсов в универсальных калибрах [Текст] / В.А. Шилов, Р.А. Литвинов, Д.Л. Шварц // Производство проката. – 2009. – №8. – С.20–25.

73. Патент РФ 2668626, МПК В 21 В 1/08. Способ прокатки рельсов [Текст] / А.М. Михайленко, Д.Л. Шварц // №2017115538; заявл. 02.05.2017; опубл. 02.10.2018; Бюл. №28.

74. Шилов В.А. Компьютерное моделирование процесса прокатки рельсов в универсальных калибрах [Текст] / В.А. Шилов, Р.А. Литвинов, Д.Л. Шварц // Современные металлические материалы и технологии (СММТ–2009). Труды международной научно-технической конференции Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета. – 2009. – С.73–74.

75. Шилов В.А. Приращение и утяжка фланцев при прокатке рельсов в универсальных калибрах [Текст] / В.А. Шилов, Р.А. Литвинов, Д.Л. Шварц // Производство проката. – 2010. – №7. – С.27–30.

76. Shilov V.A. Aspects of the rolling of long rails on a universal rail-beam mill [Text] / V.A. Shilov, D.L. Shvarts, E.O. Skosar' // Metallurgist. – 2016. – Vol. 60. – Iss. 3. – P.260–266.

77. EN 13674-1:2011+A1:2017 Железные дороги. Верхнее строение пути. Рельсы. Часть 1: Рельсы Виньоля 46 кг/м и более. Немецкое издание EN 13674-1:2011+A1:2017.

78. Wu L. Optimisation of railhead profiles for curved tracks using improved nonuniform rational B-splines and measured profiles [Text] / L. Wu, J. Liu, M. Dhana-sekar, H. Wang, Z. Wen // Wear. – 2019. – №418. – P.123–132.

79. Samoilovich Yu.A. Possibility of producing railway rails with increased strength and minimum buckling [Text] // Metallurgist. – 2012. – Vol.55. – №11. – P.903–911.

80. Sinel'nikov V.A. Technological aspects of improving the quality and service properties of railroad rails [Text] / V.A. Sinel'nikov, G.A. Filippov // Metallurgist. – 2001. – Vol.45. – №9. – P.403–407.

81. Shvarts D.L. Rolling of rail profiles in a universal groove. Part 1. [Text] // Steel in Translation. – 2015. – Vol. 45. – №6. – P.430–435.

82. Shvarts D.L. Rolling of rail profiles in a universal groove. Part 2. [Text] // Steel in Translation. – 2015. – Vol. 45. – №7. – P.499–502.

83. Смирнов В.К. Исследование прокатки рельсов в универсальных клетях [Текст] / В.К. Смирнов, А.Р. Бондин, А.М. Михайленко // Производство проката. – 2003. – №12. – С.24–30.

84. Гарбер Э.А. Теория прокатки: учебник для вузов [Текст] / Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова // Старый Оскол: ТНТ. – 2017. – 312С.

85. Целиков А.И. Теория прокатки: справочник [Текст] / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин [и др.] // М.: Металлургия. – 1982. – 335С.

86. Пасечник Н.В. Проблемы точности расчетов силовых воздействий при горячей продольной прокатке [Текст] / Н.В. Пасечник, В.Г. Дрозд // Неделя металлов в Москве, 9–12 ноября 2010 г.: сб. тр. конф. – М. – 2011. – С.221–231.

87. Шварц Д.Л. Метод оперативного контроля усилий и крутящих моментов прокатки [Текст] / Д.Л. Шварц, Ю.В. Шилов // Зав. лаб. Диагностика материалов. – 2011. – №11. – С.54–56.

88. Полухин П.И. Прокатка и калибровка двутавровых балок [Текст] // М.: Металлургиздат. – 1956. – 176С.

89. Вусатовский З. Основы прокатки [Текст] // М.: Металлургия. – 1976. – 582С.

90. Павлов И.М. Теория прокатки [Текст] // М.: Metallurgizdat. – 1950. – 610С.

91. Перунов Г.П. Оценка силовой загрузки подшипников вертикальных валков универсальных рабочих клеток балочных станов [Текст] / Г.П. Перунов, М.И. Журухин, Ю.В. Инарович // Производство проката. – 2014. – №10. – С.29–33.

92. Шварц Д.Л. Среднее контактное давление и усилие деформации при прокатке двутавровых профилей в универсальном балочном калибре [Текст] / Д.Л. Шварц, С.О. Непряхин, В.А. Шилов // Производство проката. – 2014. – №10. – С.25–28.

93. Николаев В.А. Определение силы прокатки по мощности главного двигателя [Текст] // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2014. – №1. – С.52–55.

94. Сталинский Д.В. Компьютерная программа расчета технологических параметров прокатки [Текст] // Сталь. – 2014. – №3. – С.53–56.

95. Клименко В.М. Технологические и силовые резервы прокатных станов [Текст] / В.М. Клименко, В.И. Погоржельский, В.С. Горелик [и др.] // М.: Metallургия. – 1976. – 240С.

96. Зайков М.А. Процесс прокатки [Текст] / М.А. Зайков, В.П. Полухин, А.М. Зайков [и др.] // М.: МИССИС. – 2004. – 640С.

97. Тарновский И.Я. Прокатка на блюминге [Текст] / И.Я. Тарновский, А.А. Поздеев [и др.] // М.: Metallurgizdat. – 1963. – 389С.

98. Степанский Л.Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением [Текст] // М.: Машиностроение. – 1979. – 215С.

99. Бекоффен В. Процессы деформации [Текст] // М.: Metallургия. – 1977. – 228С.

100. Горенштейн М.М. Энергосиловые параметры прокатки фасонных профилей из литых заготовок [Текст] / М.М. Горенштейн, В.С. Рутес, А.И. Манохин [и др.] // Сталь. – 1966. – №8. – С.725–727.

101. Фастыковский А.Р. Особенности силового баланса универсальных калибров современных рельсобалочных станов [Текст] / 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.) – С.299–304.

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

103. Чижигов Ю.М. Теория подобия и моделирования процессов обработки металлов давлением [Текст] // М.: Металлургия. – 1970. – 125С.

104. Полухин В.П. Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых станов // М.: Металлургия. – 1972. – 512С.

105. Базайкин В.И. Полуобратный метод моделирования процессов холодной продольной прокатки. Кинематика [Текст] // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 1998. – №2. – С.24–27.

106. Базайкин В.И. Полуобратный метод моделирования процессов холодной продольной прокатки. Напряжения [Текст] / В.И. Базайкин, В.Е. Громов, Д.Р. Лоскутов // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 1998. – №4. – С.20–23.

107. Базайкин В.И. Моделирование энергетических затрат второго уровня в современных технологиях ОМД [Текст] / В.И. Базайкин, В.Е. Громов, Д.Р. Лоскутов // *Математические и экономические модели в оперативном управлении производством: сб. научн.-техн. ст.* – Вып. 4. – М.: Электрика. – 1997. – С.72–75.

108. Евстифеев В.В. Имитационное моделирование в технологической подготовке производства фасонных изделий [Текст] / В.В. Евстифеев, А.А. Александров, И.С. Лексутов // *Вестник Академии военных наук*. – 2009. – №3 (28). – С.294–298.

109. Евстифеев В.В. Использование метода аппроксимации перемещений для изучения деформированного состояния осесимметричных заготовок [Текст] / В.В. Евстифеев, В.В. Требин // Омск: ОмПИ. – 1992. – Деп. ВИНТИ 14.09.92. – №2776–В92. – 9С.

110. Хазен А.М. О возможном и невозможном в науке или где границы моделирования интеллекта [Текст] // М.: Наука. гл. ред. физ.-мат. лит. – 1998. – 384С.
111. Данченко В.Н. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Численные методы [Текст] / В.Н. Данченко, А.А. Миленин, В.И. Кузьменко // Днепропетровск: Системные технологии. – 2005. – 448С.
112. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике [Текст] // пер. с англ. под ред. Б.Е. Победри. – М.: Мир. – 1975. – 542С.
113. Клованич С.Ф. МКЭ в нелинейных задачах инженерной механики [Текст] // Запорожье: издательство журнала «Свет геотехнологии». – 2009. – 400С.
114. Каплунов Б.Г. Компьютерные системы моделирования пластических деформаций: учеб. пособие [Текст] / Б.Г. Каплунов, Е.Г. Полищук, Д.С. Жиров [и др.] // Челябинск: изд. ЮУПГУ. – 2000. – 67С.
115. Чумаченко Е.Н. Математическое моделирование и оптимизация процессов деформирования материалов при обработке давлением [Текст] / Е.Н. Чумаченко, И.В. Логашина // М.: ООО НПП ЭКОМЕТ. – 2008. – 400С.
116. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов [Текст] // М.: Мир. – 1979. – 392С.
117. Степанский Л.Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением [Текст] // М.: Машиностроение. – 1979. – 215С.
118. Чумаченко Е.Н. Математическое моделирование течения металла при прокатке: учеб. пособие [Текст] / Е.Н. Чумаченко, И.В. Логашина // М.: МГИЭМ. – 2005. – 147С.
119. Чумаченко Е.Н. Математическое моделирование пластического формоизменения металла при обработке материалов давлением [Текст] // М.: МГИЭМ. – 1998. – 157С.
120. Герреро М.А. Моделирование процесса горячей прокатки. Применение к прокатке рельсов UIC-60 [Текст] / М.А. Герреро, Х. Бельзунсе, М.К. Бетегон, Х. Хорхе, Дж. Фко Виджил. // Материалы 4-й Международной конференции IASME/WSEAS по МЕХАНИКЕ сплошных сред (СМ'09) – 2018. – 213С.

121. Kobayashi S. Metallforming and the FiniteElement Method [Text] / S. Kobayashi, S.I. Oh, T. Altan // Oxford University Press. – 1989.
122. Kobayashi Shiro Metal forming and the finite element method / Shiro Kobayashi, Soo Ik Oh, Taylan Altan // Oxford series on advanced manufacturing. – 1989.
123. Riljak Stanislav Numerical simulation of shape rolling: PhD dissertation // Royal institute of technology. School of industrial engineering and management. Division of mechanical metallurgy. SE-100 44. – Stockholm. – Sweden. – 2006.
124. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов. В 3 т. Т1: Физико-механические основы пластической деформации [Текст] // М.: Metallurgizdat. – 1961. – 376С.
125. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов. В 3 т. Т2: Физико-химическая теория пластичности [Текст] // М.: Metallurgizdat. – 1961. – 416С.
126. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов. В 3 т. Т3: Теория пластической обработки металлов [Текст] // М.: Metallurgizdat. – 1961. – 306С.
127. Cockcroft M.G. Ductility and the Workability of Metals [Text] / M.G. Cockcroft, D.G. Latham // J. Inst. Metals. – 1968. – Vol. 96. – P.33–39.
128. Kolbasnikov N.G. Deformatsiya i razrushenie materialov [Text] / N.G. Kolbasnikov, V.V. Mishin, I.A. Shishov, I.S. Kistankin, A.V. Zabrodin // Deformation and Fracture of Materials. – 2013. – №9. – P.14–24.
129. Васильев Я.Д. Теория продольной прокатки: ученик для магистров вузов [Текст] / Я.Д. Васильев, А.А. Минаев // Донецк: УНИТЕХ. – 2010. – 456С.
130. Целиков А.И. Теория продольной прокатки: учеб. пособие [Текст] / А.И. Целиков, Г.С. Никитин, С.С. Рокотян // М.: Metallurgiya. – 1980. – 380С.
131. Головатенко А.В. Анализ экспериментальной зависимости сопротивления деформации рельсовой стали Э78ХСФ от температуры, скорости и степени деформации [Текст] / А.В. Головатенко, В.В. Дорофеев, А.В. Добрянский [и др.] // Metallurg. – 2014. – №6. – С.118–123.
132. Golovatenko A.V. Improvement of rolling modes of long length rails on the universal rail and structural steel mill EVRAZ ZSMK [Text] / A.V. Golovatenko,

A.A. Umansky, V.N. Kadykov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – №150. – P.12–28.

133. Зибель Э. Обработка металлов в пластическом состоянии: пер. с нем. [Текст] // М.: Metallurgizdat. – 1934. – 400С.

134. Зиновьев А.В. Теория обработки металлов давлением. Раздел трение в процессах прокатки; учебн. пособие под ред. П.И. Полухина [Текст] / А.В. Зиновьев, Ю.П. Чумаков // М.: МИСиС. – 1983. – 80С.

135. Казакевич Г.С. Механика сплошных сред. Теория упругости и пластичности [Текст] / Г.С. Казакевич, А.И. Рудской // СПб.: Издательство СПбГПУ. – 2003. – 264С.

136. Дель Г.Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости [Текст] // М.: Машиностроение. – 1971. – 200С.

137. Пригоровский Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений: справочник [Текст] // М.: Машиностроение. – 1983. – 248С.

138. Штода М.Н. Классификация ящичных калибров по виду напряженно-деформированного состояния [Текст] // Metallurg. i gornorud. prom-st'. – 2013. – №5. – С.30–33.

139. Сухарев И.П. Исследование деформаций и напряжений методом муаровых полос [Текст] / И.П. Сухарев, Б.Н. Ушаков // М.: Машиностроение. – 1969. – 208С.

140. Смирнов В.С. Теория прокатки [Текст] // М.: Metallurgiya. – 1967. – 460С.

141. Смирнов В.С. Теория обработки металлов давлением [Текст] // М.: Metallurgiya. – 1973. – 496С.

142. Соколовский В.В. Теория пластичности [Текст] // М.: Высш. шк. – 1969. – 608С.

143. Сторожев М.В. Теория обработки металлов давлением [Текст] / М.В. Сторожев, Е.А. Попов // М.: Машиностроение. – 1971. – 424С.

144. Томсен Э. Механика пластических деформаций при обработке металлов [Текст] / Э. Томсен, Ч. Янг, Ш. Кобаяши // М.: Машиностроение. – 1969. – 503С.
145. Унксов Е.П. Инженерная теория пластичности [Текст] // М.: Машгиз. – 1959. – 328С.
146. Хилл Р. Математическая теория пластичности [Текст] // М.: ГИТТЛ. – 1956. – 407С.
147. Целиков А.И. Основы теории прокатки [Текст] // М.: Metallurgia. – 1965. – 247С.
148. Добрянский А.В. Разработка энергоэффективных режимов прокатки асимметричных острьяковых рельсов на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК» [Текст] / А.В. Добрянский, В.В. Дорофеев, Д.Э. Первушин [и др.] // Сталь – 2025 – №10 – С.19–30.
149. Добрянский А.В. К вопросу об оптимизации профиля острьяковых рельсов [Текст] / 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.
150. Головатенко А.В. Развитие технологии прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на современном универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК» [Текст] / А.В. Головатенко, Г.Н. Юнин, А.В. Добрянский [и др.] // Труды XIII Конгресс прокатчиков (том I) 25-27 октября 2022 г., г. Москва. – С.96–102.
151. Юнин Г.Н. Опыт разработки калибровки и создания технологии прокатки на современном рельсопрокатном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК» сложных асимметричных профилей типа рельсов острьяковых [Текст] / 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. – 9/17. – Библиогр.: 3 назв. – 9/17.

152. Дорофеев В.В. Усовершенствование технологии прокатки рельсов в универсальных клетях на современных рельсопрокатных станах [Текст] / В.В. Дорофеев, Г.Н. Юнин, А.В. Головатенко [и др.] // Технология металлов. – 2021. – №10. – С.50–56.

153. Шварц Д.Л. Разработка теоретических основ и обоснование основных технологических решений процесса прокатки железнодорожных рельсов на универсальных рельсобалочных станах: дисс. ... докт. техн. наук // – Екатеринбург. – 2019. – 297С.

154. Юнин Г.Н. Технология прокатки остряковых рельсов на универсальном рельсопрокатном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК» [Текст] / Г.Н. Юнин, А.В. Головатенко, А.В. Добрянский [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2017. – №7. – С.24–27. – 8/17. – Библиогр.: 3 назв. – Библиогр.: 3 назв. – 8/17.

155. Уманский А.А. Совершенствование режимов прокатки остряковых рельсов на универсальном рельсобалочном стане [Текст] / А.А. Уманский, В.В. Дорофеев, А.В. Добрянский [и др.] // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. – 2017. – №38. – С.55–64.

156. Дорофеев В.В. Анализ и разработка калибровки прокатных валков для производства асимметричных рельсовых профилей в условиях универсального рельсобалочного стана [Текст] / В.В. Дорофеев, А.В. Головатенко, А.В. Добрянский [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2017. – №12. – С.941–946. – 1/18. – Библиогр.: 22 назв. – Библиогр.: 22 назв. – 1/18.

157. 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.

158. Добрянский А.В. Способ прокатки асимметричных рельсовых профилей в черновых калибрах на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ

ЗСМК» [Текст] / А.В. Добрянский, А.В. Головатенко, В.В. Дорофеев [и др.] // Черные металлы. – 2020. – №5. – С.9–13. – 7/20. – Библиогр.: 21 назв.

159. Чекмарев А.П. Калибровка прокатных валков [Текст] / А.П. Чекмарев, М.С. Мутьев, Р.А. Машковцев // Учебное пособие для вузов. Изд-во «Металлургия». – 1971. – 174С.

160. Сметанин С.В. Разработка прогрессивных калибровок острых и усиковых рельсов на универсальном рельсобалочном стане [Текст] / С.В. Сметанин, А.Б. Юрьев, А.В. Добрянский [и др.] // Metallurg. – 2019. – №6. – С.35–39.

161. Дорофеев В.В. Разработка технологии прокатки рельсов трамвайных желобчатых с увеличенным сроком службы в условиях универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК» [Текст] / В.В. Дорофеев, А.В. Добрянский, Д.Э. Первушин [и др.] // Проблемы черной металлургии и материаловедения – 2023. – №4 – С.19–31.

162. Дорофеев В.В. Разработка прогрессивных калибровок асимметричных рельсовых профилей на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК» [Текст] / В.В. Дорофеев, А.В. Добрянский, А.Р. Фастыковский // XXI Международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации, качество» «Металлургия-2019», Россия, г. Новокузнецк, СибГИУ, 23-24 октября 2019 г. – С.202–208.

163. Уманский А.А. Совершенствование режимов прокатки рельсовых профилей специального назначения при их производстве на универсальном рельсобалочном стане [Текст] / А.А. Уманский, В.В. Дорофеев, А.В. Добрянский [и др.] // Черные металлы. – 2018. – №10. – С.38–43.

164. 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 [и др.] // Актуальные научные исследования: сборник статей XXXII Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение. – 2026. – С.99–110.

Приложение 1

 **ЕВРАЗ**



УТВЕРЖДАЮ

Директор по рельсовому производству
в филиале «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ»

Д.А. Булгаков

« 12 » мая 2026 г.

Акт

использования результатов диссертационной работы Добрянского Андрея Владимировича на рельсобалочном стане в филиале «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ»

Настоящим актом подтверждается, что по результатам выполнения исследований в рамках диссертационной работы Добрянского А.В. в рельсобалочном цехе ПАО «ЕВРАЗ» филиал «Западно-Сибирский металлургический комбинат» (ЗСМК) на основании компьютерного моделирования с использованием программного пакета QForm и анализа экспериментальных данных усилия прокатки выявлена возможность интенсификации производства острьяковых рельсов типа ОР65 в обжимных клетях универсального рельсобалочного стана в филиале «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ».

Разработана усовершенствованная схема прокатки острьяковых рельсов типа ОР65 в обжимных клетях BD1 и BD2 универсального рельсобалочного стана в филиале «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ», отличающаяся от контрактной, переносом трапецевидного осевого калибра с клетки BD2 в клетку BD1, что позволит исключить два пропуска в клетку BD2, за счет увеличения обжатий в прямоугольных калибрах клетки BD1.

В результате использования нового режима прокатки острьяковых рельсов типа ОР65 уменьшено количество пропусков в клетку BD2, что позволило сократить цикла прокатки на 13,2 сек., и повысить производительность стана при производстве данного вида продукции на 39,8 т/ч, сократить количество брака по дефекту «плена» и снизить удельный расход прокатных валков. Также положительным моментом явилось более равномерная загрузка клеток BD1 и BD2.

Годовой экономический эффект от разработанных мероприятий составил 10,8 млн. руб. при долевом участии Добрянского А.В. 50% или 5,4 млн.руб.

Начальник рельсобалочного цеха
в филиале «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ»

В.А.Пицко



**Расчет
экономического эффекта от использования
результатов диссертационной работы
Добрянского Андрея Владимировича
на рельсобалочном стане филиал «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ»**

Экономический эффект от использования новой схемы прокатки ОР65 на клети BD2 разработанной в ходе выполнения диссертационного исследования А.В. Добрянского, рассчитан за счет сокращения количества брака по дефекту «плена», сокращения удельного расхода прокатных валков и увеличения производительности стан.

Расчет выполнен в соответствии с «Методикой расчета экономического эффекта в АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Расчет производился по формулам:

$$\mathcal{E}_{\text{пт}} = (A_2 - A_1) \times \text{МД},$$

где $\mathcal{E}_{\text{пт}}$ – годовой экономический эффект, руб.;

A_1, A_2 – годовой объем производства продукции (работ) до и после внедрения результатов диссертационной работы, ед.;

МД – маржинальный доход на единицу продукции, руб./т.

$$\mathcal{E}_{\text{бр}} = (A_2 - A_1) \times (\text{Ц}_p - \text{Ц}_m),$$

где $\mathcal{E}_{\text{бр}}$ – годовой экономический эффект, руб.;

A_1, A_2 – годовой объем производства продукции (работ) до и после внедрения результатов диссертационной работы, ед.;

Ц_p – цена реализации рельсов в отчетном периоде, руб./т;

Ц_m – цена реализации металлолома в отчетном периоде, руб./т;

$$\mathcal{E}_{\text{вал}} = (\text{С}_{\text{пер1}} - \text{С}_{\text{пер2}}) \times A_2,$$

где $\mathcal{E}_{\text{вал}}$ – годовой экономический эффект, руб.;

$\text{С}_{\text{пер1}}, \text{С}_{\text{пер2}}$ – переменная себестоимость единицы продукции, производимой с помощью базовой техники и результатов диссертационной работы, руб.;

A_2 – годовой объем производства продукции с помощью результатов диссертационной работы в расчетном году, в натуральных единицах, ед.



Данные:

№	Показатель	Обозначение	Ед. изм.	Использование	
				до	после
1	Объем производства продукции ОР65	A_1, A_2	т	21619,6	25160,7
2	Производительность ОР65	P_1, P_2	т	93,39	108,03
3	Производительность Р65	Р	кг/т	194,6	194,6
4	Выход годного на Р65	—	%	95	95
5	Норматив текущих простоев РБЦ	ТП _Р	%	27	27
6	Маржинальный доход Р65	МД	руб./т	—	11416,092
7	Дополнительные капитальные вложения	К _{доп}	руб.	—	—
8	Количество брака по дефекту «плена» на ОР65	B_1, B_2	т	265,904	114,638
9	% брака на ОР65 по дефекту	—	%	1,23	0,456
10	Цена реализации ОР65	Ц _Р	руб./т	—	29723,3
11	Цена м/лома	Ц _М	руб./т	—	16629,166
12	Расход валков клетки BD2	—	т	40,6	30
13	Изменение удельного расхода валков клетки BD2	—	кг/т	—	-0,686
14	Цена 1 т валков BD2	—	руб./т	—	215857,424
15	Цена 1 т м/лома от валков	—	руб./т	—	17008,5
16	Доля влияния на производительность	d	%	—	15
17	Доля влияния на брак по «плене»	d	%	—	40
18	Доля влияния на расход валков	d	%	—	40

$$\mathcal{E}_{\text{пт}} = \left(\frac{25160,7}{93,39} - \frac{25160,7}{108,03} \right) \times \left(1 - \frac{27}{100} \right) \times 0,95 \times 194,6 \times 11416,092 \times 0,15$$

$$= 8,4 \text{ млн. руб.}$$

$$\mathcal{E}_{\text{бр}} = \left(\frac{265,904}{21619,6} - \frac{114,638}{25160,7} \right) \times 25160,7 \times (29723,3 - 16629,166) \times 0,4$$

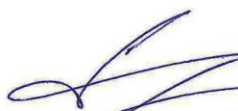
$$= 1,0 \text{ млн. руб.}$$

$$\mathcal{E}_{\text{вал}} = \frac{0,686}{1000} \times 25160,7 \times (215857,424 - 17008,5) \times 0,4 = 1,4 \text{ млн. руб.}$$

Общий годовой экономический эффект от использования новой схемы прокатки ОР65 на клетки BD2 разработанной в ходе выполнения диссертационного исследования Добрянского А.В. в рельсобалочном цехе филиал «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ» составил 10,8 млн. руб./год.

Заместитель начальника
рельсобалочного цеха
по технологии филиал
«ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ»

Главный специалист группы
рельсового производства
дирекции по экономике и финансам
Дивизиона Сибирь

 С.В. Дорофеев
 Т.Е. Юхина

Приложение 2

 **ЕВРАЗ**



УТВЕРЖДАЮ

Директор по рельсовому производству
в филиале «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ»

Д.А. Булгаков

« 12 » мая 2026 г.

Акт

использования результатов диссертационной работы Добрянского Андрея Владимировича на рельсобалочном стане в филиале «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ»

Добрянским А.В. разработаны калибровки для прокатки асимметричных рельсовых профилей ОР65, усовикового рельса типа УР65 и заготовки трамвайных рельсов Т62, при этом использованы методики расчета формоизменения металла в универсальных калибрах непрерывно-реверсивной группы клетей, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

В результате использования разработанных Добрянским А.В. методик расчета формоизменения металла в универсальных калибрах для прокатки асимметричных рельсовых профилей в непрерывно-реверсивной группе клетей на универсальном рельсобалочном стане достигнуто сокращение количества брака по дефекту «плена» и увеличение производительности стана.

В рамках диссертационной работы Добрянского А.В. в рельсобалочном цехе в филиале «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ» использованы следующие разработки, признанные изобретениями:

1. Патент № 2721968 «Способ прокатки несимметричных рельсовых профилей в черновых калибрах» (дата приоритета 07.10.2019).
2. Патент № 2627140 «Способ прокатки рельсов» (дата приоритета 10.10.2016).

Годовой экономический эффект от использования разработанных методик расчета калибровок в универсальных клетях при прокатке асимметричных рельсовых профилей и решений, защищенных патентами, составил 31,6 млн. руб. при долевом участии Добрянского А.В. 50% или 15,8 млн. руб.

Начальник рельсобалочного цеха
в филиале «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ»

 В.А.Пицко



**Расчет
экономического эффекта от использования
результатов диссертационной работы
Добрянского Андрея Владимировича
на рельсобалочном стане филиал «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ»**

Экономический эффект от использования методики расчета формоизменения металла в универсальных калибрах для прокатки ассиметричных рельсовых профилей в непрерывно-реверсивной группе клетей на универсальном рельсобалочном стане разработанной в ходе выполнения диссертационного исследования А.В. Добрянского, рассчитан за счет сокращения количества брака по дефекту «плена» и увеличения производительности стан.

Расчет выполнен в соответствии с «Методикой расчета экономического эффекта в АО «ЕВРАЗ ЗСМК»». Расчет производился по формулам:

$$\mathcal{E}_{\text{уп}} = (A_2 - A_1) \times \text{МД},$$

где $\mathcal{E}_{\text{уп}}$ – годовой экономический эффект, руб.;

A_1, A_2 – годовой объем производства продукции (работ) до и после внедрения результатов диссертационной работы, ед.;

МД – маржинальный доход продукции соответствующей сортаменту на единицу продукции, руб./т.

$$\mathcal{E}_{\text{уп}} = (A_2 - A_1) \times (\text{Ц}_p - \text{Ц}_m),$$

где $\mathcal{E}_{\text{уп}}$ – годовой экономический эффект, руб.;

A_1, A_2 – годовой объем производства продукции (работ) до и после внедрения результатов диссертационной работы, ед.;

Ц_p – цена реализации рельсов в отчетном периоде, руб./т;

Ц_m – цена реализации металлолома в отчетном периоде, руб./т;



Данные:

№	Показатель	Обозначение	Ед. изм.	Использование	
				до	после
1	Объем производства продукции ОР65	A ₁ , A ₂	т	16580,42	22648,122
2	Производительность ОР65	P ₁ , P ₂	т	83,29	91,04
3	Производительность Р65	Р	кг/т	194,6	194,6
4	Выход годного на Р65	—	%	—	95
5	Маржинальный доход Р65	МД	руб./т	—	6955,87
6	Дополнительные капитальные вложения	К _{доп}	руб.	—	—
7	Количество брака по геометрии профиля на ОР65	Б ₁ , Б ₂	т	269,581	118,99
8	% брака на ОР65 по дефекту	—	%	1,626	0,525
9	Цена реализации ОР65	Ц _р	руб./т	—	25472,81
10	Цена м/лома	Ц _м	руб./т	—	17993,61

$$\Xi = \left(\frac{22648,122}{83,29} - \frac{22648,122}{91,04} \right) \times 0,95 \times 194,6 \times 6955,87 = 29,8 \text{ млн. руб.}$$

$$\Xi = \frac{1,626 - 0,525}{100} \times 22648,122 \times (25472,81 - 17993,61) = 1,8 \text{ млн. руб.}$$

Общий годовой экономический эффект от использования методики расчета формоизменения металла в универсальных калибрах для прокатки ассиметричных рельсовых профилей в непрерывно-реверсивной группе клетей на универсальном рельсобалочном стане разработанной в ходе выполнения диссертационного исследования Добрянского А.В. в рельсобалочном цехе филиал «ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ» составил 31,6 млн. руб./год.

Заместитель начальника
рельсобалочного цеха
по технологии филиал
«ЗСМК» ПАО «ЕВРАЗ»

С.В. Дорофеев

Главный специалист группы
рельсового производства
дирекции по экономике и финансам
Дивизиона Сибирь

Т.Е. Юхина

Приложение 3

Министерство науки и высшего образования РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по образовательной
деятельности

к.т.н., доцент



Т.А. Волкова

«17» 06 2026 г.

Справка

о внедрении результатов диссертации Добрянского Андрея Владимировича в
учебный процесс

Основные результаты диссертационной работы Добрянского Андрея Владимировича «Разработка основ проектирования калибровок валков и для прокатки асимметричных рельсовых профилей на универсальных рельсобалочных станах» используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению подготовки 22.03.02 «Металлургия» при проведении лекционных и практических занятий по дисциплинам «Технология прокатного производства», «Основы технологических процессов обработки металлов давлением».

Заведующий кафедрой
ОМДиМ ЕВРАЗ ЗСМК,
д.т.н., профессор

Е.В. Арышенский