

На правах рукописи

Сметанин Сергей Васильевич

**РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ
ПРОКАТКИ АСИММЕТРИЧНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ПРОФИЛЕЙ
НА СТАНАХ С ГРУППОЙ ТАНДЕМ**

Специальность 2.6.4 (05.16.05) – Обработка металлов давлением

Диссертация на соискание ученой степени

доктора технических наук

Научный консультант –
д-р техн. наук, профессор
Перетяцько В.Н.

Новокузнецк – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НАУЧНОЙ ПРОБЛЕМЫ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	19
1.1 Современные требования, предъявляемые к трамвайным рельсам в России и за рубежом.....	19
1.1.1 Современное состояние развития трамвайного сообщения в мире	19
1.1.2 Современные требования, предъявляемые к трамвайным рельсам в России.....	23
1.1.3 Развитие прокатного производства на станах с группой тандем...	25
1.2 Развитие технологии прокатки асимметричных рельсовых профилей	28
1.2.1 Категории рельсовых профилей. Отличительные особенности технологии прокатки асимметричных рельсов.....	28
1.2.2 Асимметричные рельсовые профили для железнодорожных путей	36
1.3 Напряженно-деформированное состояние металла при прокатке рельсовых профилей.....	40
1.4 Моделирование процесса прокатки рельсовых профилей с помощью метода конечных элементов.....	45
1.5 Выработка осевой пористости при прокатке из непрерывнолитых заготовок.....	52
1.6 Разработка эффективной технологии прокатки рельсовых профилей методами планирования экспериментов.....	56
1.7 Зависимость точности расчета силы прокатки от точности расчета контактной поверхности металла с валками при прокатке сложных асимметричных рельсовых профилей	60
1.8 Скоростные режимы и нагрузочные диаграммы при прокатке.....	70
1.9 Способы прокатки рельсовых профилей в четырехвалковых калибрах.....	75
Выводы по главе 1.....	77
Научные проблемы, цель и задачи исследования.....	80

2 РАЗРАБОТКА И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ АСИММЕТРИЧНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ПРОФИЛЕЙ НА СТАНАХ С ГРУППОЙ ТАНДЕМ ПРИМЕНЯЯ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	83
2.1 Моделирование методом конечных элементов процесса прокатки трамвайных рельсов.....	83
2.1.1 Исследование деформированного состояния металла.....	85
2.1.2 Исследование напряженного состояния металла.....	93
2.1.3 Исследование выработки осевой пористости непрерывнолитой заготовки.....	101
2.2 Планирование эксперимента процесса прокатки трамвайных рельсов. Нахождение требуемых размеров фланцев профиля при прокатке в четырехвалковых калибрах.....	112
2.3 Точность расчета силы прокатки и определение площадей контактной поверхности металла с валками	122
2.3.1 3D-метод определения площади контактных поверхностей металла с валками	123
2.3.2 Применение разработанного 3D-метода определения площади контактных поверхностей металла с валками для расчета силы прокатки при калибровке асимметричных рельсовых профилей.....	125
2.4 Разработка эффективных скоростных режимов прокатки в группе тандем.....	162
Выводы по главе 2.....	171
3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ АСИММЕТРИЧНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ПРОФИЛЕЙ НА СТАНЕ С ГРУППОЙ ТАНДЕМ ПРИМЕНЕНИЯ НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	176
3.1 Технология производства трамвайных рельсов на стане с группой тандем в рельсобалочном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК».....	176

3.2 Разработка эффективной технологии прокатки трамвайных рельсов в четырехвалковых калибрах методом планирования эксперимента.....	187
3.3 Исследование зависимости сил прокатки от смещаемых объемов металла вертикальными валками при прокатке в четырехвалковых калибрах.....	205
3.4 Нахождение требуемых размеров фланцев трамвайных рельсов при прокатке в группе тандем.....	211
3.5 Разработка технологии прокатки трамвайных рельсов с учетом выработки осевой пористости исходной непрерывнолитой заготовки.....	217
Выводы по главе 3.....	225
4 ВНЕДРЕНИЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ АСИММЕТРИЧНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ПРОФИЛЕЙ НА СТАНАХ С ГРУППОЙ ТАНДЕМ	229
4.1 Прокатка трамвайных рельсов на стане с группой тандем АО «ЕВРАЗ ЗСМК».....	229
4.1.1 Прокатка в уравновешенных четырехвалковых калибрах.....	243
4.1.2 Скоростные режимы и крутящие моменты при прокатке в группе тандем.....	260
4.2 Прокатка остряжковых и усовиковых рельсов на стане с группой тандем АО «ЕВРАЗ ЗСМК».....	277
Выводы по главе 4.....	284
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	288
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ.....	295
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	296
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	334

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Транспортная стратегия Российской Федерации и Стратегия развития транспортного машиностроения Российской Федерации на период до 2030 года определили возросшую необходимость в повышении качества наукоемкой продукции – асимметричных рельсовых профилей, получаемых с помощью горячей прокатки. Данные стратегии определили необходимость и потребность модернизации трамвайных путей. Трамвайные системы в Российской Федерации имеются в 60 городах. Для возможности модернизации трамвайных путей необходимы трамвайные рельсы высокого качества. Вопросы производства наукоемкой продукции в виде сложных асимметричных рельсовых профилей, таких как трамвайные рельсы и другие асимметричные рельсовые профили, являются актуальными, и имеют важное практическое значение.

В зарубежных странах имеется тенденция к углубленному внедрению скоростных городских трамвайных магистралей, при этом трамвайные пути охватывают не только линии городского сообщения, но и переходят в разряд межгородских. В настоящее время трамвайные линии существуют более чем в 400 городах мира, что составляет порядка 2300 трамвайных линий, а их суммарная протяженность составляет более 15600 км. Ежегодно объем перевозок трамвайными путями составляет более 13,5 млрд. пассажиров, что составляет порядка 45 млн. чел. в день, а это 3 % суммарного числа пассажиров из всех имеющихся транспортных путей сообщения.

Повышающийся спрос на скоростные трамвайные пути обусловил повышение требований к качеству самих трамвайных рельсов как в России, так и в мире. В соответствии с Европейским стандартом EN 14811:2006+A1:2009 предусматривается 20 типов различных профилей трамвайных рельсов, которые применяются в 30 странах. Трамвайные рельсы являются стратегически важной продукцией, а способность производить данную высокотехнологичную

продукцию определяет уровень технического развития государства. В соответствии с требованиями ГОСТ Р 55941 – 2014 «Рельсы трамвайные желобчатые» предусматривается 4 типа рельсов. Исходя из этого, вопросы прокатки трамвайных рельсов на станах с группой тандем актуальны не только для нашей страны, но для других государств, производящих наукоемкую продукцию в виде сложных асимметричных рельсовых профилей. В связи с этим решение вопросов, связанных с разработкой ресурсосберегающих технологий прокатки асимметричных рельсовых профилей на станах с группой тандем, является крупной научно-практической задачей, которая до настоящего времени в полном объеме не решена.

Все рельсовые профили, по геометрии поперечного сечения относительно вертикальной оси, разделяются на две категории: симметричные и асимметричные. Технология прокатки асимметричных рельсовых профилей, по сравнению с симметричными профилями, гораздо сложнее, особенно при прокатке в предчистовых и чистовых четырехвалковых калибрах станах с группой тандем. Из всех асимметричных рельсовых профилей самым сложным, с точки зрения геометрии поперечного сечения профиля, получаемого в процессе прокатки, является профиль трамвайного рельса. Однако, ввиду сложности профиля, результаты исследований по прокатке трамвайных рельсов крайне ограничены, а имеющихся данных недостаточно для разработки ресурсосберегающей технологии прокатки трамвайных рельсов на станах с группой тандем.

Диссертация выполнена в рамках стратегий и программ:

- Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 г. № 1734-р.;
- Стратегия развития транспортного машиностроения в Российской Федерации на период до 2030 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 августа 2017 г. № 1756-р;

- Государственная программа «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности», подпрограмма 10 «Металлургия», утвержденная постановлением Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. №328;

- Программа работ по постановке на производство трамвайных рельсов по ГОСТ Р 55941-2014, утвержденная в ЕВРАЗ ЗСМК от 19.03.2015 г.

Степень разработанности темы. В научной литературе имеются многочисленные результаты исследований по прокатке симметричных профилей, а также простых, с точки зрения геометрии поперечного сечения прокатываемых профилей. Однако результаты исследований по прокатке на станах, в состав которого входит непрерывно-реверсивная группа универсальных клеток (группа тандем), в четырехвалковых калибрах сложных асимметричных профилей, к которым относятся трамвайные рельсы, изучены недостаточно, а также отсутствует энерго- и ресурсосберегающая технология прокатки данных профилей.

Прокатные станы с группой тандем значительно отличаются от прокатных станов с отдельно стоящими клетями в части применения непрерывной чистовой группы, состоящей из универсальных и двухвалковых клеток. Производство асимметричных рельсовых профилей вызывает значительные трудности при прокатке, которые связаны с неравномерностью сил, действующих от обжатия металла со стороны вертикальных валков в четырехвалковых калибрах. Прокатка трамвайных рельсов в непрерывной группе универсальных клеток имеет свои особенности, поэтому требуются углубленные результаты исследований напряженно-деформированного состояния металла и энергосиловых параметров для возможности разработки ресурсосберегающей технологии прокатки сложных асимметричных рельсовых профилей на станах с группой тандем.

Изучением процесса прокатки рельсовых профилей, исследованием скоростных режимов и энергосиловых параметров прокатки занимались видные ученые: Грум-Гржимайло В.Е., Полухин П.И., Зарвин Е.Я., Инатович Ю.В., Выдрин В.Н., Бахтинов Б.П., Штернов М.М., Чекмарев А.П., Диомидов Б.Б., Литовченко Н.В.,

Целиков А.Н., Тягунов В.А., Рокотян Е.С., Бровман М.Я., Грудев А.П., Смирнов В.К., Илюкович Б.М., Шилов В.А., Перетятыко В.Н., Дорофеев В.В., Шварц Д.Л., Кадыков В.Н., Уманский А.А. и другие ученые. По технологии прокатки трамвайных рельсов на рельсобалочных станах широко известны работы Чекмарева А.П., Полухина П.И., Перетятыко В.Н., Дорофеева В.В., Кучко И.И., Серкина М.Г., Рапопорта И.Б., Критинина И.А., Кошкина В.А., Кудрявцева Н.П.

В настоящее время до конца не разработаны вопросы теории прокатки сложных асимметричных рельсовых профилей. Результаты исследований напряженно-деформированного состояния и энергосиловых параметров прокатки асимметричных профилей позволяют изыскать новые резервы повышения ресурсосбережения и качества прокатываемых рельсов. Вопросы выявления ресурсосберегающих технологий при прокатке сложных асимметричных рельсовых профилей на станах с группой тандем изучены недостаточно.

Цель работы. Развитие теоретических основ, разработка и внедрение энерго- и ресурсосберегающей технологии прокатки асимметричных рельсовых профилей на станах с группой тандем.

Задачи работы.

1. Разработать теоретические основы прокатки асимметричных рельсовых профилей на станах с группой тандем в предчистовых и чистовых четырехвалковых калибрах, уравновешенных по силам прокатки в горизонтальной плоскости.

2. Исследовать с применением моделирования методом конечных элементов и натуральных исследований напряженно-деформированное состояние металла и энергосиловые параметры прокатки, позволяющие установить зависимости, закономерности выработки осевой пористости непрерывнолитой заготовки и влияние величины обжатия на изменение размеров фланцев профиля в четырехвалковых калибрах.

3. Разработать метод определения контактной поверхности металла с прокатными валками в геометрическом очаге деформации для двух-, трех- и

четырёхвалковых калибров, применение которого позволяет с высокой точностью определить смещаемые объёмы металла и площади проекций контактной поверхности металла с валком, что повысит точность расчёта силы прокатки.

4. Разработать научно обоснованный способ и технологические решения, позволяющие реализовать энергоэффективную прокатку асимметричных рельсовых профилей в четырёхвалковых калибрах группы тандем.

5. Разработать и провести промышленное освоение эффективных скоростных режимов прокатки трамвайных рельсов в непрерывной реверсивной группе клеток с учётом действующих крутящих моментов.

6. Разработать, освоить и внедрить в условиях АО «ЕВРАЗ ЗСМК» новую энерго- и ресурсосберегающую технологию прокатки асимметричных рельсовых профилей на стане с группой тандем.

Научная новизна.

1. Разработана методика проектирования энерго- и ресурсосберегающей технологии прокатки трамвайных и других рельсов на специализированном стане с непрерывной группой клеток – тандем, состоящая: в совершенствовании скоростных условий прокатки в непрерывной группе; определении обжатий (вытяжек), исключая осевую пористость в черновых клетях и обеспечивающих требуемые размеры фланцев профиля в чистовой группе тандем; проектировании четырёхвалковых калибров без осевых нагрузок горизонтальных валков, позволяющих снизить неравномерность напряженно-деформированного состояния металла на основе применения новых методов расчёта, режимов и принципов прокатки рельсов.

2. Изучен процесс уширения и утяжки фланцев профиля при прокатке в четырёхвалковых калибрах. Установлено, что у подошвы и головки профиля на контактной поверхности с вертикальными валками склонность к утяжке составляет 0,9 – 0,96. В центральной точке торцевой поверхности высоты подошвы и по головке на поверхности ее контакта с горизонтальным валком склонность к приращению составляет 1,01 – 1,11. Разработаны уравнения регрессии для нахождения изменения ширины подошвы и головки профиля в

зависимости от диаметра горизонтальных и вертикальных валков, величины обжатия и температуры прокатки. Установлено, что наибольшее влияние на изменение ширины подошвы оказывает величина обжатия горизонтальными валками внутренней части подошвы и обжатие шейки профиля. Вторым по величине значимости влияние на изменение размера ширины оказывает обжатие вертикального валка по подошве, а в меньшей степени влияет температура прокатки в диапазоне 900 – 1000 °С и глубина внедрения вертикального валка со стороны головки профиля. Показано, что изменение ширины головки профиля не зависит от диаметра вертикальных валков. В большей степени зависит от обжатия вертикального валка со стороны головки и во вторую очередь от обжатия горизонтальными валками внутренней части головки. В меньшей степени на изменение ширины головки профиля оказывает обжатие вертикального валка со стороны подошвы и температура прокатки в указанном заданном диапазоне.

Применение разработанных уравнений регрессии позволило рассчитать режимы деформации при прокатке в четырехвалковых калибрах, обеспечивающих получение профиля с требуемой геометрией.

3. Для повышения точности расчета силы прокатки сложных профилей разработан 3D-метод нахождения проекции контактной поверхности металла с валками в геометрическом очаге деформации. Предложенный метод реализуется с помощью программ трехмерного твердотельного моделирования (построение 3D-сборки), в результате чего на поверхностях пересечения 3D-моделей металла и валков обеспечивается построение контактных поверхностей. Данный метод также позволяет определить форму и рассчитать смещаемые объемы металла по элементам профиля. Разработанный 3D-метод позволил точнее, по сравнению с известными методами, рассчитать проекцию контактной поверхности металла с валками, что позволило на 25 – 30% повысить точность расчета силы прокатки.

4. Для обеспечения эффективного распределения сил в четырехвалковых калибрах разработан новый принцип прокатки. Критерий разработанного положения заключается в том, что силы прокатки, действующие со стороны неприводных вертикальных валков (со стороны головки и подошвы профиля)

должны быть равны между собой (в промышленных технологиях допускается их отношение в интервале 0,85 – 1,19). Предложенный принцип обеспечивается путем подбора величины обжатия со стороны вертикальных валков, при котором отношение смещаемых объемов металла находится в диапазоне 3,22 – 4,44. Разработанный принцип позволил уравновесить силы прокатки в горизонтальной плоскости четырехвалковых калибров.

5. Изучено напряженно-деформированное состояние металла при прокатке в четырехвалковых калибрах. Установлено, что применение предложенного принципа равенства усилий, действующих от обжатия со стороны вертикальных валков в четырехвалковых калибрах, обеспечило уменьшение неравномерности напряженно-деформированного состояния металла в 1,5 – 2 раза и повышение величины гидростатического давления в 1,2 – 1,7 раза по сравнению с существующими технологиями. Полученное напряженно-деформированное состояние позволило повысить качество прокатываемого металла на 23,7%.

6. Для обеспечения захвата металла без пробуксовок разработан новый эффективный скоростной режим прокатки в непрерывной группе клеток (группа тандем), суть которого состоит в том, что захват металла во всех клетях группы тандем осуществляется при постоянной угловой скорости вращения горизонтальных приводных валков, далее (после захвата металла во всех клетях) раскат разгоняется до максимальной скорости прокатки. При первом и втором проходах частота вращения горизонтальных валков при захвате металла составляет 0,42 – 0,51, а в третьем 0,6 – 0,7 от максимальной скорости прокатки. Новый режим позволил исключить динамический момент стана при захвате полосы и снизил количество брака.

7. Изучено условие исключения осевой пористости исходной непрерывнолитой заготовки при прокатке рельсов. Разработанная технология обеспечивается за счет режимов деформации в черновой группе клеток: в первой клетки семь проходов в ящичных калибрах, при суммарных коэффициентах вытяжки 1,06 – 2,2; во второй клетки пять проходов – один разрезной калибр (суммарный коэффициент вытяжки 2,54) и четыре рельсовых калибра (суммарные

коэффициенты вытяжки 3,24 – 6,02). Разработанные режимы деформации позволили исключить осевую пористость намного раньше, в сравнении с известными, при суммарном коэффициенте вытяжки в десятом проходе около 4. В дальнейших пропусках ее раскрытие не происходит, а в чистовом калибре осевая пористость отсутствует.

Теоретическая и практическая значимость работы. Проведенные обширные научные исследования и промышленные эксперименты позволили развить следующие теоретические и практические основы прокатки асимметричных рельсовых профилей:

1. На основании теоретического анализа с применением моделирования методом конечных элементов в двухвалковых и четырехвалковых калибрах получены результаты исследований по распределению значений интенсивности деформаций и интенсивности напряжений в поперечном сечении металла при прокатке трамвайных рельсов, необходимые для реализации промышленной технологии прокатки.

2. На основании теоретического анализа с применением методики планирования многофакторного эксперимента разработаны математические зависимости для нахождения регламентированных размеров фланцев профиля, необходимые для расчета режимов деформации металла в четырехвалковых калибрах при прокатке трамвайных рельсов.

3. Разработан 3D-метод, позволяющий с высокой точностью, по сравнению с известными, определить форму и рассчитать проекцию контактных поверхностей металла с валками в геометрическом очаге деформации для сложных прокатываемых профилей. 3D-метод основан на применении совокупности приемов трехмерного твердотельного моделирования. Применение предложенного метода позволяет повысить точность расчета силы прокатки, используемой в расчетных проверках оборудования главной линии прокатного стана на прочность, а также осуществлять анализ захвата металла валками и оценивать смещаемые объемы металла в очаге деформации при установившемся процессе прокатки, что необходимо для разработки технологии прокатки.

4. Разработан и внедрен в промышленное производство ресурсосберегающий способ прокатки асимметричных рельсовых профилей, основанный на анализе смещаемых объемов металла в очаге деформации, изменении размеров фланцев профиля и равенстве горизонтальных сил прокатки, действующих от обжатия вертикальными валками в четырехвалковом калибре, обеспечивающий повышение эффективности процесса прокатки (патент №2595082).

5. Разработаны и внедрены в промышленное производство эффективные скоростные режимы прокатки, основанные на эффективном использовании технических характеристик главных приводов чистовой непрерывной группы клетей, с учетом возникающих крутящих моментов, что обеспечивает повышение производительности прокатного стана с группой тандем.

6. На основании теоретических и практических исследований, изложенных в диссертации, разработана и внедрена в промышленное производство единственная в России и странах СНГ ресурсосберегающая технология производства трамвайных рельсов на стане с группой тандем в условиях АО «ЕВРАЗ ЗСМК», обеспечивающая: выработку осевой пористости непрерывнолитой заготовки в черновых калибрах, а в готовых рельсах исключить недопустимый дефект в виде осевой несплошности; уменьшение на 20 – 25 % значения крутящего момента при захвате металла валками; отсутствие динамических ударов при захвате полосы и повышение надежности оборудования главной линии прокатного стана; увеличение производительности прокатного стана на 10 %; повышение стойкости прокатных валков на 17 % и увеличение межремонтного цикла оборудования прокатных клетей на 23 %; уменьшение потребления электроэнергии на 45 кВт·ч/т; повышение стабильности профиля и его качество. Экономический эффект от внедрения предложенных мероприятий составил 82 млн.руб./год.

7. На основании разработанных методов расчета и способов прокатки, опробованных на сложном профиле на трамвайных рельсах, разработана и внедрена на стане с группой тандем в условиях АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

ресурсосберегающая технология прокатки асимметричных рельсовых профилей таких как остряковые и усовиковые рельсы.

8. Результаты исследований, приведенные в диссертации, могут быть эффективно реализованы для разработки новых ресурсосберегающих технологий производства рельсовых профилей, прокатываемых на станах с группой тандем.

Методология и методы исследования. Изучение, разработка и теоретическое обоснование прокатки асимметричных рельсовых профилей в диссертации проводилось с использованием моделирования методом конечных элементов через компьютерную реализацию расчетов и натурного моделирования, являющегося подвидом масштабного физического моделирования.

В работе использовано компьютерное моделирование для исследования пластической деформации металла при прокатке сложных асимметричных рельсовых профилей с применением специализированной программы конечно-элементного моделирования Deform-3D.

Натурные исследования выполнены на действующем промышленном прокатном стане с группой тандем АО «ЕВРАЗ ЗСМК», который оснащен контрольно-измерительной системой, позволяющей в реальном времени фиксировать частоту вращения вала главного двигателя, силы и моменты прокатки.

В работе применялась методика планирования многофакторного эксперимента, которая позволила, при проведении моделирования методом конечных элементов и натурных исследований, разработать ресурсосберегающую технологию прокатки.

Обработка результатов моделирования методом конечных элементов и натурных исследований выполнена с помощью методов статистической обработки данных, с применением множественного регрессионного анализа.

Положения, выносимые на защиту.

1. Результаты моделирования методом конечных элементов и натурных исследований, описывающие напряженно-деформированное состояние металла и

выработку осевой пористости при прокатке трамвайных рельсов в двухвалковых и четырехвалковых калибрах.

2. Математические зависимости для расчета регламентированных размеров фланцев профиля трамвайного рельса при прокатке в четырехвалковых калибрах.

3. Метод и результаты определения проекции контактных площадей металла с валками в геометрическом очаге деформации при прокатке асимметричных рельсовых профилей в черновых двухвалковых, предчистовых и чистовых четырехвалковых калибрах.

4. Результаты моделирования методом конечных элементов и натурных исследований по нахождению эффективного соотношения смещаемых объемов металла в очаге деформации четырехвалковых калибров, позволяющего уравновесить силы прокатки, действующие от обжатия вертикальными валками в горизонтальной плоскости.

5. Результаты натурных исследований по разработанным эффективным скоростным режимам и возникающим крутящим моментам при прокатке трамвайных рельсов в непрерывной реверсивной группе клетей.

6. Ресурсосберегающая технология прокатки асимметричных рельсовых профилей на стане с группой тандем.

Степень достоверности полученных результатов подтверждена использованием современных методов моделирования и планирования экспериментов, прошедших широкую апробацию в обработке металлов давлением, а также сопоставлением теоретических данных с данными промышленных экспериментов, которые с высокой воспроизводимостью согласуются между собой. Промышленные эксперименты проводились на действующем промышленном прокатном стане с группой тандем АО «ЕВРАЗ ЗСМК», который оснащен контрольно-измерительной системой, позволяющей в реальном времени фиксировать силы и моменты прокатки. Основные выводы диссертации достоверны, так как они базируются на основных положениях механики сплошных сред и теории обработки металлов давлением. Расчетные значения имеют высокую сходимость с экспериментальными исследованиями,

которые прошли широкую апробацию и внедрены в технологический процесс прокатки трамвайных, остряковых и усовиковых рельсов в рельсобалочном цехе на стане с группой тандем АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

Апробация результатов. Основные результаты и положения диссертации прошли апробацию, докладывались и обсуждались на следующих конференциях и комиссиях: 45-й научно-технич. конф. молодых специалистов ОАО «НКМК» – Новокузнецк, 2006.; V-й совместной междунар. науч.-техн. конф. молодых специалистов на базе СибГИУ – Новокузнецк, 2006.; 6-ой междунар. научно-технич. конф. молодых специалистов на базе ОАО «ММК имени Ильича» – Украина, г. Мариуполь, 2006 г.; 17-ой науч.-практ. конф. по проблемам механики и машиностроения – Новокузнецк, 2007.; 46-й научно-техн. конф. молодых специалистов ОАО «НКМК» – Новокузнецк, 2007.; VI-й Междунар. совместной научно-технич. конф. молодых специалистов на базе ОАО «ЗСМК» – Новокузнецк, 2007.; 7-ой Междунар. научно-технич. конф. молодых спец. ОАО «ММК» – Магнитогорск, 2007.; 130-ом заседании рельсовой комиссии «Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений» – Новокузнецк, 2014.; XXII Междунар. научно-практич. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты» – Новосибирск, 2015.; XX Междунар. научно-практич. конф. «Новое слово в науке и практике: гипотезы и апробация результатов исследований» – Новосибирск, 2015.; Междунар. научно-практич. конф. «Проблемы внедрения результатов инновационных разработок» – Пермь, 2015.; XVI Междунар. научно-практич. конф. «Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штамповочного производств» – Барнаул, 2015.; Междунар. научно-практич. конф. «Прорывные научные исследования как двигатель науки» – Самара, 2015.; Междунар. научно-практич. конф. «Традиционная и инновационная наука: история, современное состояние, перспективы» – Пермь, 2015.; Междунар. научно-практич. конф. «Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом» – Самара, 2015.; Междунар. научно-практич. конф. «Роль инновации в трансформации современной науки» – Тюмень, 2016.; Междунар. научно-практич. конф. «Наука третьего тысячелетия»

– Курган, 2016.; Междунар. научно-практич. конф. «Современные технологии в мировом научном пространстве» – Томск, 2016.; IV Всеросс. научно-практич. конф. с междунар. участием «Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах» – Новокузнецк, 2016.; 131-ом заседании рельсовой комиссии «Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений» – Челябинск, 2015.; Междунар. научно-практич. конф. «Интеллектуальный и научный потенциал XXI века» – Казань, 2016.; Междунар. научно-практич. конф. «В мире науки и инноваций» – Пермь, 2016.; Междунар. научно-практич. конф. «Инновации, технологии, наука» – Пермь, 2017.; Междунар. научно-практич. конф. «Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом» – Челябинск, 2017.; Междунар. научно-практич. конф. «Концепции фундаментальных и прикладных научных исследований» – Казань, 2017.; Междунар. научно-практич. конф. «Теория и практика высоких технологий в промышленности» – Уфа, 2017.; Междунар. научно-практич. конф. «Новые задачи технических наук и пути их решения», Уфа, 2017.; Междунар. научно-практич. конф. «Технологии XXI века. Проблемы и перспективы развития» – Пенза, 2017.; Междунар. научно-практич. конф. «Фундаментальные проблемы науки» – Казань, 2017.; 132-ом заседании рельсовой комиссии «Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений» – Иркутск, 2016.; The 20th International Scientific and Research Conference «Metallurgy: Technologies, Innovation, Quality. Metallurgy-2017» – Novokuznetsk, Russia, 2017.; 133-е заседание рельсовой комиссии «Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений» – Казахстан, г. Актобе, 2017.

Личный вклад автора состоит в постановке задач исследования, выборе методов исследований, в проведении моделирования методом конечных элементов, в организации, руководстве и непосредственном участии в натурных исследованиях с последующей обработкой полученных результатов, проведении анализа и определении математических зависимостей с научным обоснованием найденных закономерностей, а также разработке новых методов, способов,

математических моделей, новых положений, изложенных в диссертации. В разработке новой промышленной технологии прокатки асимметричных (трамвайных, остряковых и усовиковых) рельсов на прокатном стане с группой тандем, а также внедрении результатов диссертационного исследования в производственный процесс.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертация по своей тематике, целям, задачам, научной новизне, теоретической и практической значимости, методологии и методам исследования, положениям, выносимым на защиту, соответствует паспорту специальности 2.6.4 (05.16.05) – Обработка металлов давлением по следующим пунктам:

п.1 «Исследование и расчет деформационных, скоростных, силовых, температурных и других параметров разнообразных процессов обработки металлов, сплавов и композитов давлением»;

п.2 «Исследование процессов пластической деформации металлов, сплавов и композитов с помощью методов физического и математического моделирования»;

п.6 «Разработка способов, процессов и технологий для производства металлопродукции, обеспечивающих экологическую безопасность, экономию материальных и энергетических ресурсов, повышающих качество и расширяющих сортамент изделий».

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 84 печатных научных статьях, в том числе 42 статьях в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень рекомендованных Высшей аттестационной комиссией РФ для опубликования результатов докторских и кандидатских диссертаций, в 2 монографиях, 3 патентах на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка сокращений и специальных терминов, списка литературы из 351 наименований и приложения. Общий объем работы составляет 333 страницы машинописного текста, которые содержат 113 рисунков и 34 таблицы.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НАУЧНОЙ ПРОБЛЕМЫ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Современные требования, предъявляемые к трамвайным рельсам в России и за рубежом

1.1.1 Современное состояние развития трамвайного сообщения в мире

Одним из приоритетных направлений развития в соответствии с транспортной стратегией и стратегией развития транспортного машиностроения в России является трамвайное сообщение [1 – 3].

В современной мировой литературе и практике зарубежных стран для обозначения городских трамвайных путей применяется термин – линии LRT (Light Rail Transit), что в переводе означает «городской рельсовый транспорт облегченного типа». Линии LRT применяются для городского железнодорожного общественного транспорта с высокой частотой движения вагонов. Линии LRT предназначены для движения по ним трамваев, которые за рубежом подразделяются на обыкновенный и скоростной трамвай. Основные отличия линий LRT от метрополитена и городских железных дорог (S-Bahn) – это меньшая допустимая нагрузка на ось и допустимость одноуровневых пересечений с автомобильными дорогами при условии приоритета транспорта LRT, который обеспечивается автоматизированной системой регулирования дорожного движения (VAL), при этом в местах пересечения линий LRT с напряженными транспортными потоками могут сооружаться эстакады и тоннели [4].

Как показывает мировая практика, экономическая эффективность линий LRT, по сравнению с метрополитеном, достигается за счет меньшей изоляции сети и меньших значений нагрузки на ось, что, в свою очередь, ведет к значительному упрощению строения пути и, соответственно, стоимости затрат, необходимых для строительства линий LRT, которые меньше в 5 – 10 раз по сравнению со

строительством метрополитена, при этом минимальный пассажиропоток должен составлять 1500 пассажиров в час [4].

В зарубежных странах для обеспечения городских линий LRT применяют трамвайные рельсы, которые изготавливаются в соответствии с Европейским стандартом EN 14811:2006+A1:2009 «Железные дороги. Верхнее строение пути. Специальные рельсы. Желобчатые рельсы и сопутствующие конструкционные профили». В соответствии с Европейским стандартом предусматривается 20 различных профилей трамвайных рельсов.

В настоящее время в России отсутствует, как таковое, понятие линий LRT. Однако к легкорельсовому транспорту по принципу скоростного трамвая, реализованному в нашей стране, можно отнести трамвайные пути Москвы [5], Санкт-Петербурга, Волгограда, Старого Оскола и других городов, выполненных по СНиП 2.05.09-90 «Трамвайные и троллейбусные линии» [6]. В нашей стране для обеспечения современных городских железнодорожных путей применяются трамвайные рельсы, которые требуется изготавливать в соответствии с требованиями ГОСТ Р 55941-2014 «Рельсы трамвайные желобчатые» [7].

В современной мировой практике трамвайные линии LRT нашли широкое применение. Так в настоящее время трамвайные линии существуют в 388 городах мира. Больше всего трамвайных путей LRT в Европе и странах Балтии – 206 городов, в России и странах СНГ – 93 города, в Азии – 41 город и в Северной Америке – 36 городов. При этом, суммарно, в России и Германии 123 сети LRT – это порядка 31% от мировой численности трамвайных линий. Всего в мире насчитывается порядка 2300 линий LRT, а их суммарная протяженность составляет более 15600 км [4].

По данным источника [4], ежегодно трамвайными путями пользуются примерно 13,6 млрд. пассажиров, что составляет порядка 45 млн. чел. в день. Быстрыми темпами развивается этот вид транспорта в странах Азиатско-Тихоокеанского региона, Ближнего Востока и Северной Африки. В Южной Америке новые трамвайные линии появляются в дополнение к действующим линиям метрополитена и скоростным автобусным маршрутам на выделенных

полосах. Начинается развитие трамвайных линий LRT в Центральной и Южной Африке, так, в 2015 г. в столице Эфиопии Аддис-Абебе введены в эксплуатацию две современные трамвайные линии LRT. Рост количества трамвайных путей LRT в мире продолжается [4].

Как отмечается в мировой литературе, некоторые линии LRT по показателям скорости и провозной способности близки к метро. Также в мировой практике трамвайных путей встречаются так называемые трамвай-поезда. Основное отличие трамвая-поезда от обычного трамвая состоит в том, что он проезжает большие расстояния, при этом часть его маршрута проходит по городским трамвайным путям, а затем переходит на пути магистральных железнодорожных линий [4].

В мировой практике трамвайные линии при отсутствии сетей метрополитена являются основной системой общественного транспорта города, которые используются для доставки пассажиров к станциям рельсового транспорта большей провозимости (метро или пригородные железные дороги). Также трамвайные линии применяют для обеспечения транспортного сообщения между периферийными и центральными частями городов и районов [4].

После 2000 года новые трамвайные пути появились в 120 городах мира. В настоящее время во всем мире проводится строительство 850 км трамвайных путей, при этом, дополнительно к существующим, планируется построить еще 2350 км. Наиболее эффективно процесс восстановления трамвайных путей проходит в США, там введены в эксплуатацию 23 трамвайные сети, во Франции 22, в Испании 16 и Турции 8 трамвайных сетей. При этом одновременно со строительством трамвайных путей в вышеперечисленных странах отмечалась ликвидация трамвайных путей: в Румынии 4 сети, в Египте 1 сеть, на территории СНГ 8 трамвайных сетей ликвидированы. При этом в России после 2000 г. полностью прекращена работа трамвая в 4 городах [4].

По мировым данным, объем перевозок при помощи трамвая в настоящее время составляет более 13,5 млрд. чел. в год, что составляет 3% суммарного числа

пассажиры из всех имеющихся транспортных путей сообщения. При этом максимальное количество пассажиров перевозится по городским трамвайным путям Будапешта – это 396 млн. пассажиров в год, трамвайным путям Вены – около 317 млн. пассажиров в год, Бухареста – порядка 322 млн. чел. в год, Праги – 317 млн.чел. в год, Санкт-Петербурга – 312 млн. чел. в год, Варшавы – 264 млн. чел. в год и Москвы 252 млн. чел. в год [4].

При этом в мировой практике наблюдается тенденция, что в городах одновременно со строительством новых трамвайных путей происходит расширение существующих трамвайных путей. При этом суммарное количество трамвайных остановок составляет 32245 шт., а среднее расстояние между остановками составляет порядка 484 м. Трамвайные пути, которые имеют максимальную протяженность, находятся в Мельбурне, их длина составляет 245 км, в Санкт-Петербурге трамвайные пути имеют длину 240 км, в Кельне 193 км, Берлине 192 км, Катовице 183 км и Москве 181 км [4].

По объему перевозки пассажиров и протяженности трамвайных путей наиболее интенсивно эксплуатируемыми в мире являются трамвайные сети Гонконга, Стамбула, Токио, Сараево и Загреба. Суммарное количество трамваев в мире превышает 36 тыс. ед. Наибольшая численность подвижного состава находится в Праге, Москве, Санкт-Петербурге, Будапеште и Варшаве [4].

Исходя из имеющихся данных мировой индустрии трамвайного сообщения, при среднем сроке службы вагонов 35 лет, каждый год необходимо строить более 1000 шт. трамвайных вагонов для замены изношенного парка, при этом требуется замена и самих трамвайных путей [4].

В настоящее время за рубежом процессу производства трамвайных рельсов придается большое значение, в связи с этим был разработан и утвержден в ноябре 2009 г. Европейский стандарт EN 14811:2006+A1:2009 «Железные дороги. Верхнее строение пути. Специальные рельсы. Желобчатые рельсы и сопутствующие конструкционные профили». Данный Европейский стандарт

действует в трех официальных изданиях (английском, французском и немецком) и применяется в 30 странах мира.

Европейский стандарт EN 14811:2006+A1 различает 20 типов трамвайных рельсов: 46G1; 51R1; 52R1; 53R1; 55G1; 55G2; 56R1; 57R1; 59R1; 59R2; 60R1; 60R2; 60R3; 62R1; 62R2; 63R1; 67R1; 68G1; 61C1; 75C1. Данный стандарт допускает, что трамвайные рельсы могут применяться также для портовых и промышленных путей [8].

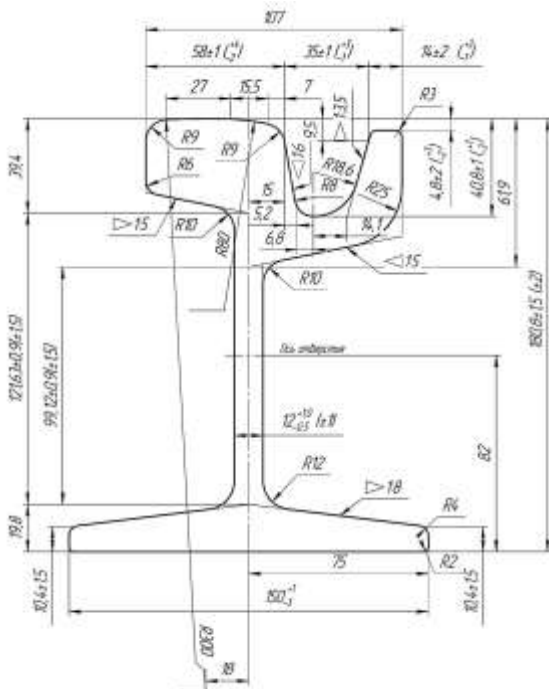
1.1.2 Современные требования, предъявляемые к трамвайным рельсам в России

Трамвайное сообщение в нашей стране начинает активно развиваться в направлении высокоскоростных трамваев. В настоящее время в городах России на различных стадиях подготовки и осуществления находятся проекты строительства скоростного трамвая, для реализации которых требуются трамвайные рельсы высокого качества. В соответствии с требованием СП 98.13330.2012 «Трамвайные и троллейбусные линии» на совмещенном полотне (с дорожным покрытием), а также для скоростных линий трамвая необходимо применять трамвайные рельсы в соответствии с требованиями ГОСТ Р 55941 – 2014 «Рельсы трамвайные желобчатые» (4 типа рельсов). В таких городах России, как Москва, Санкт-Петербург и Волгоград, трамвайные линии имеют значительную протяженность.

В настоящее время в России на различных стадиях подготовки и осуществления находятся проекты строительства скоростного трамвая в таких городах как Москва [5], Санкт-Петербург, Новосибирск, Екатеринбург, Воронеж, Тула, Саратов, Уфа, Казань, Новокузнецк. В соответствии со СНиП [6] должны применяться трамвайные рельсы по ГОСТ [7].

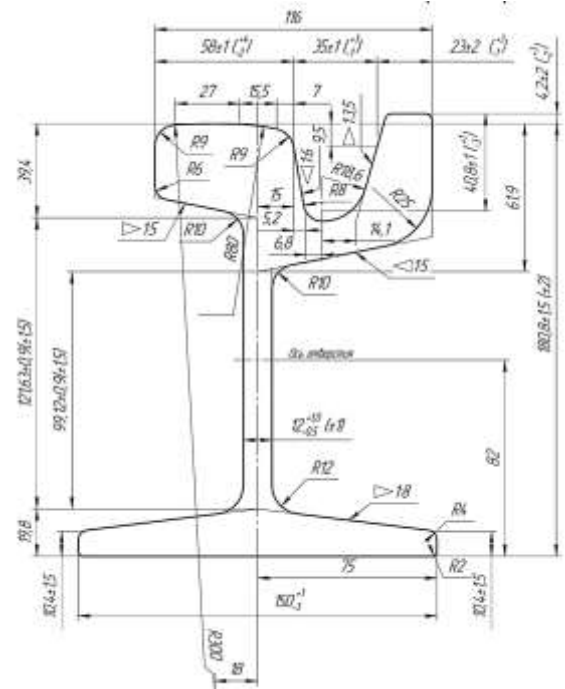
Исходя из имеющихся тенденций в России и в мире, можно сделать вывод о том, что трамвайные пути во всем мире составляют значительную протяженность, поэтому в России и в мире к трамвайным рельсам предъявляются все более

жесткие требования, которые для зарубежных стран определены Европейским стандартом [8]. В России требования к трамвайным рельсам не уступают зарубежным, которые определены в новом ГОСТ Р 55941-2014 «Рельсы трамвайные желобчатые» [7].



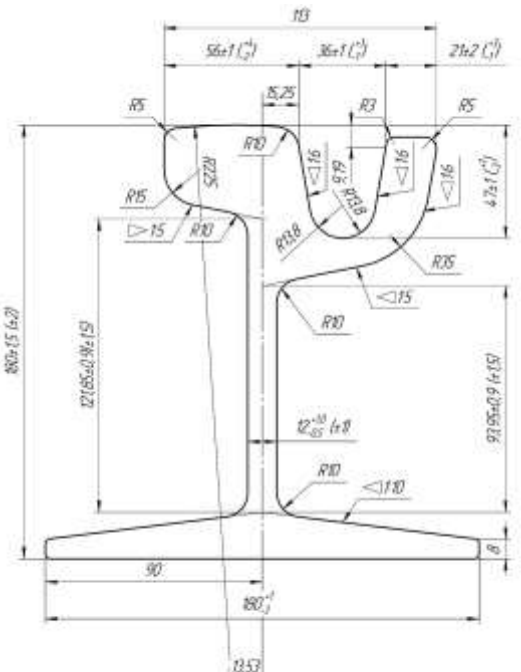
в скобках (...) указаны предельные отклонения размеров для класса точности Y

а



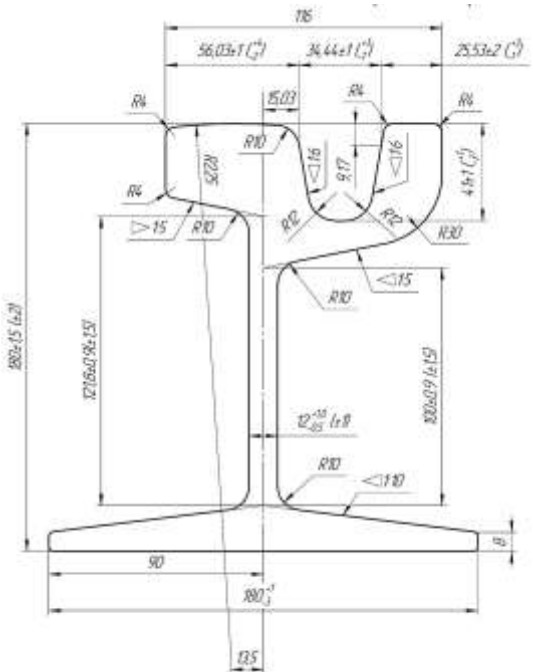
в скобках (...) указаны предельные отклонения размеров для класса точности Y

б



в скобках (...) указаны предельные отклонения размеров для класса точности Y

в



в скобках (...) указаны предельные отклонения размеров для класса точности Y

г

Рисунок 1.1 – Трамвайные желобчатые рельсы по ГОСТ Р 55941-2014:

а – РТ58; б – РТ62; в – РТ60Е; г – РТ62Е

ГОСТ Р 55941-2014 «Рельсы трамвайные желобчатые» определяет классификацию трамвайных рельсов по типам, точности изготовления, прямолинейности, видам термического упрочнения, наличия болтовых отверстий. Произошло ужесточение требований по предельным отклонениям размеров профиля, прямолинейности трамвайных рельсов, содержанию вредных примесей в стали, нормам твердости для нетермоупрочненных и термоупрочненных трамвайных рельсов.

ГОСТ Р 55941-2014 [7] предусматривает 4 различных профиля трамвайных рельсов – это РТ58 и РТ60Е (для прямых участков пути), РТ62 и РТ62Е (для кривых участков пути, мостов и путепроводов). При этом профили трамвайных рельсов по ГОСТ отличаются, в том числе, и по ширине подошвы, которая составляет 150 мм для трамвайных рельсов РТ58 (рисунок 1.1, а) и РТ62 (рисунок 1.1, б), и 180 мм для трамвайных рельсов РТ60Е (рисунок 1.1, в) и РТ62Е (рисунок 1.1, г). ГОСТ Р 55941-2014 позволяет изготавливать трамвайные рельсы и других типов, в том числе, по Европейскому стандарту EN 14811:2006+A1:2009 [8]. Сравнение основных геометрических размеров трамвайных желобчатых рельсов по ТУ 14-2Р-320-96, EN 14811:2006+A1:2009 и ГОСТ Р 55941-2014 приведено в работе [9].

1.1.3 Развитие прокатного производства на станах с группой тандем

Черная металлургия является одной из основных отраслей промышленности не только в России, но и во всем мире, а процесс прокатки в горячем состоянии является одним из самых производительных способов обработки металлов давлением, позволяющих получать длинномерную продукцию с различной конфигурацией поперечного сечения прокатываемого профиля.

Вопросы повышения эффективности производства в черной металлургии, улучшения качества выпускаемой продукции и разработки ресурсосберегающих технологий имеют важное практическое значение.

Рельсопрокатные станы с группой тандем значительно отличаются от прокатных станов с отдельно стоящими клетями трио и чистовой клетью дуо в части применения непрерывной чистовой группы тандем, состоящей из универсальных и двухвалковых клетей, повышенными динамическими характеристиками и высокой степенью автоматизации и механизации производственного процесса прокатки. Прокатка трамвайных рельсов в непрерывной группе универсальных клетей имеет свои особенности, поэтому требуются углубленные результаты исследований напряженно-деформированного состояния металла и энергосиловых параметров для возможности разработки ресурсосберегающей технологии прокатки сложных асимметричных рельсовых профилей на станах с группой тандем.

За последние 10 лет в мире прошла обширная модернизация рельсобалочных прокатных станов [10 – 20 и др.]. Это обусловлено тем, что в связи с развитием прокатного производства и освоением технологии прокатки на станах с использованием универсальных клетей, стали предъявляться все более жесткие требования к рельсовым профилям, в том числе и к трамвайным рельсам. Впервые процесс прокатки рельсов с использованием непрерывно-реверсивной группы клетей на конечной стадии прокатки реализован в Южной Корее, на заводе Pohang по проекту немецкой фирмы SMS Meer. Значительная часть современных рельсобалочных прокатных станов с группой тандем построена в КНР, Индии, Турции, США, Южной Корее, Австралии, Японии, Франции, Казахстане, в Индии, а также в России – это АО «ЕВРАЗ ЗСМК» и ОАО «ЧМК».

Прокатные станы с группой тандем конструктивно выполнены таким образом, что валки и привалковая арматура смонтированы в виде кассет, которые позволяют с минимальными потерями времени осуществлять перевалку с профиля на профиль. Прокатные станы с группой тандем, для придания жесткости клетям, оснащены системой гидравлических нажимных устройств, которые работают под высоким давлением более 200 bar. В связи с тем, что прокатка в непрерывной группе клетей стана тандем должна обеспечивать точность геометрии профиля с учетом заданных деформаций, натяжения и

подпора, для управления прокатным станом применяется автоматизированная система управления, которая позволяет работать прокатному стану с группой тандем в автоматическом режиме по предварительно разработанной программе калибровки.

В связи с развитием технологии прокатного производства на АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК») в 2012 г. началось строительство, а в 2013 г. построен и запущен в работу новый рельсобалочный прокатный стан с группой тандем, который в своем составе имеет чистовую непрерывно-реверсивную группу, состоящую из двух универсальных клетей, между которыми установлена двухвалковая клеть (группа тандем), при этом прокатный стан оснащен управляющей и контрольно-измерительной системой автоматизации. В результате проведенной реконструкции рельсового производства на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» появилась возможность прокатывать сложные асимметричные рельсовые профили в соответствии с требованиями ГОСТ, в том числе, трамвайные рельсы различных типов по Европейскому стандарту EN 14811:2006+A1:2009.

Повышающийся спрос на скоростные трамвайные пути обусловил повышение требований к качеству самих трамвайных рельсов как в России, так и в мире. Разработка ресурсосберегающей технологии прокатки трамвайных рельсов невозможна без исследований напряженно-деформированного состояния металла и энергосиловых параметров прокатки. Однако, ввиду сложности профиля, результаты исследований по прокатке трамвайных рельсов крайне ограничены, некоторые вопросы никогда не изучались, а имеющихся данных недостаточно для разработки ресурсосберегающей технологии прокатки трамвайных рельсов на станах с группой тандем.

В связи с реконструкцией рельсового производства на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» и запуском в 2013 году первого в России прокатного стана с группой тандем, технология прокатки сложных асимметричных рельсовых профилей, в первую очередь, трамвайных рельсов, потребовала углубленного изучения. При этом исследования процесса прокатки трамвайных рельсов на станах с группой тандем,

до данной диссертации, полностью отсутствовали не только в России, но и в странах СНГ.

1.2 Развитие технологии прокатки асимметричных рельсовых профилей

1.2.1 Категории рельсовых профилей.

Отличительные особенности технологии прокатки асимметричных рельсов

Вопросам разработки ресурсосберегающих технологий прокатки рельсовых профилей всегда уделялось большое внимание. Значительная часть всех научно-исследовательских работ и имеющихся промышленных результатов, описанных в научной литературе, посвящена симметричным рельсовым профилям – железнодорожным рельсам широкой колеи. Технология прокатки асимметричных рельсовых профилей гораздо сложнее, в сравнении с симметричными профилями, особенно при прокатке в предчистовых и чистовых четырехвалковых калибрах станах с группой тандем. При этом вопросы напряженно-деформированного состояния металла и энергосиловых параметров прокатки асимметричных рельсовых профилей изучены недостаточно.

Изучением процесса прокатки рельсовых профилей занимались видные ученые: Грум-Гржимайло В.Е., Мец Н., Тринкс В., Полухин П.И., Грдина Ю.В., Зарвин Е.Я., Инатович Ю.В., Выдрин В.Н., Бахтинов Б.П., Штернов М.М., Поляков В.В., Великанов А.В., Бейнон Росс Е., Френкель В.Я., Шилов В.А., Перетяцько В.Н., Дорофеев В.В., Диомидов Б.Б., Беньковский М.А., Литовченко Н.В. По исследованию скоростных режимов и энергосиловых параметров прокатки широко известны работы Зибеля Э, Целикова А.Н., Чекмарева А.П., Тягунова В.А., Томленова А.Д., Никитина Г.С., Рокотяна Е.С., Степанского Л.Г., Клименко В.М., Бровмана М.Я., Грудева А.П., Дрозда В.Г., Коновалова Л.В., Хензель А, Валквиста Г., Никитина А.Г. Процессу прокатки рельсовых профилей на рельсобалочных прокатных станах посвящены работы ученых: Смирнова В.К., Шилова В.А., Илюковича Б.М., Дорофеева В.В.,

Юрьева А.Б., Громова В.Е., Козырева Н.А., Фастыковского А.Р., Шварца Д.Л., Рождественского Ю.В., Свейковского У., Кадыкова В.Н., Уманского А.А., Непряхина С.О., Головатенко А.В., Литвинова Р.А., Скосарь Е.О., Бондина А.Р., Михайленко А.М., Рудюк А.С., Азаркевича А.А. По технологии прокатки трамвайных рельсов на рельсобалочных станах широко известны работы Чекмарева А.П., Полухина П.И., Грдины Ю.В., Перетяцько В.Н., Зарвина Е.Я., Дорофеева В.В., Кучко И.И., Серкина М.Г., Рапопорта И.Б., Критинина И.А., Кошкина В.А., Дарушина Р.И., Пшеничникова П.И., Кудрявцева Н.П., Шарапова Е.Л., Сапрыкина Х.М., Нестерова Д.К., Могилевского И.И.

В России выпуск трамвайных рельсов в промышленных объемах освоил только АО «ЕВРАЗ ЗСМК» в 1945 г. [21].

Геометрическая сложность профиля трамвайных рельсов обусловлена их асимметрией поперечного сечения не только в горизонтальной, как, например, железнодорожные рельсы, но и в вертикальной плоскости. Имеющаяся асимметрия данных рельсовых профилей вызывает значительные сложности в получении требуемой геометрии профиля при прокатке [61].

Все прокатываемые рельсовые профили по геометрии поперечного сечения и ее симметрии, относительно своей вертикальной оси, можно разделить на две категории – это симметричные и асимметричные (рисунок 1.2).

К симметричным рельсам, производимым на рельсобалочных станах, которые широко применяются, относятся:

- рельсы железнодорожные широкой колеи Р65, Р65К, Р50 (рисунок 1.2, а) [22];
- крановые рельсы КР70, КР80, КР100, КР120 (рисунок 1.2, б) [23];
- профиль для шахтных монорельсовых дорог М200 (рисунок 1.2, е) [24].

К асимметричным рельсовым профилям, прокатываемым на рельсобалочных станах, относятся:

- усовиковые рельсы УР65, УР50 (рисунок 1.2, в) [25];
- остряжковые рельсы ОР50, ОР65 (рисунок 1.2, г) [26, 27];
- рельсы контррельсовые РК65, РК50 (рисунок 1.2, д) [28];

- рельс заготовки безжелобчатой для трамвайных переводов трамвайных путей ЗТ62 (рисунок 1.2, ж) [29];
- бесшпечные трамвайные желобчатые рельсы РТЖБ-58 (рисунок 1.2, з) [30];
- трамвайные желобчатые рельсы Т58, Т62, РТ58, РТ62, РТ60Е, РТ62Е (рисунок 1.2, и) [7, 31 – 33].

По технологии прокатки симметричных рельсов существует достаточно много исследований, разработок и промышленных результатов, которые широко и углубленно отражены в научной литературе [34 – 60].

Технология прокатки асимметричных рельсов, таких как остряковые и усовиковые рельсы, имея незначительную асимметрию профиля поперечного сечения, методы их калибровки несколько отличаются от аналогичных по геометрии профилей [37, 61 – 83]. Профиль бесшпечного трамвайного желобчатого рельса РТЖБ-58 в странах СНГ в настоящее время производит только «ДМЗ им. Петровского» [84, 85]. В связи с тем, что геометрия профиля, несмотря на асимметрию, достаточно проста, калибровка и прокатка данного профиля не вызывает трудностей [86], при этом сам профиль производится по техническим условиям [30].

Рельсы для городских железных дорог – трамвайные желобчатые рельсы, относятся к специальным типам прокатываемых рельсов. Трамвайные рельсы имеют один из самых сложных профилей поперечного сечения, получаемого в процессе прокатки (рисунок 1.3). Поэтому все исследования в диссертации выполнены на примере самого сложного асимметричного профиля, которые впоследствии, с некоторой степенью упрощения, применены для других асимметричных профилей, таких как остряковые и усовиковые рельсы.

Прокатка трамвайных рельсов, в отличие от прокатки железнодорожных рельсов, значительно труднее и требует специальных предчистовых и чистовых трех- или четырехвалковых калибров. Эти специальные предчистовые и чистовые калибры необходимы для получения сложной геометрии профиля трамвайного

рельса, которая выделяется из всех асимметричных рельсовых профилей, при этом имеет свои характерные особенности (рисунок 1.4) [60, 61]:

- глубокий желоб, который разделяет головку от губы;
- тонкая шейка;
- подошва с тонкими фланцами, при незначительных радиусах сопряжения шейки с головкой и подошвой;
- асимметрия профиля не только в горизонтальной, но и в вертикальной плоскостях.

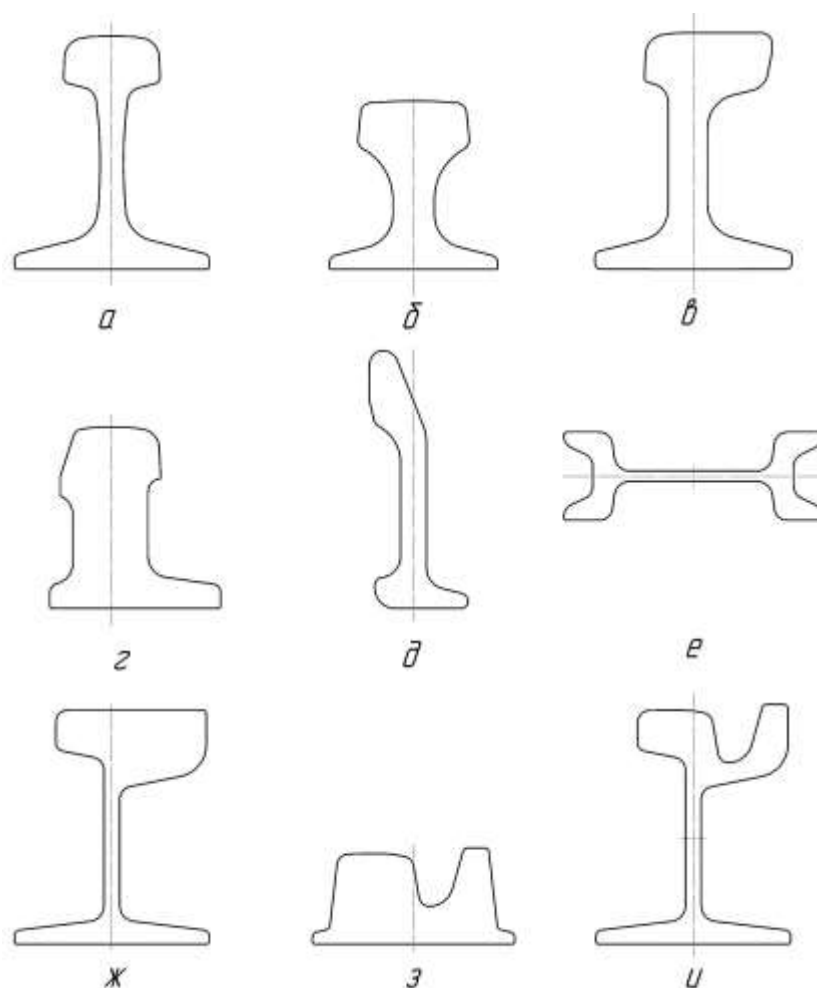


Рисунок 1.2 – Поперечное сечение рельсовых профилей;

- а – рельс железнодорожный широкой колеи; б – рельс крановый;
 в – рельс усовиковый; г – рельс остряковый; д – рельс контррельсовый;
 е – монорельс; ж – рельс заготовки безжелобчатой для трамвайных переводов трамвайных путей; з – рельс трамвайный желобчатый бесшеечный;
 и – рельс трамвайный желобчатый

в свою очередь, вызывает необходимость в значительном усложнении конструкции подушек валков [58, 94].

В настоящее время по трамвайным рельсам существует ограниченное количество технической информации, при этом вопросы процесса прокатки изучены недостаточно [9, 21, 31, 60, 61, 87, 130, 132 – 137].

В результате проведенного исторического обзора установлено, что в течение всей истории производства трамвайных рельсов в России их ни разу не удалось прокатать в соответствии с требованиями ГОСТ, поэтому трамвайные рельсы выпускались по техническим условиям, в которые периодически вносили изменения, вызванные невозможностью получить требуемую геометрию профиля трамвайного рельса, а именно сложного профиля головки рельса. Также вносились изменения, связанные с химическим составом сталей для трамвайных рельсов и способов ее производства (в мартеновских, а затем в электросталеплавильных печах), горячей маркировкой и болтовым отверстиям.

Постоянно повышающиеся требования к рельсовым профилям, в том числе и к трамвайным рельсам, вызывали необходимость коренного улучшения и модернизации всего рельсового производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

В результате масштабной реконструкции рельсового производства на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» в 2013 г. построен новый прокатный стан с группой тандем с чистовой непрерывной группой клетей, который дал возможность производить трамвайные рельсы высокого качества в соответствии с требованиями ГОСТ. Однако, опыт прокатки трамвайных рельсов с помощью непрерывно-реверсивной группы клетей, которая входит в состав рельсобалочного стана, полностью отсутствовал не только в России, но и в странах СНГ. Поэтому в диссертации приводятся результаты исследований, целью которых было разработать теоретические и технологические основы прокатки асимметричных рельсовых профилей на станах с группой тандем.

Прокатные станы с группой тандем имеют в своем составе чистовую непрерывно-реверсивную группу, состоящую из универсальных и двухвалковых

клетей. Это является одним из основных отличий станов с группой тандем от прокатных станов, в состав которых входили клетки трио с чистовой клетью дуо.

Несмотря на то, что производство трамвайных рельсов имеет значительную давность [87, 132, 133], литературных данных по калибровке и технологии прокатки весьма ограничено [21, 58, 60, 61, 87 – 89, 93 135, 138]. При этом они все выполнены на прокатном стане КМК дуо «850», в состав которого входили клетки трио, и их недостаточно для разработки ресурсосберегающей технологии прокатки асимметричных рельсовых профилей, в том числе и трамвайных рельсов, на стане тандем с применением чистовой непрерывной реверсивной группы клеток.

Отсутствие этих данных объясняется тем, что исследование напряженно-деформированного состояния и энергосиловых параметров прокатки трамвайных рельсов является сложной научно-практической задачей, которую возможно решить исключительно с применением современных компьютерных программных продуктов, обеспечивающих моделирование течения металла в калибрах при прокатке, а также необходимости в проведении натурных исследований на промышленном оборудовании.

В работе [129] представлены результаты исследований деформированного состояния металла и сил, возникающих при прокатке трамвайных рельсов в предчистовом – трехвалковом и в чистовом – четырехвалковом калибрах на рельсобалочном стане дуо «850» Новокузнецкого металлургического комбината.

В связи с реконструкцией рельсобалочного цеха в 2013 г. на ЕВРАЗ ЗСМК и запуском прокатного стана с группой тандем [38, 101, 102], технология производства всех прокатываемых профилей потребовала углубленного изучения. Это связано с тем, что при прокатке в непрерывной чистовой группе клеток стана тандем, состоящей из трех клеток, формоизменение металла в четырехвалковых калибрах имеет свои особенности.

В научной литературе, за исключением статей и монографий по диссертации, полностью отсутствует информация по исследованию напряженно-деформированного состояния металла при прокатке трамвайных рельсов в

четырёхвалковых калибрах, а также отсутствуют данные по влиянию геометрических факторов калибра на изменение размеров фланцев профиля при прокатке трамвайных рельсов. Для трамвайных рельсов никогда не проводились исследования по выработке осевой пористости непрерывнолитой заготовки при прокатке. Отсутствует информация по энергосиловым параметрам прокатки трамвайных рельсов, а из-за сложной геометрии профиля невозможно оценить действительные контактные поверхности металла с валками в четырёхвалковых калибрах. Отсутствуют результаты исследований по решению проблемы неуравновешенности горизонтальных сил в четырёхвалковых калибрах при прокатке трамвайных рельсов, при этом не определены эффективные скоростные режимы и возникающие крутящие моменты при прокатке трамвайных рельсов.

Исходя из вышеизложенного, становится очевиден вывод о том, что из-за отсутствия необходимых теоретических обоснований отсутствует и возможность разработки ресурсосберегающих технологий прокатки трамвайных рельсов и других асимметричных рельсовых профилей на прокатных станах с группой тандем [139 – 145].

1.2.2 Асимметричные рельсовые профили для железнодорожных путей

Помимо сложных, с точки зрения технологии прокатки, асимметричных профилей – трамвайных рельсов, которые применяются для городского рельсового транспорта, существуют другие асимметричные рельсовые профили, применяемые на железнодорожных путях широкой колеи, – это остряковые и усовиковые рельсы. Они имеют важное практическое значение, устанавливаются в одном пути с железнодорожными рельсами и должны обеспечивать выполнение требований, связанных с тенденциями повышения скорости движения железнодорожных поездов [146 – 148].

Для стрелочных переводов железнодорожных путей применяются остряки из остряковых рельсов ОР50 и ОР65, а для изготовления соединений и пересечений путей железных дорог применяются усовики из усовиковых рельсов УР65.

После строительства и запуска нового прокатного стана с группой тандем на ЕВРАЗ ЗСМК появилась возможность прокатывать сложные асимметричные рельсовые профили более точными по геометрии, поэтому были разработаны новые нормативные документы: это ГОСТ Р 55820 – 2013 «Рельсы железнодорожные остряковые. Технические условия» и ТС 05757676-44 – 2017 «Рельсы усовиковые типа УР65». Однако технология прокатки данных профилей на станах с группой тандем, изучена недостаточно, требуют изучения вопросы по исследованию напряженно-деформированного состояния металла и энергосиловых параметров прокатки. В диссертации приведены результаты исследования по разработке, теоретическому обоснованию и внедрению новых ресурсосберегающих технологий прокатки остряковых и усовиковых рельсов на стане с группой тандем.

В связи со сложностью технологии прокатки асимметричных рельсовых профилей типа ОР50, ОР65 и УР65 в предчистовых и чистовых калибрах, из всех комбинатов России только два металлургических комбината освоили в промышленных объемах производство сложных, с точки зрения технологии прокатки, асимметричных рельсовых профилей ОР50, ОР65 и УР65 – это ЕВРАЗ ЗСМК и ЧМК.

Остряковые рельсы ОР50 и ОР65 – это специальные типы рельсов, из которых изготавливают «остряк» (переводной рельс), применяемый для стрелочных переводов (рисунок 1.6, а).

Усовиковые рельсы УР65 также относятся к специальным типам рельсов, из которых изготавливают «усовик» для крестовин стрелочных переводов (рисунок 1.6, б), которые используются для соединения и пересечения железнодорожных путей на крестовине стрелочных переводов и съездах скоростных линий.

Рельсы ОР50, ОР65 и УР65 в России используются в качестве заготовок на Новосибирском, Муромском и Керченском стрелочных заводах для изготовления остряков и усовиков стрелочных переводов и крестовин стрелочных переводов на

железнодорожных путях ОАО «РЖД», путях метрополитена и путях промтранспорта.



а



б

Рисунок 1.6 – Установка остряковых и усовиковых рельсов в железнодорожном пути [149]: а – установка острякового рельса; б – установка усовикового рельса

Производство остряковых рельсов на стане с группой тандем по новому ГОСТ Р 55820 – 2013 и усовиковых рельсов по новому ТС 05757676-44 – 2017, позволит повысить уровень безопасности железнодорожного движения на путях со скоростным и высокоскоростным пассажирским движением и на путях с высокой грузонапряженностью. Прокатанные на стане с группой тандем остряковые и усовиковые рельсы, согласно требованиям нормативных документов, позволяют повысить эксплуатационную надежность и срок службы усовиков и остряков стрелочных переводов, которые являются самой опасной (по последствиям разрушения под поездами) из деталей верхнего строения железнодорожного пути.

Технологии прокатки симметричных рельсов посвящено значительное количество работ [150 – 161], однако прокатка асимметричных рельсовых профилей на станах с группой тандем изучена недостаточно. Имеющиеся результаты исследований направлены на усовершенствование калибровок в

черновых двухвалковых калибрах, предчистовых и чистовых трехвалковых калибрах [61, 162].

1.3 Напряженно-деформированное состояние металла при прокатке рельсовых профилей

Исследования по формоизменению металла при его обработке давлением, а также его напряженно-деформированное состояние, сил и моментов прокатки отражены в работах ученых: Головин А.Ф., Третьяков А.В., Выдрин В.Н., Железнов Ю.Д., Полухин В.П., Григорьев А.К., Тетерин П.К., Гун Г.Я., Никитин Г.С., Рокотян С.Е., Зюзин В.И., Николаев В.А., Воронцов В.К., Ждан В.Т., Белосевич В.К., Зиновьев А.В., Бровман М.Я., Гарбер Э.А., Салганик В.М., Мазур В.Л., Приходько И.Ю., Сафьян А.М., Гришков А.И., Коновалов Ю.В., Васильев Я.Д., Нефедов А.А., Тягунов В.А., Бахтинов Б.П., Штернов М.М., Литовченко Н.В., Диомидов Б.Б., Клименко В.М., Старченко Д.И., Перетяцько В.Н., Зайков М.А., Смирнов В.К., Шилов В.А., Илюкович Б.М., Дорофеев В.В., Шварц Д.Л.

В литературе по трамвайным рельсам [21, 60, 61, 87 – 89, 133] приведены обобщенные данные, касающиеся геометрических параметров, их характерных особенностей, а также общие принципы прокатки желобчатых рельсов в английской, немецкой и американской литературе без анализа формоизменения и напряженно-деформированного состояния металла в калибре. Из всех литературных источников по прокатке трамвайных рельсов следует, что до исследований автора диссертации проводились лишь испытания на прогиб подошвы под статической нагрузкой и на ударную вязкость.

В литературе встречается достаточно много публикаций [96 – 100, 127, 128, 163, 164 и др.] по деформации металла в черновых разрезных калибрах при прокатке швеллеров, балок, железнодорожных рельсов для придания профилю формы, приближающейся к форме готового профиля, а также по бесшечным трамвайным рельсам [84 – 86]. Однако формоизменение и геометрические

параметры при прокатке трамвайного рельса при разрезке губы головки профиля принципиально отличаются от вышеперечисленных, при этом исследования напряженно-деформированного состояния металла, кроме работ автора диссертации, отсутствуют.

В одной из современных работ [40] приведены результаты исследования температурных полей и напряженного состояния металла при прокатке рельсового профиля на примере длиномерных рельсов Р65. Приведены также результаты компьютерного моделирования в программном комплексе Deform-3D. Получены закономерности изменения температуры и напряженного состояния металла при прокатке Р65 на рельсобалочном стане, и даны рекомендации для получения высококачественных железнодорожных рельсов. В данной работе и известных работах по прокатке железнодорожных рельсов на рельсобалочных станах [10, 18, 19, 38, 44, 99, 102, 165], а также в обзорной статье по особенностям физического моделирования контролируемой прокатки [166] не рассмотрены вопросы исследования напряженно-деформированного состояния металла при прокатке сложных асимметричных рельсовых профилей.

Имеется достаточно объемная работа [167], в которой рассмотрены результаты моделирования процесса прокатки железнодорожных рельсов в четырехвалковых калибрах из которой следует, что программа Deform-3D позволяет проводить достоверные моделирования, по итогам которого получены данные по напряженно-деформированному состоянию, геометрическим и силовым параметрам процесса прокатки в универсальных калибрах. Предлагаются режимы обжатий железнодорожных рельсов при прокатке в универсальных клетях, основанные на равенстве коэффициентов вытяжки по элементам профиля [168, 169]. Моделирование выполнено на примере железнодорожного рельса, при этом в работе не рассматривается вопрос исследования напряженно-деформированного состояния металла при прокатке асимметричного рельсового профиля – трамвайного рельса.

Классификации ящичных калибров по виду напряженно-деформированного состояния металла посвящена работа [170]. Авторами предложен подход к

классификации ящичных калибров, исходя из вида напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации. В работе отсутствуют данные по прокатке трамвайных рельсов в четырехвалковых калибрах.

Исследованию температурного и напряженно-деформированного состояния металла при прокатке длинномерных рельсов посвящена работа [171]. В работе проведено компьютерное моделирование с применением метода конечных элементов для определения напряженно-деформированного состояния металла при прокатке железнодорожных рельсов Р65 на рельсобалочном прокатном стане с группой тандем. Авторы установили, что в поперечном сечении напряженно-деформированное состояние имеет неравномерную картину. В работе отсутствуют данные по исследованию напряженно-деформированного состояния металла при прокатке асимметричных рельсов, в том числе трамвайных рельсов.

Основным фактором, определяющим ключевое направление для разработки технологии прокатки любого профиля, является исследование напряженно-деформированного состояния металла в калибрах. Наиболее наглядными показателями, определяющими объемное деформированное и напряженное состояние металла, являются анализ распределения значений интенсивности деформаций и интенсивности напряжений в поперечном сечении раската [69, 172 – 181].

Для оценки вероятности разрушения металла в процессе прокатки возможно использовать встроенный в Deform-3D прогнозируемый критерий разрушения поверхностных и внутренних слоев металла Кокрофта-Лэтэма (Cockroft@Latham), который рассчитывается по формуле [185]:

$$D = \int_0^{\bar{\varepsilon}} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon},$$

где, $\bar{\varepsilon}$ – накопленная (эквивалентная) пластическая деформация; $d\bar{\varepsilon}$ – приращение накопленной деформации; σ^* – максимальное главное растягивающее напряжение; $\bar{\sigma}$ – интенсивность напряжений (эквивалентное напряжение по Мизесу).

Критерии разрушения Кокрофта-Лэтэма, Райсона-Трэйси, Мак-Клинтока нашли широкое применение за рубежом, однако, в нашей стране наибольшее

распространение получили критерии Колмогорова В.Л. [186 – 192], Огородникова В.А. [193, 194] и Деля Г.Д. [195, 196]. Это обусловлено тем, что критерий Кокрофта-Лэтэма не учитывает увеличение технологической пластичности металла при увеличении сжимающих напряжений с учетом напряженного состояния деформируемого металла, что подтверждено экспериментальными исследованиями и особенно актуально для холодной и теплой пластических деформаций, однако в данной диссертации изучаются только горячие деформации, поэтому применение критерия Кокрофта-Лэтэма обосновано. В работах ученых Смирнова-Аляева Г.А. [197], Колмогорова В.Л. [186 – 192], Бриджмена П.В. [198] отмечается, что накопленная деформация в момент разрушения металла в максимальной степени зависит от жесткости напряженного состояния η [185]: $\eta = \frac{3\sigma_m}{\bar{\sigma}}$, где $\sigma_m = \frac{1}{3}\sigma_{ii}$ – среднее напряжение. Данная зависимость, как правило, нелинейная, отражается в диаграмме пластичности, являющейся характеристикой металла [199, 200].

Власовым А.В. [185] разработана подпрограмма для препроцессора Deform-3D, которая позволяет рассчитывать поврежденность материала при холодной штамповке по этим критериям. Сравнение результатов компьютерного моделирования при холодной пластической деформации по степени использования ресурса пластичности в зависимости от применяемого критерия разрушения по Колмогорову В.Л., Огородникову В.А. и Делю Г.Д. приведены в работе [185]. Власов В.А. отмечает, что по всем трем критериям разрушения, при одинаковых условиях деформации, получены различные значения использования ресурса пластичности, так по критерию Колмогорова $\psi > 1$ (происходит разрушение), по критерию Огородникова $\psi < 0,4$ (разрушение не происходит), по критерию Деля $\psi < 0,2$ (разрушение не происходит), в то же время по критерию Колмогорова В.Л. и Огородникова В.А. наиболее опасными являются поверхностные слои, а по критерию Деля Г.Д. наиболее опасными являются центральные слои. Власов В.А. подчеркивает, что в технической литературе, при выбранном способе пластической деформации, наиболее опасными являются

именно центральные слои. Исходя из проведенной работы, Власов В.А. делает вывод о том, что для получения достоверных результатов требуется максимально точно построить диаграмму пластичности деформируемого материала [185].

Критерий Кокрофта-Лэтэма, как и критерий Райсона-Трэйси, в своей основе базируются на расчете потенциальной энергии пластической деформации и относятся к энергетическим критериям, вычисление которого соответствует площади под кривой в координатах накопленной пластической деформации и отношению максимального главного напряжения к интенсивности напряжений. Как показывают многочисленные данные, критерий Кокрофта-Лэтэма достаточно адекватно оценивает вероятность разрушения при пластической деформации, при этом данные расчетов показывают заниженные критические значения, при которых происходит разрушение металла в связи с тем, что при расчете также не учитывается залечивание дефектов при горячей пластической деформации [201]. Однако при сравнении результатов компьютерного моделирования расчета в Deform-3D критерия Кокрофта-Лэтэма и промышленных испытаний на разрушение металлов показывают удовлетворительную сходимость [202, 203], поэтому программа Deform-3D нашла широкое применение в Российской Федерации в крупных компаниях и университетах [204].

Исходя из вышеизложенного и имеющихся обширных данных по использованию программного комплекса Deform-3D, в том числе и для расчета критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма, в компаниях с мировым именем, можно сделать вывод о широкой апробации и промышленном применении как программного комплекса Deform-3D, так и прогнозирования процессов разрушения с помощью критерия Кокрофта-Лэтэма [205 – 209].

Как отмечалось ранее, прокатка трамвайных рельсов производится при высоких температурах металла, при этом, после каждого прохода, в междеформационный период происходит полная релаксация напряжений. Реологические свойства рельсовой стали, требуемые для возможности проведения расчетов в Deform-3D, в том числе и для расчета критерия разрушения, загружены в программу в виде кривых сопротивления деформации, полученных на основе обширных

экспериментальных исследований сопротивления деформации в зависимости от температуры, скорости и степени деформации рельсовых сталей [210].

С помощью результатов, полученных при исследовании напряженно-деформированного состояния металла, возможно: проанализировать характер течения металла по элементам профиля при заполнении элементов калибра; оценить течение металла между элементами профиля; по распределению значений интенсивности напряжений оценить, нет ли превышения критических значений, после которого идет разрушение.

Наиболее сложную технологию, характер распределения напряжений и деформаций при прокатке рельсовых профилей имеют трамвайные рельсы, поэтому исследования выполнены на примере самого сложного асимметричного рельсового профиля.

1.4 Моделирование процесса прокатки рельсовых профилей с помощью метода конечных элементов

Теория прокатки начала усиленно развиваться с середины XIX века и продолжается до настоящего времени благодаря трудам выдающихся ученых Головина А.Ф., Целикова А.И., Павлова И.М., Чекмарева А.П., Томленова А.Д., Губкина С.И., Смирнова В.С., Полухина П.И., Тягунова В.А., Тарновского И.Я., Поздеева А.А., Колмогорова В.Л., Выдрина В.Н., Тетерина П.К., Бахтинова Б.П., Штернова М.М., Королева А.А., Рокотяна Е.С., Швейкина В.В., Сафьяна М.М., Финка С., Зибеля Э., Кармана Т., Экелунда С., Надаи А., Гелеи Ш., Роберсса В., Гуна Г.Я., Богатова А.А., Шилова В.А., Инатовича Ю.В., Смирнова В.К., Бондина А.Р., Перетяцько В.Н., Дорофеева В.В., Шварца Д.Л. и др. ученых, внесших значительный вклад в теорию и практику прокатки, являющейся основой современного компьютерного моделирования [211, 212].

Как известно, процессы обработки металлов давлением применяются для получения требуемой продукции с помощью формоизменения поперечного сечения и сопровождаются сложным течением металла при пластической

деформации [76]. Применительно к процессу прокатки, для возможности интерпретации течения металла в очаге и внеконтактных зон деформации, а также благодаря развитию вычислительной техники, разработаны методы моделирования с применением метода конечных элементов.

Стоит отметить, что современные методы моделирования с помощью конечных элементов позволяют существенно сократить количество экспериментов с помощью натуральных исследований, а это значительно сокращает финансовые затраты, для получения требуемых данных, что может ошибочно создавать иллюзию простоты получения результата, однако успешное проведение моделирования – это большой объем исследовательских работ, который в себе сочетает теорию ОМД и программы моделирования.

Как утверждают авторы работы [211], на современном этапе развития программ компьютерного моделирования для процессов ОМД не существует термина «оптимальная технология», а более уместно говорить о приемлемом варианте технологии по интересующим качественным характеристикам продукции и технологическим особенностям оборудования или эффективной технологии.

Современное компьютерное моделирование позволяет получить большое количество данных по напряженно-деформируемому состоянию металла при прокатке, сопоставить различные варианты технологий в зависимости от критериев эффективности и исследовать процесс деформации.

Тем не менее, моделирование методом конечных элементов не является альтернативным вариантом натурным исследованиям, а представляет собой современный инструмент для решения численных задач.

Современное компьютерное моделирование базируется на теории обработки металлов давлением, изложенной в работах известных отечественных ученых Целикова А.И. [181], Смирнова В.С. [69] [177], Тарновского И.Я. [213].

В большинстве аналитических решений используется гипотеза плоских сечений. Переход от аналитических методов расчета ОМД к численным с применением ЭВМ реализован в работах Смирнова В.К., Смирнова В.С., Григорьева А.К., Шилова В.А., Инатовича Ю.В., Литвинова К.И.,

Харитонина С.В. [75, 214, 215]. Смирнов В.С., Григорьев А.К. в 1970 г. в работе [214] приводят подробное описание математических подходов, которые позволили в дальнейшем, применяя компьютерное моделирование, более точно, исключая ранее применявшиеся упрощения и допущения, на качественно более высоком уровне, предложить подход в данных расчетах на основе метода конечных разностей, являющийся развитием идей, предложенных ранее Смирновым В.С. и Тарновским И.Я., которые удалось реализовать за счет совершенствования вычислительных машин [211].

Следующим этапом в развитии математического моделирования был вариационный подход и численная реализация методом конечных элементов (МКЭ), изложенный в работе Няшина Ю.И., Ананьева И.Н., Скороходова А.Н. [216], что полностью его отличало от предыдущего этапа, в котором применялся метод конечных разностей. Новый математический аппарат, применяя теорию упругости и пластичности, был разработан для решения задач механики и оценки прочности. Одновременно за рубежом первые работы, связанные с обработкой металлов давлением с применением метода конечных элементов в условиях плоской деформации, принадлежат Ли К., Кобояши С. [217].

Применяемый в диссертации МКЭ [218] является одним из вариационных, при этом в литературе еще его трактуют как метод Рица, а первое упоминание в научной литературе об МКЭ появилось в 1954 г. [219].

В настоящее время наиболее распространенными являются три численных метода решения дифференциальных уравнений: метод конечных разностей (МКР); метод конечных элементов (МКЭ) и метод граничных элементов (МГЭ). МКР берет свои начала в подходе Эйлера Л., а МКЭ и МГЭ получили свое развитие исключительно совершенствованию ЭВМ [220 – 227].

Как известно, в методе конечных разностей применяется замена производных конечными разностями, при этом условия точно соблюдаются граничные условия 1-го и 2-го рода, а дифференциальное уравнение решается приближенно. В методе конечных элементов выполняется переход от дифференциальных уравнений к функционалу, эквивалентному дифференциальному уравнению с граничными

условиями 2-го рода. В связи с этим граничные условия 2-го дифференциального уравнения решаются приближенно, а граничные условия 1-го рода выполняются достаточно точно. В методе граничных элементов применен подход фундаментальных аналитических решений, поэтому граничные условия 1-го рода и решаемое уравнение выполняется точно, а граничные условия 2-го рода выполняются приближенно [211, 228].

Работа [228] является одним из самых объемных научных трудов за последние 15 лет в нашей стране, касающихся вопросов компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением. В работе приводится исторический обзор, описание и отличие численных методов МКР, МКЭ и МГЭ. В работе имеется упоминание о том, что продольная прокатка – это один из самых сложных процессов с точки зрения математического моделирования, при этом в работе подробно разобраны математические основы компьютерного моделирования в современных программах, приводятся обширные данные результатов моделирования ОМД в штампах, однако данные по моделированию процесса прокатки полностью отсутствуют.

Объемная работа с применением компьютерного моделирования [229], в которой подробно изложены основы теории пластичности при моделировании течения металла методом МКЭ, приведены пошаговые алгоритмы работы в программе Forming для кручения и сжатия круглого стержня, волочения тонкостенной трубы через круговую коническую матрицу, моделирование процессов штамповки вращающимся инструментом, а также значительную часть работы занимает моделирование горячей объемной штамповки. Однако в работе полностью отсутствуют данные по моделированию процесса прокатки рельсовых профилей.

Одним из последних больших научных трудов является работа [211] – это учебник, который в себе объединил основы современной теории продольной прокатки по классической теории Целикова А.И. В учебнике приведены обширные данные по теории пластической деформации, по очагу деформации, его параметрам и структуре, рассмотрены условия захвата раската валками,

приводятся закономерности формоизменения полосы в очаге деформации, приведены расчеты контактных напряжений в очаге деформации, расчет уширения, силы, мощности и моментов при прокатке. В данной работе не рассматривается процесс прокатки рельсовых профилей, а в частности трамвайных желобчатых рельсов, и не приводятся методики расчета вышеописанных параметров на современных прокатных станах в четырехвалковых калибрах.

В статье [230] приводятся результаты ввода в эксплуатацию прокатного завода, в составе которого имеется среднесортный стан с чистовой непрерывной группой, состоящей из четырех клетей. Приводятся данные, что группой калибровщиков в течение полутора лет проводилось компьютерное моделирование с использованием программного обеспечения для конечно-элементного анализа сортового проката на примере двутаврового профиля №24. Получены результаты по заполнению калибров, силе и моментам прокатки, условиям захвата полосы, также представлена схема прокатки двутаврового профиля. Однако двутавровый профиль имеет, по сравнению с трамвайным рельсом, простую конфигурацию поперечного сечения, по которому имеется достаточно много научных данных, в том числе и по калибровке, при этом в статье не рассматривается процесс моделирования прокатки асимметричных рельсовых профилей и трамвайных рельсов.

В статье [231] рассматриваются вопросы энергосиловых расчетов с учетом контактных напряжений в очаге деформации, силы прокатки и мощности главных приводов рабочих клетей. Проведенное моделирование выполнено на примере листопрокатного производства, а вопросы прокатки асимметричных профилей в четырехвалковых калибрах не рассмотрены.

В статье [232] приводятся данные по моделированию методом конечных элементов с использованием программных комплексов QForm-3D и Deform-3D. Приведены данные по анализу напряженно-деформированного состояния металла и качеству внутренних слоев металла с замером твердости по поперечному сечению, а также исследовано заполнение калибров металлом. Работа выполнена

для поперечно-винтовой прокатки шаров на виртуальном шаропрокатном стане. В работе не рассмотрены вопросы моделирования процесса прокатки в четырехвалковых калибрах.

В статье [105] приведены данные по технологии прокатки двутавровых профилей на рельсобалочном стане, проведенном компьютерном моделировании. По результатам исследования получены эпюры температурных полей по элементам профиля, произведена оценка напряженно-деформированного состояния, однако в статье не рассматривается вопрос прокатки асимметричных рельсовых профилей.

В статье [233] приведены направления современного развития вариационных методов решения задач сортовой прокатки. Отмечено, что совершенствование вариационных методов решения задач для сортовой прокатки возможно только с применением современных компьютеров с многоядерными процессорами и математических программ, что позволяет значительно упростить процесс расчета и повысить его точность. В работе не приводятся рекомендации для расчета технологии прокатки асимметричных рельсовых профилей.

В настоящее время широко применяются в исследованиях процессов ОМД следующие программы и расчетные модули: Deform-3D; FORGE-3D; MSC.MARC; Qform; ANSYS и др. В настоящее время динамично развиваются методы компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением (ОМД) с использованием численного метода конечных элементов (МКЭ) программного комплекса Deform-3D.

При проведении исследований в работе широко применялось компьютерное моделирование [234], которое проводилось в соответствии с основами механики сплошных сред с использованием метода конечных элементов программного комплекса Deform-3D [235]. Deform-3D — это специализированный программный комплекс, предназначенный для моделирования технологических процессов обработки металлов давлением и термообработки [235 – 238]. В настоящее время данный программный продукт нашел широкое применение в России и за рубежом

не только в научно-исследовательской сфере, но и на промышленных предприятиях.

При проведении компьютерного моделирования с использованием Deform-3D для исследования напряженно-деформированного состояния и энергосиловых параметров прокатки, требуется учитывать большое количество факторов, влияющих на формирование профиля при прокатке, поэтому исходные данные для моделирования являются одним из основных этапов, позволяющих впоследствии получить адекватные результаты. Моделирование процесса прокатки трамвайных рельсов с применением конечно-элементного анализа, позволяет решать системы интегрально-дифференциальных уравнений, решение которых аналитическим способом невозможно.

В основу Deform-3D положен метод конечных элементов, при этом используются конечные элементы типа четырехузловой тетраэдр. В каждой точке рассматриваемой обрабатываемой заготовки применительно к прокатке рассчитываются скорость, сила, температура, граничные условия по сопротивлению, накопленные повреждения в заготовке, различные деформации и напряжения, упругая энергия и энергия пластических деформаций и т.д. При проведении расчетов применяется автоматическое перестроение конечно-элементной сетки. При решении задач деформирования возможно применять один из методов алгоритма решателя – это метод сопряженных градиентов или метод разреженных матриц. В программном комплексе используются следующие основополагающие зависимости и соотношения: дифференциальные уравнения равновесия; дифференциальные зависимости Коши в связи компонент тензора деформации и вектора перемещений; законы трения по Кулону-Амонтону; условие пластичности Губера-Мизеса. При решении упругопластических задач для зон, находящихся в упругом состоянии, связь между деформациями и напряжениями выражается в виде обобщенного закона Гука. При решении систем уравнений используются численные итерационные методы, в частности, метод Ньютона-Рафсона. В результате определяются перемещения U , деформации ε ,

напряжения σ , скорости деформации $\dot{\xi}$, компоненты тензоров деформаций и напряжений, интенсивность деформаций, интенсивность напряжений, силы нормального давления, силы трения на поверхности контакта металла с инструментом и другие параметры [237, 239 – 241, 242].

1.5 Выработка осевой пористости при прокатке из непрерывнолитых заготовок

У процесса прокатки существует достаточно много факторов и параметров качества готовой продукции (качество поверхности, прочностные свойства и т.п.), однако большое внимание уделяется однородности структуры поперечного сечения профиля.

Непрерывная разливка стали идет с постоянным вытягиванием заготовки из кристаллизатора, поэтому дефекты усадки размещаются по всей длине заготовки. Отвод тепла от заготовки в осевом направлении практически отсутствует, что приводит к значительному распространению лунки жидкого металла по длине непрерывнолитой заготовки (НЛЗ). В результате центральная часть заготовки затвердевает в последнюю очередь, а усадочные поры и химическая неоднородность концентрируются по тепловой оси заготовки [56, 243 – 245]. Как известно, прокатка рельсовых профилей в черновых калибрах во многом предопределяет качество готового профиля, поэтому основной задачей при прокатке рельсовых профилей является максимальная проработка осевой пористости и осевой ликвации в черновых калибрах [246, 247] с перераспределением ее в область шейки рельсового профиля, при этом ширина ликвационной зоны в готовом профиле не должна превышать $\frac{1}{2}$ толщины шейки [56, 248].

При прокатке двутавровых балок, швеллеров, рельсов и некоторых других профилей первым фасонным калибром является разрезной калибр. Он предназначен для придания заготовке формы, приближенно соответствующей

форме готового профиля. В разрезном калибре происходят значительные обжатия в местах внедрения разрезных гребней.

Большое влияние на заваривание несплошностей в НЛЗ при прокатке оказывают разрезные калибры. При детальном рассмотрении разрезных калибров, применяемых на различных прокатных станах, нельзя не отметить их многообразие. Их форма зависит от формы и размеров прокатываемого профиля, типа стана и принятой системы калибровки. Однако все же можно выделить два основных типа разрезных калибров: закрытые с острыми гребнями; открытые с плоскими гребнями. Гребни могут располагаться на двух валках или только на одном валке. В первом случае калибры можно считать симметричными (условно), во втором – несимметричными. Наличие двух или только одного гребня, естественно, отражается на захватывающей способности валков [249].

Симметричные разрезные калибры применяются в основном при прокатке двутавровых балок. Закрытые калибры с острыми гребнями чаще применяются при прокатке двутавровых балок малых и средних размеров, а открытые калибры с плоскими гребнями – при прокатке балок больших размеров [249].

Несимметричные разрезные калибры называются также тавровыми или трапециевидными. Их применяют при прокатке рельсов, швеллеров и некоторых других профилей [249].

Описанные выше разрезные калибры применяются преимущественно в качестве черновых при производстве большого количества профилей, однако данные калибры существенно отличаются от предчистовых и чистовых четырехвалковых разрезных калибров трамвайных рельсов, которые относительно своей вертикальной и горизонтальной осей не симметричны, а также наличие достаточно жестких размеров и допусков, как на желоб, так и на профиль в целом, чего нельзя сказать о черновых разрезных калибрах, в которых при непопадании раската в размер, его корректировка возможна в последующих калибрах.

В статьях [44, 56] приведены результаты научно-исследовательской работы по изучению особенностей технологии прокатки железнодорожных рельсов Р65. В

данной работе приведены результаты натурных исследований формоизменения центральной части заготовки при прокатке Р65 на рельсобалочном прокатном стане дуо «850» до его реконструкции. Исследования проводились на лабораторном прокатном стане «250» с использованием метода координатной сетки. В лабораторной заготовке размеры исходных ячеек координатной сетки в поперечном сечении заготовки составляли 12 x 12 мм, что соответствует размерам 60 x 60 мм для заготовки в натуральную величину, которая имела размеры 300 x 330 мм. Проведенное лабораторное исследование позволило определить местонахождение центральной части раската, моделирующей месторасположение осевой пористости. Лабораторные данные по формоизменению ячейки, расположенной по оси исходной заготовки, были соотнесены с результатами ранее проводившихся промышленных исследований формоизменения осевой пористости при прокатке железнодорожных рельсов Р65 на рельсобалочном стане дуо «850» до его реконструкции и показали высокую сходимость результатов.

Стоит отметить, что существующие размеры исходной НЛЗ, прокатываемой на рельсобалочном стане с группой тандем, составляют 300 x 365 мм, что отличается от исходных размеров НЛЗ, применявшейся на рельсобалочном прокатном стане дуо «850», при этом размеры поперечного сечения заготовки составляли 300 x 330 мм. Поэтому с изменением размера исходной НЛЗ и геометрических размеров калибров, применяемых для прокатки трамвайных рельсов, имеющихся данных недостаточно, чтобы оценить формоизменение осевой пористости при прокатке трамвайных рельсов с учетом напряженно-деформированного состояния металла на прокатном стане с группой тандем.

В работе [250] приведены данные по исследованию «залечивания» дефектов осевой зоны непрерывнолитой заготовки на физических слоистых моделях. Произведена оценка деформирования сортовой заготовки в первых трех прямоугольных калибрах обжимной клетки линейного стана 500/370. В работе не приведены данные по выработке осевой пористости НЛЗ для прокатки рельсовых профилей.

В статье [208] приведены результаты по исследованию формоизменения дефектов при прокатке квадратных заготовок в сортовых калибрах. Авторами установлены наиболее благоприятные условия по ориентации и глубине дефекта на поверхности заготовки и применяемой формы калибра для выработки данного дефекта. В статье приведены данные по выработке поверхностных дефектов, при этом не рассматривался вопрос по выработке осевой пористости НЛЗ при прокатке.

В работах [251, 252] приведены данные по исследованию заваривания несплошностей в заготовке квадратного поперечного сечения при прокатке ее в полосу сечением 250 x 21 мм. Исследования проведены в Институте автоматизации процессов пластической обработки Технологического университета Ченстохова, Польша. В исходной непрерывнолитой заготовке с поперечным сечением 160 x 160 мм были выполнены отверстия, имитирующие несплошности на расстоянии 10 мм от поверхности по ее периметру, а также в осевой части заготовки. Отверстия, в зависимости от их местоположения, имеют различный диаметр. Исходную заготовку прокатывали по двум вариантам за четыре прохода. По разработанным схемам прокатки проведено компьютерное моделирование. В процессе исследования проводили оценку распределения интенсивности деформаций и интенсивности напряжений в зависимости от формы калибра. По итогам проведенного исследования установили, что форма калибра оказывает существенное влияние на заваривание несплошности в поперечном сечении непрерывнолитой заготовки. В работе отсутствуют данные по завариванию осевой пористости непрерывнолитых заготовок большего поперечного сечения, из которых прокатывают рельсовые профили.

Исследование влияния разрезки на положение осевой ликвации при прокатке рельсов Р65 приведено в работах [55, 56]. В работе приведены результаты, которые отражают влияние соотношения сторон исходной непрерывнолитой заготовки и расположение осевой ликвации в готовом профиле железнодорожного рельса. Авторы статьи приводят анализ научных результатов, выполненных ранее другими учеными. В работе приводятся результаты

физического моделирования на свинцовых заготовках, которые состояли из набора прессованных брусочков размером 12 x 12 мм. Данную собранную заготовку затем прокатывали и исследовали формоизменение и положение модели осевой пористости. По итогам проведенного исследования авторы статьи приходят к выводу о том, что на формоизменение осевой пористости в процессе прокатки железнодорожных рельсов Р65 и расположение осевой ликвации в готовом профиле большое влияние оказывает неравномерная высотная деформация, а для получения макроструктуры железнодорожных рельсов Р65 удовлетворительного качества соотношение сторон исходной непрерывнолитой заготовки должно быть 1:1,1, т.е. 330 x 300 мм, при этом размеры осевой пористости не должны превышать 60 x 60 мм. В работе не приводятся рекомендации по прокатке рельсовых профилей с более тонкой шейкой и подошвой профиля, и асимметричной головкой – трамвайных рельсов и распределении осевой пористости в готовом профиле при прокатке из заготовки с увеличенными размерами поперечного сечения 300 x 365 мм.

1.6 Разработка эффективной технологии прокатки рельсовых профилей методами планирования экспериментов

В научной литературе имеются данные по прокатке асимметричных фланцевых профилей на примере прокатки остряжковых рельсов [253]. В данной статье приводятся особенности прокатки остряжкового рельса, показаны различные схемы прокатки и их усовершенствования. Приводится описание универсального трехвалкового калибра для прокатки остряжковых рельсов. Однако в работе не представлены данные по исследованию напряженно-деформированного состояния металла, не проведено планирование эксперимента с целью определения эффективных геометрических параметров калибров в чистовой группе тандем.

По формированию различных вариантов виртуальных калибровок имеется статья [254], в которой на основе анализа промышленных калибровок для

прокатки железнодорожных рельсов предлагается объединить по блокам. Применяя различные блоки между собой, позволяет разрабатывать калибровки железнодорожных рельсов, однако технология прокатки асимметричных рельсовых профилей не рассматривается.

В работе [255] приведено описание современных прокатных станов, применяемых в мире на крупных металлургических заводах. Особое внимание уделяется станам с группой тандем, которые в настоящее время являются самыми перспективными для производства рельсовых профилей. В работе приведена принципиальная схема прокатки железнодорожных рельсов с применением чистовой непрерывной реверсивной группы клетей стана тандем. Однако в работе не проведено планирование эксперимента и не даны рекомендации, по которым возможно определять эффективные режимы деформации сложных асимметричных рельсовых профилей.

Имеется ряд обзорных работ по прокатке железнодорожных рельсов с применением станов с группой тандем в России и за рубежом [10, 17, 19, 256 – 258]. Экспериментально-теоретическое исследование прокатки рельсов в четырехвалковой клетке выполнено в работе [259] на лабораторном прокатном стане. В данной статье описаны преимущества предчистовых и чистовых четырехвалковых калибров относительно аналогичных двухвалковых калибров. Авторы отмечают, что у рельсового профиля из-за его несимметричности, в отличие от двутавровой балки, разное обжатие по головке и подошве приведет к искривлению полосы на головку при выходе полосы из калибра. Авторы предлагают выбрать эффективное обжатие таким образом, чтобы вытяжки по элементам профиля были одинаковы для возможности выхода полосы из калибра без искривления. Также для улучшения условий захвата полосы рельсового профиля в четырехвалковых калибрах и исключения первоочередного соприкосновения полосы с неприводными вертикальными валками, предлагается два варианта решения обозначенной проблемы – это вертикальные валки уменьшенного диаметра или смещение осей вертикальных валков по направлению хода прокатки. В работе также приведен расчет крутящего момента

прокатки. При достаточно большом практическом значении данной работы и выявлении особенностей прокатки рельсового профиля в работе не проводилось планирование эксперимента с целью определения значимых факторов, влияющих на силу и моменты прокатки.

Известна научно-исследовательская работа [260] по изучению технологии прокатки симметричного рельсового профиля с помощью методики планирования многофакторного эксперимента по исследованию приращения и утяжки фланцев при прокатке рельсов в четырехвалковых калибрах. В данной работе, с учетом безразмерных величин, определяющих форму калибра [261], и применяя методику планирования эксперимента в виде латинского квадрата [262], для полного факторного эксперимента при изменении факторов на трех уровнях с применением численного моделирования, с использованием программы Deform-3D проводили процесс моделирования, по итогам которого получили уравнения по определению коэффициента приращения-утяжки подошвы и головки рельсового профиля. Моделирование выполнено на примере симметричного профиля – железнодорожных рельсов. В работе не рассматривается вопрос планирование эксперимента для асимметричных сложных фланцевых профилей, к которым относится трамвайный рельс.

В статье [107] приведены результаты исследования, по итогам которого разработана математическая модель формоизменения широкополочных двутавров при прокатке в универсальном балочном калибре. Разработанная математическая модель позволяет оценить влияние геометрических параметров на приращение или утяжку фланцев прокатываемого профиля. В работе не приведены рекомендации для оценки коэффициентов приращения-утяжки фланцев при прокатке трамвайного рельса.

С помощью методики планирования эксперимента выполнена работа [106] по исследованию закономерностей течения металла и силовых воздействий при прокатке двутавров в четырехвалковых калибрах. Основные геометрические параметры двутаврового профиля приведены к относительным безразмерным величинам, которые изменяли на трех уровнях. В процессе исследования

применялся вариационный метод, по результатам которого получены уравнения по расчету формоизменения металла и энергосиловых параметров при прокатке двутавра в четырехвалковом калибре. Однако в работе не приведены рекомендации по прокатке асимметричных рельсовых профилей на станах с группой тандем.

Для решения подобного рода задач целесообразно использовать методы планирования экспериментов [263 – 265], которые позволяют использовать математико-статистические методы при постановке задачи, затем при проведении экспериментальных исследований и при обработке полученных данных, позволяя при этом существенно сократить сроки и затраты на проведение исследований при высоком качестве полученных результатов [266 – 269]. Процесс планирования эксперимента имеет вход – независимые переменные, факторы ($x_1, x_2, x_3 \dots, x_k$) и выход – зависимые переменные, отклики, параметры оптимизации ($\eta_1, \eta_2, \eta_3 \dots, \eta_q$) [270].

Многофакторные эксперименты имеют очевидное преимущество перед однофакторными экспериментами и дают более точные результаты [270, 271]. Планирование и обработка результатов многофакторных экспериментов в настоящее время достаточно широко описаны в литературе, а подходы в обработке данных на основе критериев математической статистики подтверждают их адекватность [270, 271].

В обработке металлов давлением методы планирования экспериментов позволяют изучить общие закономерности влияния различных значимых факторов на формирование требуемого профиля в процессе прокатки. На основании результатов проведенных исследований по методам планирования экспериментов применительно к прокатке трамвайных рельсов результаты исследования позволят разработать и построить математические модели, которые в своем составе объединят значимые факторы, влияющие на требуемую геометрию готового профиля [270, 271].

В многочисленных работах по исследованию деформаций установлено, что при прокатке рельсов в четырехвалковых калибрах по ширине прокатываемой полосы происходит неравномерное изменение ее высоты. На контакте с вертикальными валками получается приращение фланцев, а в месте контакта их с боковой поверхностью горизонтальных валков образуется утяжка. При этом контур свободной поверхности фланцев получается криволинейным и характеризуется переменным по ширине фланцев коэффициентом приращения-утяжки подошвы и головки профиля [99, 260, 272].

Применение метода планирования многофакторного эксперимента для асимметричных рельсовых профилей, в том числе и для трамвайных рельсов, при прокатке в четырехвалковых калибрах, ранее никогда не проводилось.

1.7 Зависимость точности расчета силы прокатки от точности расчета контактной поверхности металла с валками при прокатке сложных асимметричных рельсовых профилей

Вопросу точности расчета силы прокатки посвящено значительное количество научных трудов [172, 259, 273 – 288 и др.], однако с увеличением сложности профиля поперечного сечения прокатываемой полосы точность расчетов снижается. Это обусловлено, в том числе, расчетом проекции контактной поверхности металла с валками, которую невозможно точно рассчитать, применяя известные методы.

Одним из современных значимых научных трудов по калибровке простых и фасонных профилей, разработанных на основе применения теории пластичности и статистических методов с применением ЭВМ, является работа российских ученых Смирнова В.К., Шилова В.А., Инатовича Ю.В. [165]. В работе подробно рассмотрены вопросы основных положений калибровки прокатных валков, калибровки валков блюминга, калибровки валков для прокатки простых сортовых и фасонных профилей, а также профилей специального назначения. В главе, посвященной калибровке валков для прокатки фасонных профилей отраслевого и

специального назначения, приводится описание существующих типов рельсов, в том числе и трамвайных рельсов. Авторами работы отмечается, что способы прокатки и калибровки различных рельсов различных типов базируются на общих принципиальных положениях, однако каждый из них имеет свои особенности. В работе рассмотрены вопросы калибровки валков на примере наиболее распространенного профиля – железнодорожного рельса широкой колеи.

В работе [165] авторы производят динамический расчет режима прокатки и рассчитывают силу прокатки, которая определяется произведением контактного давления на контактную площадь очага деформации. При этом контактную площадь очага деформации при прокатке железнодорожного рельса в универсальной клетки для горизонтальных валков находили в соответствии с формулой $F_k = \frac{B_{0c} - B_{1c}}{2} l$ [165]. Стоит отметить, что проекция площади контактной поверхности металла с валком при прокатке сложных профилей в рельсовом калибре дает значительные расхождения, которые, в свою очередь, влияют на точность расчета силы и моментов прокатки.

На практике при разработке промышленных технологий горячей прокатки производят расчеты силы прокатки по формуле $P = p_{cp} F_k$ [172]. Конечно, силу прокатки можно получить непосредственно в Deform-3D, но временные затраты сопоставимы с проведением лабораторных исследований.

В работе [172] представлен раздел по определению контактной площади прокатываемого металла с валками, где дается обзор имеющихся методов определения контактной площади – это графический, аналитический и графоаналитический. Определение контактной площади для простых профилей: ромб, овал, квадрат, круг – по графическому или аналитическому способу не представляет сложности. Для определения площади контакта для симметричных рельсовых профилей в настоящее время используют графоаналитический метод, метод соответственной полосы или метод статистических моментов, но, как установлено, расчеты по данным методам показали, что расхождение опытных и расчетных значений для фасонных профилей не превышает 10% [172],

следовательно, можно сделать вывод, что для более сложных асимметричных профилей, к которым относятся трамвайные рельсы, данное расхождение будет больше.

В работе [289] приведены недостатки каждого метода, при этом отмечается, что погрешность в зависимости от метода составляет 5 – 18%.

В разделе, посвященном способам прокатки железнодорожных рельсов, авторы работы [165] отмечают особенности распределения сил в горизонтальной плоскости при прокатке симметричного профиля для железнодорожного рельса, которые связаны с возникновением осевых усилий на горизонтальные валки. Авторы отмечают, что различие сил прокатки в горизонтальной плоскости вызваны тем, что проекции фланцев подошвы и головки на вертикальную плоскость неодинаковы, поэтому силы $P_1 > P_2$, а $P_3 > P_4$, вследствие чего возникают результирующие осевые силы $\Delta P_{12} = P_1 - P_2$ и $\Delta P_{34} = P_3 - P_4$. Эти силы сдвигают нижний и верхний валок в противоположные направления, что приводит к необходимости применения опорных конусов с уклоном 10 – 20% для предотвращения осевого смещения валков друг относительно друга (рисунок 1.7). В работе отмечено, что по мере износа опорных конусов ослабевает осевое крепление валков, появляется смещение валков в горизонтальной плоскости, что влияет на изменение толщины фланцев подошвы и головки, что, в конечном счете, приводит к браку профиля и необходимости замены и перевалки валков.

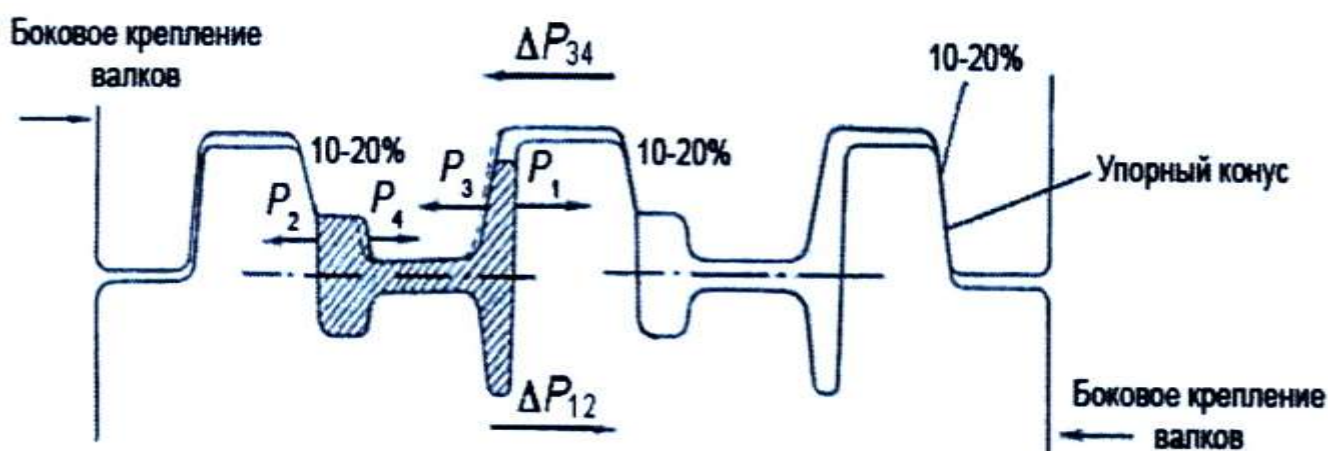


Рисунок 1.7 – Расположение рельсового калибра на валках и схема возникновения осевых сил [165]

Авторы работы [165] описали проблему несбалансированного распределения сил прокатки в горизонтальной плоскости при прокатке симметричных рельсовых профилей. Очевидно, что профиль поперечного сечения трамвайного рельса является более сложным по сравнению с профилем поперечного сечения железнодорожного рельса, который подробно рассмотрен в данной работе, однако не рассматривается вопрос по распределению сил прокатки в горизонтальной плоскости для асимметричных рельсовых профилей и, в частности, для трамвайных рельсов.

В работе [165] приведены известные способы прокатки железнодорожных рельсов, которые себя хорошо зарекомендовали в производственном процессе. Их предлагается разделить на три группы: прокатка в прямых рельсовых калибрах, прокатка в наклонных рельсовых калибрах и прокатка с применением универсальных калибров. Подробно рассмотрены особенности калибровки по каждому из способов прокатки, а также указаны имеющиеся недостатки. Вопросы по асимметричным рельсам не рассматриваются.

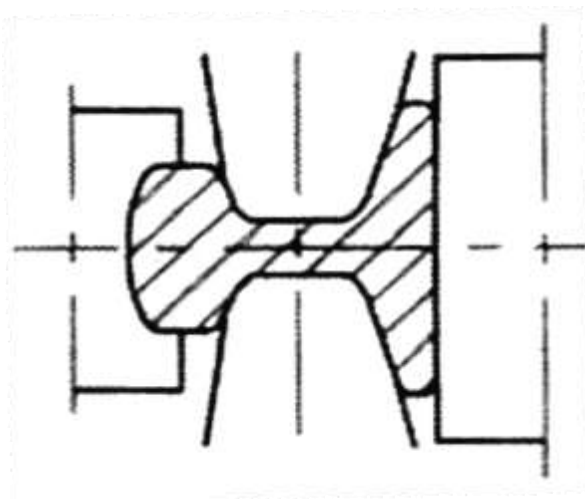


Рисунок 1.8 – Универсальный четырехвалковый калибр [165]

В работе [165] подробно рассмотрен способ прокатки железнодорожных рельсов с применением четырехвалковых калибров (рисунок 1.8). Описана основная особенность при прокатке рельсов в четырехвалковых калибрах, которая состоит в том, что шейка рельса обжимается приводными

горизонтальными валками, а головка и подошва получают прямое обжатие между неприводными вертикальными валками и боковыми гранями горизонтальных валков. Авторы отмечают основные преимущества четырехвалковых калибров, заключающиеся в том, что неприводные вертикальные валки при прокатке вращаются за счет трения о раскат, поэтому их окружная скорость примерно равна скорости прокатки рельса,

что, в свою очередь, уменьшает скольжение металла относительно валков по сравнению с закрытыми рельсовыми калибрами, снижает износ вертикальных валков и способствует улучшению качества поверхности рельса.

Авторы работы [165] описывают необходимость применения в непрерывной группе тандем – вспомогательной двухвалковой клетки для контроля ширины фланцев после прокатки в универсальной клетке (рисунок 1.9). Отмечено, что универсальная и вспомогательная двухвалковая клетка установлены в непосредственной близости друг от друга и работают в непрерывном режиме, а также дается описание основных технологических особенностей такой прокатки.

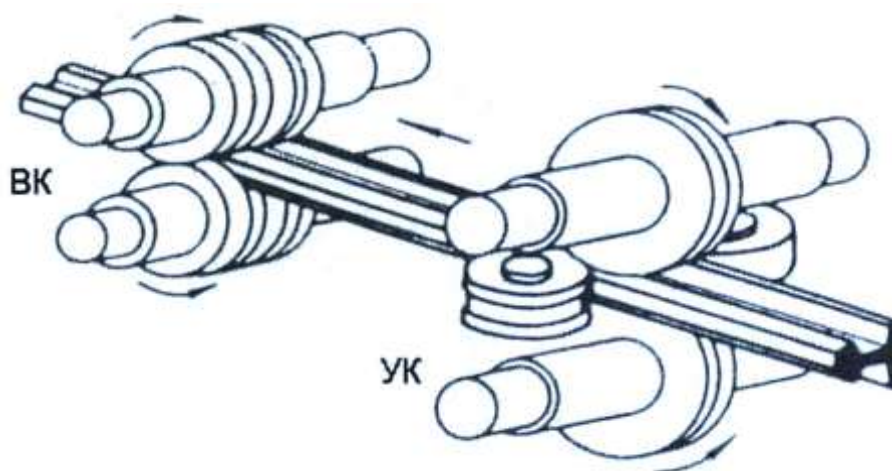


Рисунок 1.9 – Схема одновременной обработки профиля рельса в универсальной (УК) и вспомогательной (ВК) клетки [165]

Описанная авторами в работе [165] технология прокатки с применением непрерывной группы тандем получила интенсивное развитие за рубежом с 1964 г. и является основным современным направлением в развитии технологии производства рельсовых профилей на рельсопрокатных станах с группой тандем. Приводятся возможные варианты по расположению клеток, калибровок валков и схем прокатки с применением непрерывных групп тандем для железнодорожных рельсов. Однако в работе отсутствуют данные по компьютерному моделированию с применением методов планирования многофакторных экспериментов для возможности исследования энергосиловых параметров при прокатке асимметричных рельсовых профилей.

Как отмечалось ранее, одним из самых современных объемных трудов по теории прокатки является работа [211]. Она базируется на принципах и основах, разработанных Целиковым А.И., в котором рассмотрены вопросы теории и практики прокатки с учетом современных требований к точности проката и конструктивным особенностям прокатных станов. В данной работе отмечается, что вопросу нахождения двух величин, по которым можно определить силу прокатки – это среднее значение нормального контактного напряжения в очаге деформации (p_{cp}) и площади контакта полосы с валками ($F_{конт}$) – посвящено много научных трудов [69, 172, 181, 274, 289 – 294]. Авторы отмечают, что при расчете теоретических значений силы прокатки и фактически замеренных данных имеются значительные отклонения.

Вопросу расчета площади контакта металла с валком посвящена работа [211], где авторы отмечают, что точно определить площадь контакта металла с валками крайне сложно, а для расчетов используют упрощения и допущения, которые, тем не менее, снижают точность расчета силы прокатки. Приводятся формулы по расчету $F_{конт}$ для полосы прямоугольного сечения с учетом уширения. Однако приводимые данные выполнены на примере прокатки широких и тонких листов, при этом данные по прокатке в четырехвалковых калибрах не приводятся.

В работе [211] представлены данные по расчету площади контакта металла с валками при прокатке в калибрах сортового или фасонного металла, при этом в данном разделе приведены материалы из работы Никитина Г.С. [290]. Отмечено, что поверхность контакта металла с валком при прокатке в калибрах имеет сложную форму, которая зависит от геометрии прокатываемого профиля. При этом указано, что точно определить площадь контакта металла с валками для сортовых или фасонных профилей аналитическими методами вычислить крайне сложно, поэтому данную задачу решают приближенными инженерными методами: графическим (с помощью приемов начертательной геометрии); графоаналитическим или аналитическим. Также приводятся формулы Дрозда В.Г.

для расчета контактной площади при прокатке сортовых профилей, таких как квадрат, овал и ромб.

Для определения площади контактной поверхности при прокатке профилей сложной формы в работе [211], таких как уголок, балка, швеллер и т.д., предлагается использовать метод приведенной полосы. Других данных для сложных фасонных или рельсовых профилей не приводится.

В статье [288] приведены данные научно-исследовательской работы силовых воздействий при прокатке железнодорожных рельсов в четырехвалковых калибрах стана с группой тандем. Авторы отмечают, что для разработки технологических режимов прокатки рельсовых профилей в четырехвалковых калибрах требуется определить силу, действующую на горизонтальные и вертикальные валки. Отмечается, что для расчета данных сил рельсовый профиль приводился к соответствующей прямоугольной полосе [165], что не позволяло учесть действительную форму очага деформации сложного рельсового профиля и, соответственно, рассчитать реальные силы, действующие при прокатке в четырехвалковых калибрах. Для возможности повысить точность расчета площади контактной поверхности металла с валками и силы прокатки для железнодорожных рельсов, авторами статьи предложен метод решения упрощенных дифференциальных уравнений равновесия совместно с уравнением пластичности. В работе приводятся сравнительные данные результатов расчета силы прокатки для вертикальных и горизонтальных валков по предложенному авторами методу в сравнении с расчетными значениями, полученными по методу соответствующей полосы. Однако в работе не приводятся сравнительные данные сил прокатки, рассчитанных по предложенному авторами методу и результатов натурных исследований, что не позволяет полноценно оценить предложенный метод. Также в данной работе отсутствуют рекомендации, каким образом требуется скорректировать предложенный метод для расчета площади контактной поверхности при прокатке сложных асимметричных рельсовых профилей в четырехвалковых калибрах.

Имеется ряд современных работ по исследованию энергосиловых параметров прокатки и напряженно-деформированного состояния металла при прокатке [295, 296], однако работы выполнены на примере сортовых профилей и не рассматривают сложные рельсовые профили.

Экспериментальные исследования силового воздействия на вертикальные валки прокатного стана выполнены в работе [297]. В работе приводятся данные по оценке силовой загрузки подшипников вертикальных валков универсальных клетей при прокатке различных профилированных двутавровых балок. Оценку силы прокатки проводили с помощью месдоз. В работе отсутствуют данные по силам, возникающим при прокатке асимметричных рельсовых профилей.

Известны научно-исследовательские работы [298, 299] в которых разработан новый теоретический метод расчета контактных давлений и сил, действующих на горизонтальные и вертикальные валки при прокатке двутавровых профилей в универсальном балочном калибре. Метод основан на использовании физических уравнений связи напряженного и деформированного состояния металла в очаге деформации. Результаты разработанного метода подтверждены экспериментальными исследованиями. Однако в работе не приведены рекомендации по расчету сил, возникающих при прокатке асимметричных рельсовых профилей в четырехвалковых калибрах.

Имеется методика определения силы прокатки по мощности главного двигателя [300] при холодной и горячей прокатке полос, однако не приведены рекомендации для прокатки асимметричных рельсовых профилей.

Ученые ВНИИМЕТМАШ им. Целикова А.И. в работе [301] описывают проблемы точности расчетов силовых воздействий при горячей продольной прокатке. В данной работе авторы большое внимание уделили достоверному значению сопротивления стали пластической деформации с учетом температуры, степени и скорости деформации. Авторы в выводах отмечают, что проведение исследований энергосиловых параметров на новых промышленных станах является актуальным вопросом.

При прокатке в четырехвалковых рельсовых калибрах со стороны вертикальных валков, формирующих подошву и головку профиля, действуют различные силы прокатки, что приводит к осевому смещению горизонтальных валков [60]. Это неблагоприятно влияет на стабильность прокатываемого профиля трамвайного рельса с точки зрения позиционирования горизонтальных валков, сопровождающегося дополнительными настройками калибра, и на эффективность использования мощности привода клетки, которая расходуется на деформацию опорных узлов горизонтальных валков в направлении, соответствующем большему деформирующему усилию [61].

В изобретении [302] авторы предлагают четырехвалковый калибр для прокатки трамвайных рельсов (рисунок 1.10). С целью минимизации осевых сил, действующих на горизонтальный валок со стороны разрезки головки профиля, предлагается врезать калибр наклонно, однако данное предложение не позволяет уравновесить калибр по силам прокатки в горизонтальной плоскости.

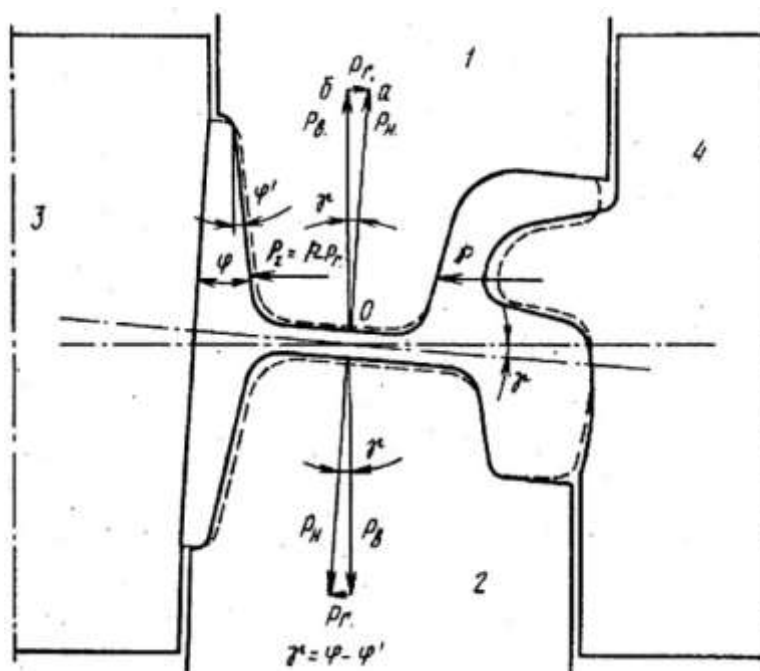


Рисунок 1.10 – Четырехвалковый калибр для прокатки трамвайных рельсов [302]

Для прочностных расчетов оборудования главной линии прокатного стана необходимо знать силу, которая действует на валки рабочей клетки при прокатке металла [211, 274, 275, 298, 300, 301, 303 – 306]. Как было отмечено ранее, при

практических расчетах величины силы прокатки ее находят как произведение среднего контактного нормального напряжения (удельного усилия) на площадь соприкосновения металла с валком: $P = p_{cp} F_k$, где F_k – проекция площади соприкосновения металла с валком, называемая также контактной площадью, на плоскость нормальную к направлению силы P ; p_{cp} – среднее контактное нормальное напряжение.

Таким образом, определение силы прокатки сводится к решению двух основных задач:

– вычисление площади соприкосновения прокатываемого металла с валками, а именно, проекции этой площади на плоскость, нормальную к направлению силы P ;

– определение среднего удельного усилия на валки.

При прокатке профилей прямоугольного сечения контактную площадь можно подсчитать по уравнению: $F_k = l_d B_{cp}$, где l_d – длина дуги захвата, мм; B_{cp} – средняя ширина прокатываемого металла, мм.

В большинстве случаев можно принять, что: $B_{cp} = (B_0 + B_1)/2$, или точнее, $B_{cp} = (2/3)(B_0 + B_1)$, где B_0 и B_1 – ширина полосы до и после прокатки, мм.

При графическом способе вычерчивают калибр с прокатываемым металлом в трех проекциях и определяют площадь соприкосновения. Аналитически, по методу «приведенной полосы», абсолютное обжатие принимают равным линейному обжатию по ширине профиля: $\Delta h = S_0 B_0 - S_1 B_1$, где S_0 и S_1 – площадь сечения профиля до и после прокатки, мм².

Катающий радиус и длину дуги захвата определяем по выражениям:

$$R = 0,5(D - S_1/B_1) \text{ и } l_d = \sqrt{R \cdot \Delta h}.$$

В литературе имеются данные для определения контактной площади при прокатке металла в калибрах простой формы (круг, овал, квадрат и др.). Однако определение контактной площади в калибрах сложной формы, к которым относятся разрезные, рельсовые, предчистовые и чистовые калибры для прокатки асимметричных рельсов, вызывает затруднение.

Современные системы твердотельного моделирования позволяют с высокой точностью определить геометрические контактные поверхности раската с элементами калибра прокатного вала. Точное понимание геометрии очага деформации и физических объемов смещаемого металла в очаге деформации позволяют разрабатывать ресурсосберегающие калибровки, учитывающие эффективные деформации элементов асимметричных рельсовых профилей.

Качество готового профиля во многом предопределяется системой черновых рельсовых калибров, от конфигурации которых зависит эффективность деформаций по элементам профиля в чистовых проходах. Особенностью калибровки рельсовых профилей является взаимосвязь первого разрезного калибра и предчистового рельсового калибра, которые являются определяющими в получении требуемой геометрии готового профиля. Конструкция первого разрезного калибра определяет последующую схему деформаций для формирования фланцев профиля.

1.8 Скоростные режимы и нагрузочные диаграммы при прокатке

Исследование скоростных режимов, сил и моментов, возникающих при прокатке, имеют большое значение для возможности разработки эффективных технологий в соответствии с имеющимся оборудованием [38, 102, 295]. Большое количество промышленных экспериментов по замерам энергосиловых параметров прокатки в нашей стране проводилось в 1950 – 1960 гг. Данные исследования впервые в нашей стране начал проводить коллектив ученых под руководством Рокотяна Е.С. [307 – 309], Чекмаревым А.П., Клименко В.М., Грудевым А.П. [249], Гореликом В.С., Выдриным В.Н. и другими учеными впоследствии эти исследования более углубленно продолжались [310 – 312]. Преимущественно эти исследования выполнены на блюмингах, обжимных, листовых и сортовых станах. Скоростные режимы, применяемые при прокатке сложных асимметричных рельсовых профилей на прокатных станах с группой тандем, изучены недостаточно.

В работе [165] приводится методика расчета скоростного режима прокатки железнодорожных рельсов в непрерывно-реверсивной группе, состоящей их трех клеток, две из них универсальные, а между ними установлена двухвалковая вспомогательная клетка, данная группа клеток называется станом тандем. Расчет скоростного режима выполнен по методике Тягунова В.А. [313, 316]. По итогам проведенного расчета авторами работы разработана диаграмма скоростного режима работы непрерывной реверсивной группы клеток (рисунок 1.11). Аналогичный подход в выборе схемы изменения частоты вращения валков при прокатке рельсов в непрерывной реверсивной группе тандем приведен в работе [44].

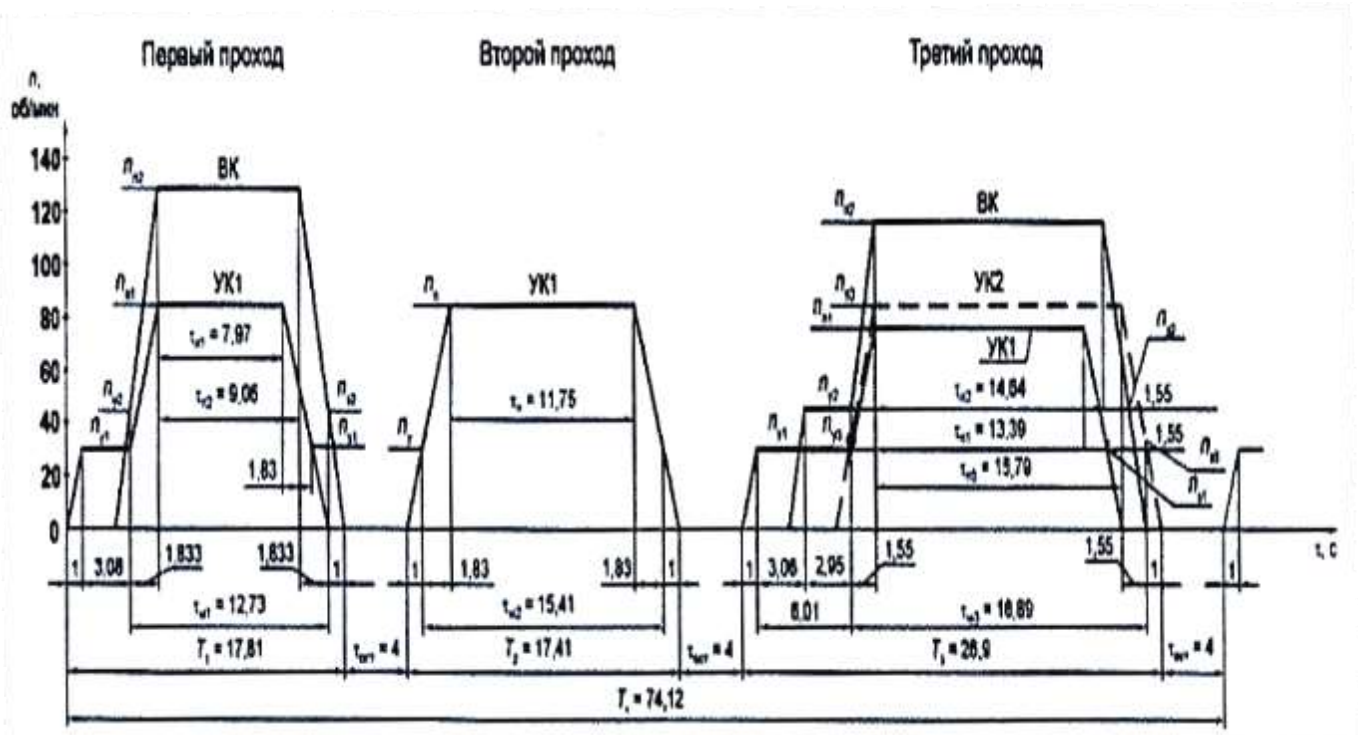


Рисунок 1.11 – Скоростной режим прокатки в непрерывной группе клеток рельсобалочного стана [165]

В работе [211] вопросу расчета крутящего момента двигателя главного привода клетки посвящено достаточно много информации. Акцентируется внимание на том, что расчет момента двигателя главного привода клетки является одним из основных параметров при расчете энергосиловых параметров прокатки.

Приводятся формулы для расчета простого процесса прокатки, а также даны рекомендации по расчету момента и мощности главного привода двухвалковых клетей при параметрах технологического режима, не соответствующего простому процессу прокатки. Приведены формулы по расчету параметров момента прокатки, в котором процесс происходит с переменной скоростью. Акцентируется внимание на том, что на реверсивных станах при разгоне и торможении, а также при переменной скорости прокатки, действует динамический момент валков, который определяется как сумма момента сопротивления вращению валков, возникающего от силы инерции ускоряемой полосы ($M_{ин.п}$) и момента сопротивления вращению ускоряемого валка и других элементов линии главного привода, возникающего от моментов их инерции ($M_{ин.в}$). Также в работе приводятся данные для расчета энергосиловых параметров прокатки для многовалковых листовых станов, однако в работе не приведены рекомендации, каким образом можно исключить влияние динамического момента прокатных валков при захвате полосы.

В статьях [39, 285] приведены данные по совершенствованию режима прокатки железнодорожных рельсов в обжимных клетях рельсобалочного стана. Приводится усовершенствованная калибровка для второй обжимной клетки и изменение крутящего момента на валу двигателя, а также удельного расхода электроэнергии. Однако в работе не приведены данные по нагрузочным диаграммам для четырехвалковых калибров при прокатке асимметричных рельсов.

В работе [314] приведены особенности взаимодействия клетей в переходных режимах непрерывной прокатки стана с группой тандем с учетом крутильных колебаний в линиях главного привода валков, но не приводятся нагрузочные диаграммы при прокатке фланцевых профилей.

В работе [315] приведена разработанная авторами компьютерная программа расчета температурно-скоростных и энергосиловых параметров прокатки на блюмингах-слябингах, заготовочных, мелко-, средне-, крупносортовых,

рельсобалочных и универсально-балочных, а также полосовых и листовых станах с любым составом и расположением оборудования. Авторы статьи отмечают, что разработанная программа позволяет рассчитать коэффициент вытяжки в каждом проходе, скорость вращения валков, силу и моменты прокатки, а также другие необходимые параметры. Из материала статьи непонятно, каким образом, определяя коэффициент вытяжки, определяется и рассчитывается тип и форма калибра, которая, как известно, является одним из ключевых факторов в получении требуемой геометрии профиля, а также отсутствуют рекомендации по скоростным режимам для непрерывной реверсивной группы тандем.

Одной из важнейших составляющих эффективного использования резервных технических характеристик прокатного стана является применение эффективных скоростных возможностей главного привода [44, 313, 316 – 318].

В литературе имеются методики определения скоростных режимов прокатки в одноклетевых станах, а также реверсивных станах, имеющих непрерывно связанные клетки [44, 313, 316 – 318]. Однако в связи с тем, что прокатные станы с группой тандем имеют значительно лучшие технические характеристики, чем прокатные станы «дуо», необходимо разработать уточнения по выбору скоростных режимов прокатки на стане с группой тандем сложных асимметричных рельсовых профилей.

Для расчета мощности двигателя и деталей для каждой линии прокатного стана необходимо знать изменения крутящего момента по времени, то есть построить нагрузочную диаграмму.

В общем случае момент на валу двигателя можно представить как сумму статического и динамического моментов: $M_{\text{дв}} = M_{\text{ст}} \pm M_{\text{дин}}$.

В свою очередь, статический момент находится по зависимости:

$$M_{\text{ст}} = M_{\text{пр}} + M_{\text{тр}} + M_{\text{хол}},$$

где $M_{\text{пр}}$ – момент прокатки, необходимый для преодоления сопротивления деформации прокатываемого металла и возникающих при этом сил трения между металлом раската и поверхностью калибра;

$M_{тр}$ – момент сил трения в подшипниках валков и в передаточных механизмах без учета момента, требующегося для вращения валков вхолостую;

$M_{хол}$ – момент холостого хода, требующийся для вращения валков во время холостого хода.

Если рассматривать основные составляющие крутящего момента при реверсивной прокатке, то статическая составляющая определяется силой прокатки, трением в подшипниках валков и трением в передаточных механизмах главной линии прокатного стана. Динамическая составляющая определяется силами инерции при разгоне и торможении вращающихся частей стана без металла ($M_{дин. стана}$) и силами инерции при разгоне или торможении вертикальных валков ($M_{дин. верт}$) и прокатываемой полосы ($M_{дин. полосы}$). Поэтому можно записать как:

$$M_{дин} = M_{дин. стана} + M_{дин. верт} + M_{дин. полосы}.$$

В общем случае величину динамического момента можно рассчитать по зависимости: $M_{дин} = \frac{GD^2}{375} \frac{d\omega}{dt}$,

где GD^2 - приведенный маховый момент с учетом массы раската;

$\frac{d\omega}{dt}$ - угловое ускорение (замедление).

Как видно из анализа уравнения $M_{дин}$, режим работы электродвигателя привода прокатного стана изменяется во времени, следовательно, нагрузочную диаграмму необходимо исследовать совместно со скоростной диаграммой.

При реверсивном режиме работы прокатного стана диаграмма скоростей складывается из трех периодов: разгона, установившейся скорости и торможения [316, 317]. Подробный анализ скоростных режимов прокатки в одноклетевых реверсивных станах был сделан Тягуновым В.А. [316] и Выдриным В.Н. [317]. Согласно этим данным, захват металла валками производится на первом участке в период разгона двигателя и прокатных валков. В этом случае $M_{ов} = M_{ст} + M_{дин}$ при этом главная линия прокатного стана испытывает большие статические и динамические нагрузки.

1.9 Способы прокатки рельсовых профилей в четырехвалковых калибрах

Помимо многочисленных трудов, о которых упоминалось ранее в данной главе, известно большое количество научных работ, в которых рассмотрены вопросы прокатки различных профилей в четырехвалковых калибрах [319 – 330 и др.]. Однако в данных источниках приводятся способы прокатки симметричных профилей, т.е. которые имеют одну ось симметрии, что, в свою очередь, позволяет прокатывать данные профили в четырехвалковых калибрах, в которых отсутствуют проблемы, свойственные прокатке сложных асимметричных профилей, так как в этом случае возникают трудности с уравниванием сил прокатки в горизонтальной плоскости.

В технической литературе известно несколько способов прокатки рельсов с применением четырехвалковых калибров в универсальных клетях. Известен способ прокатки рельсов [331] в двухвалковых или универсальных рельсовых калибрах. Недостатком данного способа прокатки является то, что не учитывается распределение сил прокатки в четырехвалковых калибрах в горизонтальном направлении, а калибры не сбалансированы по силам прокатки действующих в горизонтальной плоскости от обжатия вертикальными валками.

Известен также способ прокатки [332], который предусматривает прокатку чернового профиля в двухвалковых или универсальных рельсовых калибрах, прокатку предчистового профиля в двухвалковых или трехвалковых калибрах, а чистового – в двухвалковых, трехвалковых или четырехвалковых калибрах. Недостатком данного способа прокатки рельсов, как и предыдущего, является то, что с целью стабилизации профиля учтены только припуски на шейку и головку в ручьях горизонтальных валков, но не учтено формирование элементов профиля со стороны вертикальных валков и действие сил прокатки в горизонтальной плоскости.

Известен также способ прокатки рельсов, используемый фирмой «Nippon Steel Corporation» (NSC), Япония [333]. При данном способе в качестве предчистового калибра используется трехвалковый калибр с вертикальным валком со стороны

подошвы, а головка рельса формируется в двухвалковом участке калибра с разъемом в средней части поверхности катания рельса. Чистовым калибром служит четырехвалковый универсальный калибр с вертикальными валками со стороны подошвы и головки профиля. При этом боковые поверхности головки рельса деформируются горизонтальными валками, а поверхности катания вертикальным валком. Недостатком данного способа прокатки, как и других способов, приведенных ранее, является отсутствие равенства сил, возникающих от обжатия вертикальными валками по поверхности катания головки профиля и опорной части подошвы рельса. За счет того, что обжимаемые поверхности вертикальными валками со стороны головки и подошвы имеют различные объемы смещаемого металла и соответственно различные силы прокатки, которые, в свою очередь, вызывают дополнительные осевые силы, действующие на горизонтальные валки, создавая неблагоприятные силовые условия в калибре.

Также известен способ прокатки рельсов в четырехвалковых калибрах [334], согласно которому для исключения изгиба прокатываемой полосы вертикальные валки установлены со смещением в противоположные стороны от оси горизонтальных валков. В предлагаемом способе не рассматривается вопрос распределения сил прокатки от обжатия вертикальными валками и не решен вопрос неэффективного распределения сил прокатки в горизонтальной плоскости.

В научной литературе по прокатке в четырехвалковых калибрах отсутствуют рекомендации для прокатки асимметричных рельсовых профилей в четырехвалковых калибрах и непрерывно-реверсивных группах клетей.

В диссертации применялось моделирование с помощью метода конечных элементов через компьютерную реализацию расчетов, а также натурное моделирование, которое, как известно, является подвидом масштабного (M1:1) физического моделирования [269].

Выводы по главе 1

По итогам проведенного обзора литературы, изучения этапов развития и современного состояния теории и практики прокатки асимметричных рельсовых профилей установлено:

1. Трамвайные рельсы имеют самую сложную геометрию поперечного сечения из всех рельсовых профилей, прокатываемых на станах с группой тандем.

2. При прокатке по проектной технологии асимметричных рельсов получены неудовлетворительные результаты: осевая пористость исходной непрерывнолитой заготовки не вырабатывалась в готовом профиле; скоростные режимы не обеспечивали эффективную технологию прокатки; значительное различие сил прокатки от обжатия вертикальными валками в четырехвалковых калибрах вызывало дополнительную неравномерность напряженно-деформированного состояния металла. При прокатке трамвайных рельсов различие сил прокатки между вертикальными валками составляет 30 – 35%, при прокатке остряковых рельсов 20 – 25%.

3. Профиль трамвайного рельса имеет характерные особенности – это глубокий желоб, который отделяет головку от губы; относительно тонкую шейку; подошву с тонкими фланцами; значительную асимметрию профиля как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях. Перечисленные особенности конфигурации трамвайного рельса значительно усложняют получение готового профиля, при этом технология прокатки является более трудоемкой и энергоемкой (расход электроэнергии при прокатке трамвайных рельсов составляет 158 кВт·ч/т железнодорожные рельсы 92 кВт·ч/т), по сравнению с прокаткой симметричных профилей, а исследования процесса прокатки трамвайных рельсов практически отсутствуют. При этом исследования напряженно-деформированного состояния металла и энергосиловых параметров при прокатке трамвайных рельсов на прокатных станах с группой тандем никогда не проводились, а без этих данных сложно разработать энерго- и ресурсосберегающую технологию прокатки.

4. Асимметрия профиля трамвайного рельса в вертикальной и горизонтальной плоскостях вызывает значительные трудности при прокатке в предчистовых и чистовых четырехвалковых калибрах. Асимметрия профиля приводит к большим осевым силам, действующим на горизонтальные валки при прокатке, которые возникают от обжатия вертикальными валками, при этом четырехвалковые калибры становятся неуравновешенными по силам прокатки, действующим в горизонтальной плоскости, что, в свою очередь, вызывает нестабильность профиля по его длине, частые настройки стана и необходимость в значительном усложнении конструкции подушек валков.

5. В результате масштабных реконструкций рельсовых производств на передовых металлургических комбинатах, которые произошли по всему миру, в том числе и в нашей стране, построены универсальные рельсопрокатные станы в состав которых входит группа тандем. В связи с этим технология прокатки рельсовых профилей потребовала углубленного изучения, а в особенности, сложных асимметричных профилей. Это связано с тем, что при прокатке в непрерывной чистовой группе, состоящей из трех клеток, формоизменение металла в четырехвалковых калибрах имеет свои особенности. Прокатные станы с группой тандем дают возможность производить асимметричные профили более высокого качества с минимальными допусками на размеры профиля поперечного сечения, также позволяют освоить прокатку трамвайных рельсов высокого качества в соответствии с требованиями ГОСТ. Однако, до недавнего времени, опыт работы на универсальных рельсопрокатных станах, в состав которого входит непрерывно-реверсивная чистовая группа клеток (группа тандем), полностью отсутствовал не только в России, но и в странах СНГ. Результаты исследований процесса прокатки асимметричных рельсовых профилей на станах с группой тандем в мировой практике, в том числе и по прокатке трамвайных рельсов, изучены недостаточно.

6. Для разработки ресурсосберегающих технологий прокатки асимметричных рельсовых профилей высокого качества необходимы научные данные по распределению значений интенсивности деформаций и интенсивности

напряжений, по уравнениям, описывающим нахождение требуемых размеров фланцев в группе тандем и закономерностям сил прокатки в четырехвалковых калибрах, а эти данные в научной литературе практически полностью отсутствуют. Для возможности прокатки трамвайных рельсов высокого качества требуются данные по механизму трансформации и выработки осевой пористости непрерывнолитой заготовки при прокатке, а данные исследования при прокатке трамвайных рельсов никогда не проводились. В научной литературе отсутствует информация по энергосиловым параметрам прокатки трамвайных рельсов при прокатке в чистовой группе тандем, а из-за сложной геометрии профиля трамвайного рельса, применяя известные методы, невозможно точно рассчитать площадь контактной поверхности при деформации металла валками в четырехвалковых калибрах.

7. Проблема несбалансированности горизонтальных сил, действующих при прокатке асимметричных рельсовых профилей в четырехвалковых калибрах, до настоящего времени полностью не решена. С увеличением сложности профиля поперечного сечения прокатываемой полосы точность расчетов силы прокатки снижается – это обусловлено, в том числе, расчетом проекции контактной поверхности металла с валком, которую невозможно точно рассчитать для сложных профилей применяя известные методы.

8. Для разработки ресурсосберегающей технологии прокатки в чистовой реверсивной группе тандем необходимо определить эффективные скоростные режимы и действующие моменты при прокатке трамвайных рельсов.

9. Внедрение на предприятиях нового оборудования расширяет возможности по созданию новых технологий энерго-, ресурсосбережения и повышения качества рельсов, но для этого необходимы научные знания о напряженно-деформированном состоянии металла и энергосиловым параметрам прокатки асимметричных рельсовых профилей прокатываемых на станах с группой тандем.

Научные проблемы, цель и задачи исследования

По технологии прокатки асимметричных рельсовых профилей, ввиду их сложной геометрии профиля поперечного сечения, недостаточно изучены вопросы напряженно-деформированного состояния металла и энергосиловых параметров прокатки. В связи с этим была поставлена цель диссертации: развитие теоретических основ, разработка и внедрение энерго- и ресурсосберегающей технологии прокатки асимметричных рельсовых профилей на станах с группой тандем.

Исходя из цели работы, определены научные проблемы, требующие решения:

- отсутствуют методики моделирования методом конечных элементов процесса прокатки асимметричных рельсовых профилей. Отсутствуют данные по распределению значений интенсивности деформаций и интенсивности напряжений в черновых двухвалковых, предчистовых и чистовых четырехвалковых калибрах при прокатке трамвайных рельсов на стане с группой тандем;
- отсутствуют данные о формоизменении осевой пористости и ее выработке в зависимости от конфигурации и последовательности обжатия металла в черновых двухвалковых калибрах при прокатке трамвайных рельсов;
- отсутствуют уравнения регрессии для нахождения требуемых размеров фланцев подошвы и головки профиля при прокатке трамвайных рельсов в четырехвалковых калибрах;
- отсутствуют методы определения смещаемых объемов металла и проекций контактных площадей металла с валками в геометрическом очаге деформации при прокатке сложных асимметричных профилей с применением системы трехмерного твердотельного моделирования для всех прокатываемых асимметричных профилей в двух-, трех- и четырехвалковых калибрах;
- не установлено эффективное соотношение смещаемых объемов металла в очаге деформации при прокатке трамвайных рельсов, позволяющее

обеспечить равенство сил прокатки, действующих от обжатия вертикальными валками в четырехвалковых калибрах. Отсутствуют математические зависимости, описывающие данные соотношения;

- не разработан энерго- и ресурсосберегающий способ прокатки асимметричных рельсовых профилей в четырехвалковых калибрах, основанный на равенстве сил прокатки, действующих в горизонтальной плоскости с учетом смещаемых объемов металла в очаге деформации;
- не разработаны эффективные скоростные режимы для прокатки асимметричных рельсовых профилей в чистовой непрерывной реверсивной группе клетей, обеспечивающие эффективное использование энергетических ресурсов прокатного стана с группой тандем учитывающая нагрузочные диаграммы.

Для решения научных проблем определены следующие задачи диссертации:

1. Разработать теоретические основы прокатки асимметричных рельсовых профилей на станах с группой тандем в предчистовых и чистовых четырехвалковых калибрах уравновешенных по силам прокатки в горизонтальной плоскости.
2. Исследовать с применением моделирования методом конечных элементов и натурных исследований напряженно-деформированное состояние металла и энергосиловые параметры прокатки позволяющие установить зависимости, закономерности выработки осевой пористости непрерывнолитой заготовки и влияние величины обжатия на изменение размеров фланцев профиля в четырехвалковых калибрах.
3. Разработать метод определения контактной поверхности металла с прокатными валками в геометрическом очаге деформации для двух-, трех- и четырехвалковых калибров, применение которого позволяет с высокой точностью определить смещаемые объемы металла и площади проекций контактной поверхности металла с валком, что повысит точность расчета силы прокатки.

4. Разработать научно обоснованный способ и технологические решения, позволяющие реализовать энергоэффективную прокатку асимметричных рельсовых профилей в четырехвалковых калибрах группы тандем.

5. Разработать и провести промышленное освоение эффективных скоростных режимов прокатки трамвайных рельсов в непрерывной реверсивной группе клетей с учетом действующих крутящих моментов.

6. Разработать, освоить и внедрить в условиях АО «ЕВРАЗ ЗСМК» новую энерго- и ресурсосберегающую технологию прокатки асимметричных рельсовых профилей на стане с группой тандем.

2 РАЗРАБОТКА И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ АСИММЕТРИЧНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ПРОФИЛЕЙ НА СТАНАХ С ГРУППОЙ ТАНДЕМ ПРИМЕНЯЯ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

2.1 Моделирование методом конечных элементов процесса прокатки трамвайных рельсов

Проведено моделирование методом конечных элементов с применением специализированного программного комплекса Deform-3D (использовался лицензионный программный продукт – лицензионный договор Deform-3D №TES-06/2016-AS от 23.03.2016г.) для исследования напряженно-деформированного состояния металла, которое позволило оценить влияние формы калибра на характер течения металла, неравномерность деформации при формоизменении металла, заполнение металлом элементов калибра при формировании требуемого профиля и распределение возможных несплошностей структуры металла в готовом профиле, а также изучить возникающие силы и моменты прокатки.

Применение программного комплекса Deform-3D позволило значительно сократить материальные затраты на натурные исследования и при этом получить большое количество данных, которые были соотнесены с результатами промышленных экспериментов.

Исходными данными при проведении моделирования являются геометрические размеры заготовки и готового профиля, допуски на размеры, его масса, марка стали прокатываемого металла, температурно-скоростные условия прокатки, геометрические размеры валков и конфигурация калибров, сопротивление деформации и пластические свойства материала заготовки, скорость деформации и коэффициент трения на границе металла с валками. Для возможности проведения моделирования созданы трехмерные модели валков, привалковой

арматуры и заготовки, которые имеют конфигурацию реальных. Это сделано в программном комплексе трехмерного твердотельного моделирования Компас-3D. Все отдельные трехмерные детали выполнены в масштабе М 1:1 к натуральным, которые сориентированы друг относительно друга в положениях, моделирующих реальную ситуацию технологического процесса, а трамвайные рельсы имеют геометрические размеры равные натуральным в готовых трамвайных рельсах. Таким образом, разработана 3-D модель универсального прокатного стана (рисунок 2.1). Затем данный виртуальный прокатный стан экспортирован в программу Deform-3D, в которой проводилось моделирование методом конечных элементов процесса прокатки трамвайных рельсов. По итогам проведенного анализа полученных результатов исследований разработаны математические модели, представленные в графическом и аналитическом виде.

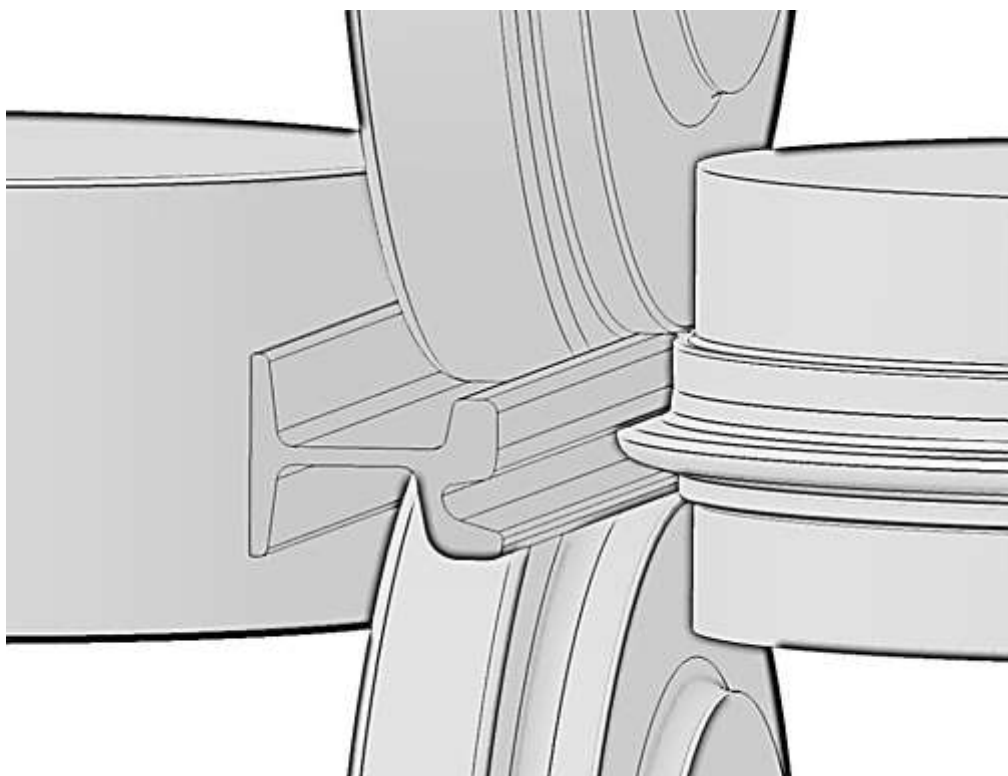


Рисунок 2.1 – 3-D модель чистового калибра

При проведении компьютерного моделирования приняты следующие допущения: рассматриваемый процесс – изотермический; валки абсолютно жесткие и несжимаемые; материал раската – однородный, изотропный [210];

деформируемая среда – вязкопластическая; трение по закону Зибеля [335, 336], коэффициент трения – постоянный, равный 0,5.

В процессе моделирования деформации металла происходит теплообмен заготовки с валками и окружающей средой, учитывается тепловой эффект от проходящей деформации металла в калибре. При моделировании учтено сопротивление деформации для рельсовой стали [337].

Компьютерное моделирование проводилось с применением анализа Лагранжа, который применяется для всех процессов ОМД, при моделировании свободнойковки, прокатки, механической обработки, выдавливании, волочении, штамповке, а также в процессах термической обработки и моделировании фазовых превращений в материале [242]. В работе [242] указаны примеры, в которых применяется расчет с помощью анализа Лагранжа, при этом величины деформаций составляют более 50%. Точность расчета процессов ОМД с применением анализа Лагранжа зависит от размеров и количества элементов, на которые разбивается анализируемая модель. Для корректности расчета использовался критерий переразбиения сетки конечных элементов, установленный в Deform-3D, отвечающий за то, что сетка из конечных элементов будет переразбиваться при решении задачи. Автоматическое переразбиение сетки – универсальный механизм управления сеткой конечных элементов объекта, подвергающегося большим пластическим деформациям [242].

2.1.1 Исследование деформированного состояния металла

При проведении компьютерного моделирования учтены реальные данные. В клетях UR и UF калибры четырехвалковые, которые состоят из двух горизонтальных приводных валков диаметром $\varnothing 1200$ мм и двух вертикальных не приводных валка, диаметром $\varnothing 800$ мм. В клетях VD диаметр валков $\varnothing 1350$ мм. Температура прокатки – 1000 °С. Материал валков – сталь 150ХНМ, твердость поверхности валка 52–58 HRC. Прокатка осуществляется при максимальной

скорости 3,5 м/с. Образование желоба осуществляется за три прохода в четырех калибрах, которые распределены по клетям UR и UF.

Для анализа деформированного состояния металла при прокатке с помощью программного комплекса Deform-3D получены главные деформации (Prinzipial Strain), интенсивность деформаций (Effective Strain), которые рассчитываются по общепринятым формулам теории прокатки и обработки металлов давлением [172, 289].

При пластических деформациях объем тела не меняется. В случае несжимаемости тела при пластических деформациях $\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0$. Для главных деформаций $\varepsilon_1 = -\varepsilon_3$ интенсивность плоской деформации $\varepsilon_e = 2\varepsilon_1\sqrt{3}$ [318].

Как отмечено ранее, для главных деформаций объемного напряженно-деформированного состояния интенсивность деформаций с учетом несжимаемости: $\varepsilon_e = \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_2^2}$.

Чтобы максимально точно описать геометрию 3-D модели при разбиении ее на конечные элементы, применялось условие, что размер конечного элемента не превышал 1/3 минимального радиуса. Шаг расчета выбирался исходя из зависимости размера конечного элемента, при этом за один шаг расчета перемещение раската в направлении прокатки не превышал половины длины самого мелкого конечного элемента [236].

По итогам проведенных компьютерных моделирований в Deform-3D получены результаты по распределению значений интенсивности главных деформаций при образовании желоба во всех четырехвалковых калибрах, участвующих при образовании желоба за три прохода в клетки UR (калибры: UR-1, UR-3, UR-4) и клеть UF.

В связи с тем, что 55% деформации желоба в универсальном калибре приходится на первый проход, в данном разделе диссертации приведены результаты исследований для первого четырехвалкового калибра (UR-1) чистовой группы тандем.

Компьютерное моделирование процесса прокатки в первом проходе с использованием координатной сетки 5 x 5 мм показало (рисунок 2.2), что при разрезке головки наибольшая деформация металла наблюдается по оси желоба. При достижении полной разрезки металл головки прорабатывается на всю глубину губы, тем самым создавая мелкодисперсную структуру по периметру желоба. При внедрении разрезного гребня более половины его высоты наблюдается вытеснение металла в сторону противоположную разрезке. Формирование поверхности катания головки рельса осуществляется в последние 25% внедрения разрезного валка, за счет свободного уширения металла головки, а на завершающем этапе – прямого давления разрезного валка на поверхность катания. При деформации подошвы вертикальные линии координатной сетки остаются практически без изменения. Это говорит о том, что металл при деформации, в большей части, идет на вытяжку. Также стоит отметить, что на границах сопряжения головки и подошвы с шейкой профиля наблюдается искривление координатной сетки в сторону шейки, что говорит о значительном смещении осевой пористости непрерывнолитой заготовки в область шейки и является эффективным для рельсовых профилей.

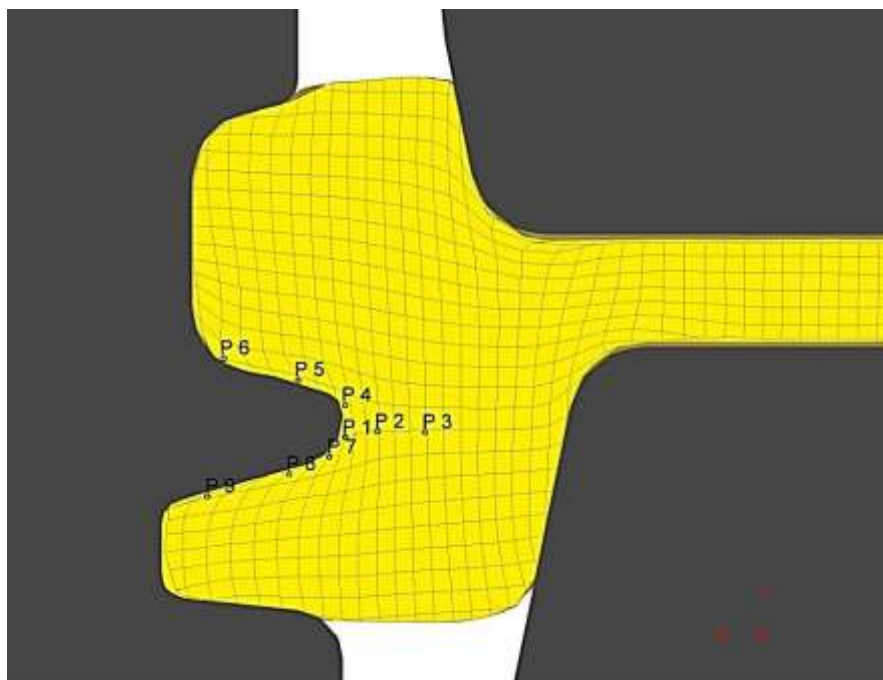


Рисунок 2.2 – Профиль головки трамвайного рельса и деформированная координатная сетка при прокатке в калибре UR-1 (P1 – P9 отслеживаемые точки)

Как видно из рисунка 2.3, в целом распределение полей с максимальными значениями интенсивности деформаций сосредоточено в области разрезки головки рельса. Элемент раската, который в первую очередь вступает в контакт с валками, – это головка профиля с разрезным гребнем вертикального валка, после чего начинается образование желоба. При разрезке желоба поверхностные слои металла испытывают наибольшую деформацию. Отчетливо просматривается зона усиленного роста полей интенсивности деформаций, которая располагается по оси разрезного гребня у вершины разрезаемого желоба и соответствует наибольшим перемещениям объемов металла, при этом значения интенсивности деформаций в поперечном сечении составляют $\epsilon_e = 3,5$. Вследствие значительной местной деформации металла при разрезке наблюдается вынужденное уширение металла по границам желоба. Значения интенсивности деформаций в поверхностных слоях металла по всему периметру желоба больше единицы, что указывает на значительные деформации. Обжатие по подошве в калибре UR-1 составляет 5 мм, при этом $\epsilon_e < 0,3$. Также отмечаются две зоны, где $\epsilon_e = 0,7 - 1,4$ – в местах сопряжения шейки с головкой профиля.

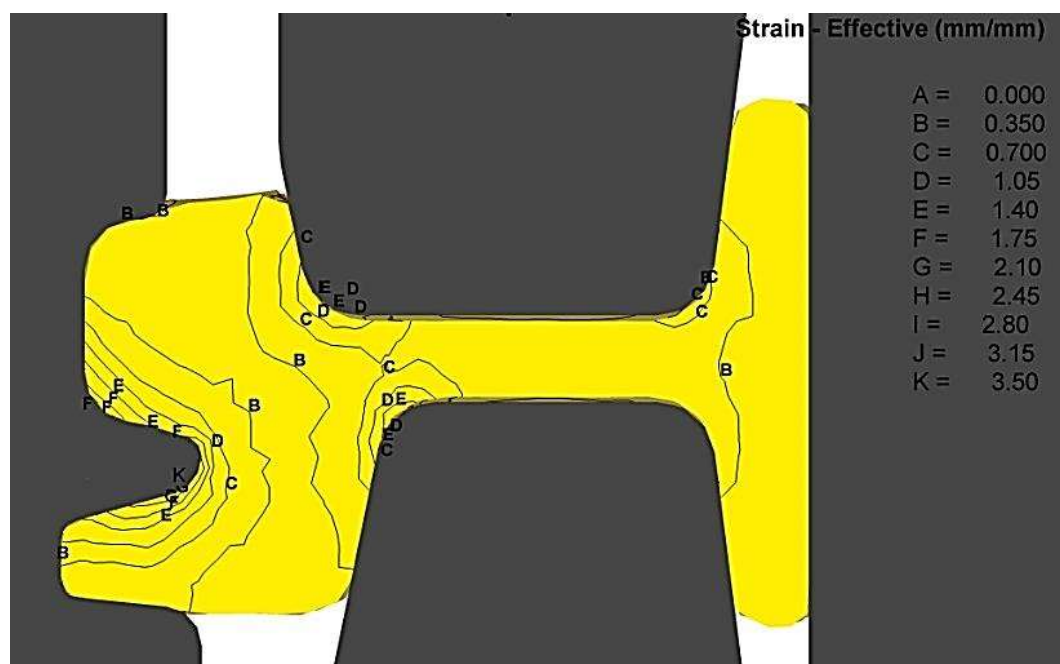


Рисунок 2.3 – Распределение полей интенсивности деформаций в первом четырехвалковом калибре UR-1

В связи с тем, что наибольшие деформации металла происходят при разрезке головки, для более углубленного изучения деформированного состояния металла на поверхности желоба, по его периметру, а также в теле металла по оси желоба определены 9 отслеживаемых точек (рисунок 2.2) с шагом 15 мм. По итогам проведенных расчетов получены результаты по распределению интенсивности главных деформаций при образовании желоба во всех четырехвалковых калибрах клетки UR (UR-1, UR-2, UR-3) и клетки UF.

При рассмотрении значений в отслеживаемых точках в калибре UR-1, выделяются 3 зоны распределения значений интенсивности деформаций (рисунок 2.4). Наибольшие значения интенсивности деформаций соответствуют точке 5 (рисунок 2.4, ряд 5, $\varepsilon_e = 2,88$) и точке 8 (рисунок 2.4, ряд 8, $\varepsilon_e = 2,7$), располагающихся на боковых поверхностях уклонов желоба. Максимальные значения интенсивности деформаций именно в этих точках, а не в вершине желоба объясняются тем, что во время разрезки металл по боковым уклонам желоба идет противходом внедрению разрезного гребня, тем самым вызывая максимальные значения интенсивности деформаций. Ко второй зоне относятся точки 1, 4, 6, 7, 9 (рисунок 2.4, ряды 1, 4, 6, 7, 9), имеющие промежуточные значения интенсивности деформаций в интервале $\varepsilon_e = 2,18 - 2,36$, располагающиеся в нижней и верхней частях желоба. Третья зона с минимальными значениями соответствует внутренним слоям металла – это точки 2, 3 (рисунок 2.4, ряд 2, 3), а значения интенсивности деформаций составляют $\varepsilon_e = 1,17 - 1,55$.

Получены уравнения регрессии [338 – 340] по определению значений интенсивности деформаций для обозначенных точек. В вершине желоба, соответствующей точке P1, интенсивность деформаций определяется по формуле:

$$\varepsilon_{eP1} = 7,7209x^3 - 18,386x^2 + 14,436x - 0,9052,$$

при коэффициенте детерминации $R^2=0,92$, где x – глубина внедрения вертикального разрезного валка в долях от полной глубины $\frac{\% \text{ глубины внедрения}}{100}$.

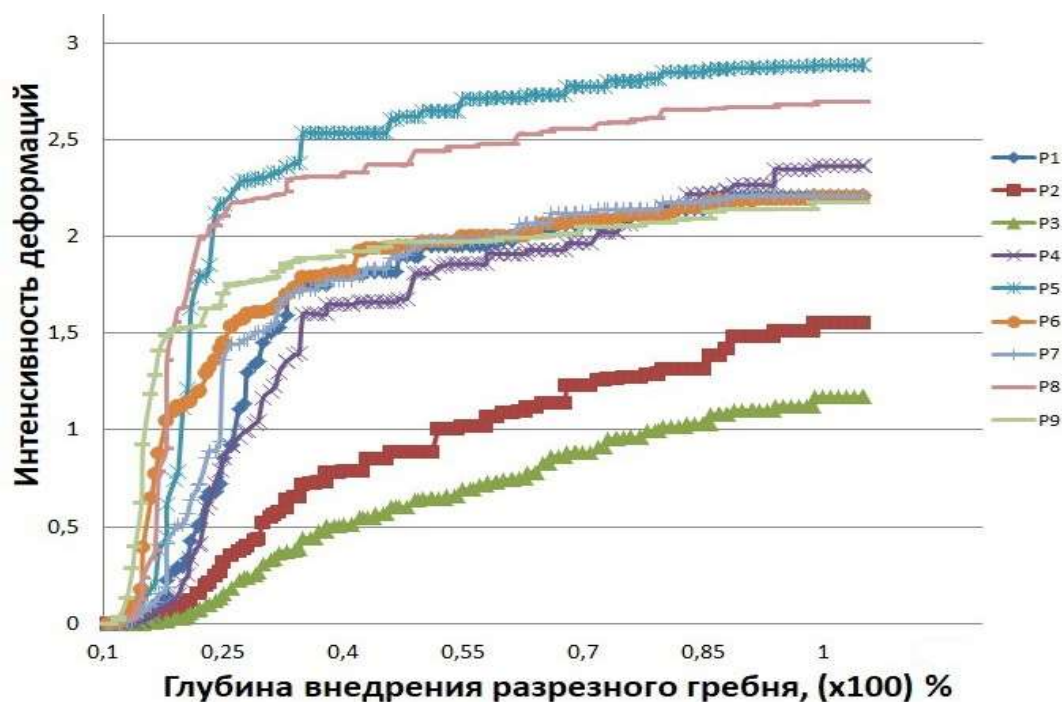


Рисунок 2.4 – Распределение интенсивности деформации в точках P1 – P9

При анализе распределения полей деформаций в поперечном сечении раската, направление – только по оси X (рисунок 2.5), отчетливо видны зоны интенсивного отставания металла со значением деформаций $\varepsilon_e = 1,2$, которые соответствуют поверхности желоба и боковым поверхностям головки и подошвы профиля со стороны шейки.

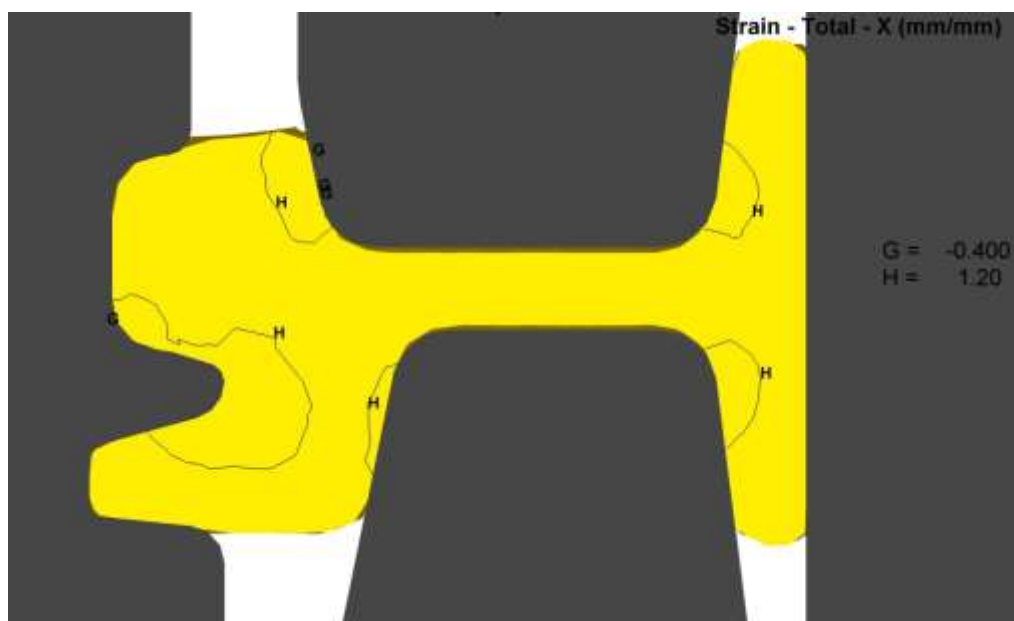


Рисунок 2.5 – Распределение полей деформаций в плоскости оси X калибра UR-1 (в перпендикулярной плоскости направлению прокатки)

Установлено, что при внедрении разрезного гребня в головку профиля объемы металла, вытесняемые при формировании желоба, смещаются в зону отставания, что наглядно отображено на рисунке 2.6. Причем наибольшие отставания поверхностных слоев металла желоба от основного объема составляют порядка 18 – 23 мм. Выявленное интенсивное смещение объемов металла в зону отставания по поверхности желоба с максимумом в его вершине указывает на сложное течение металла.

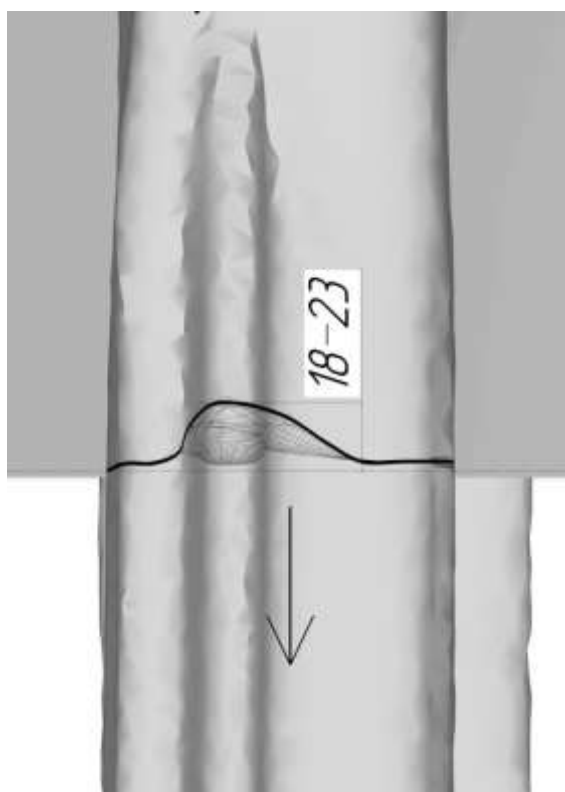
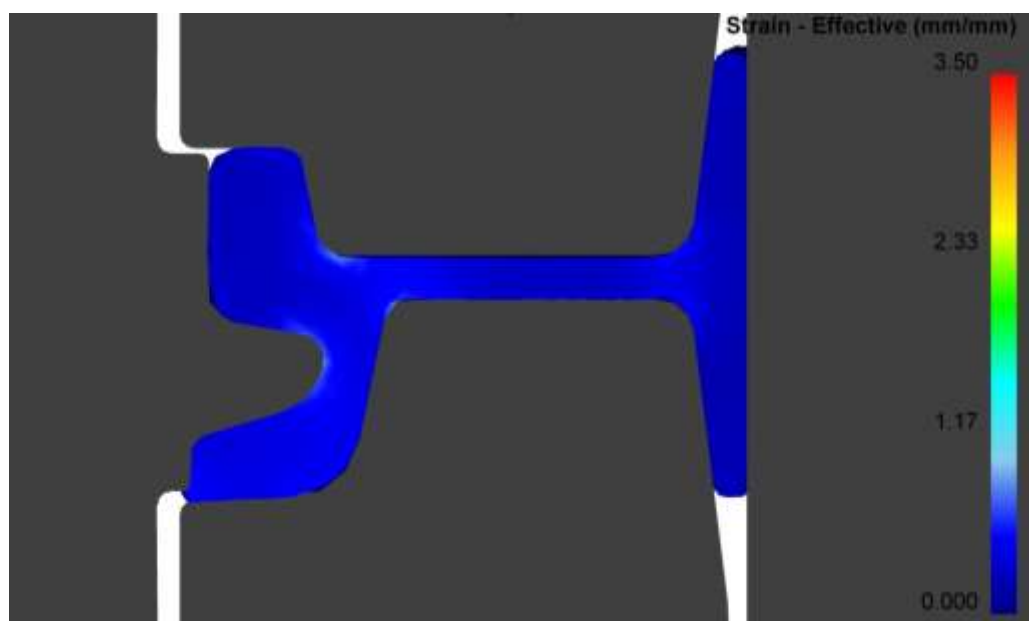


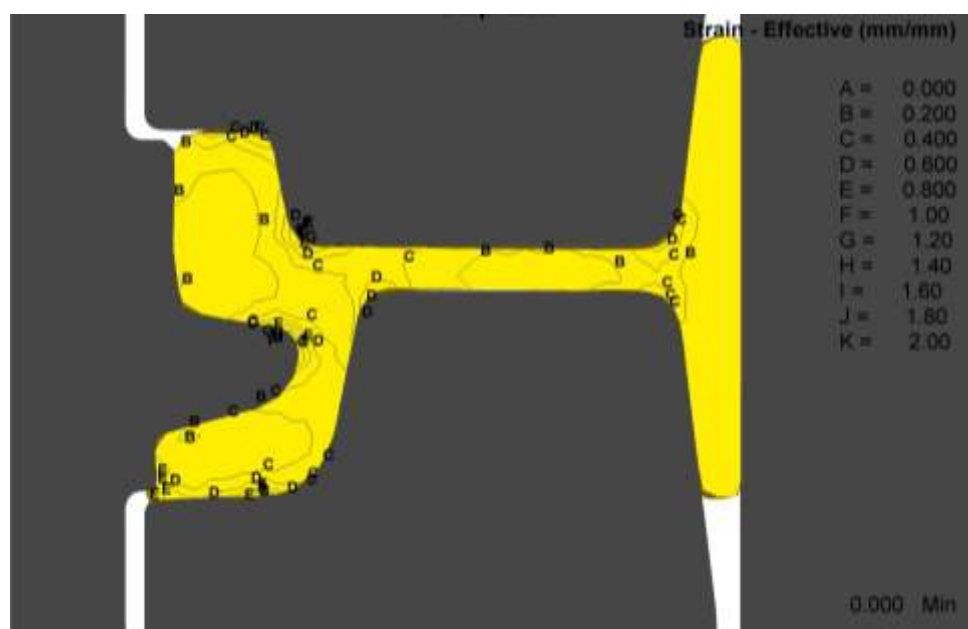
Рисунок 2.6 – Распределение смещения металла при образовании желоба в калибре UR-1 (стрелкой указано направление хода прокатки)

При рассмотрении переднего конца раската 3-D модели после первого прохода в калибре UR-1 установлено, что с наибольшей вытяжкой идет шейка профиля, образуя при этом «язык», затем головка и потом подошва, что впоследствии будет проверено проведением промышленного (натурного) эксперимента. Это подтверждает вывод о том, что при прокатке сложных асимметричных профилей распределение металла не подчиняется закону плоских сечений.

Также проведено компьютерное моделирование для калибров UR-2, UR-3 и UF. В связи с тем, что в данных калибрах не происходит значительных деформаций, влияющих на перераспределение металла при формировании желоба, далее приведены результаты распределения полей интенсивности деформаций только для чистового калибра UF (рисунок 2.7).



а



б

Рисунок 2.7 – Распределение полей интенсивности деформаций в калибре UF:

- а – распределение полей интенсивности деформаций;
- б – распределение изолиний интенсивности деформаций

Как видно из рисунка 2.7, поля интенсивности деформаций в поперечном сечении раската при прокатке в чистовом калибре имеют распределение значений близкое к равномерному, при этом значения интенсивности деформаций распределяются от $\varepsilon_e = 0 - 0,8$. Значения интенсивности деформаций в поперечном сечении меньше единицы, что говорит о незначительных деформациях по периметру раската. Максимальные значения интенсивности деформаций $\varepsilon_e = 0,8$ располагаются в 3-х зонах. Первая $\varepsilon_e = 0,8$ – радиусы сопряжений шейки и подошвы; вторая $\varepsilon_e = 0,6$ – радиусы сопряжения шейки и головки и третья $\varepsilon_e = 0,8$ – в вершине разрезаемого желоба, т.е. в тех местах, где металл находится в стесненных условиях по отношению к объему металла.

По результатам исследования деформированного состояния металла при прокатке в чистовой непрерывно-реверсивной группе клетей установлено: раскат во всех калибрах удовлетворительно захватывается валками без пробуксовок; металл полностью заполняет все элементы калибров без переполнений и заусенцев; при разрезке головки профиля и образовании желоба наблюдается сложное течение металла на уширение, в зону отставания и на вытяжку, которое не подчиняется закону плоских сечений; существует значительная неравномерность интенсивности деформаций не только в поперечном, со стороны обжатия вертикальных валков, но и в продольном, от горизонтальных валков, направлениях; выявлено интенсивное смещение металла в зону отставания по поверхности желоба с максимумом в его вершине, при этом объемы металла желоба утягивают значительную часть тела головки в зону отставания.

2.1.2 Исследование напряженного состояния металла

По итогам проведенного компьютерного моделирования получены результаты по распределению полей интенсивности напряжений при прокатке с образованием желоба в клетях UR (калибры: UR-1, UR-2, UR-3) и UF, которые рассчитываются по общепринятым формулам теории прокатки и обработки

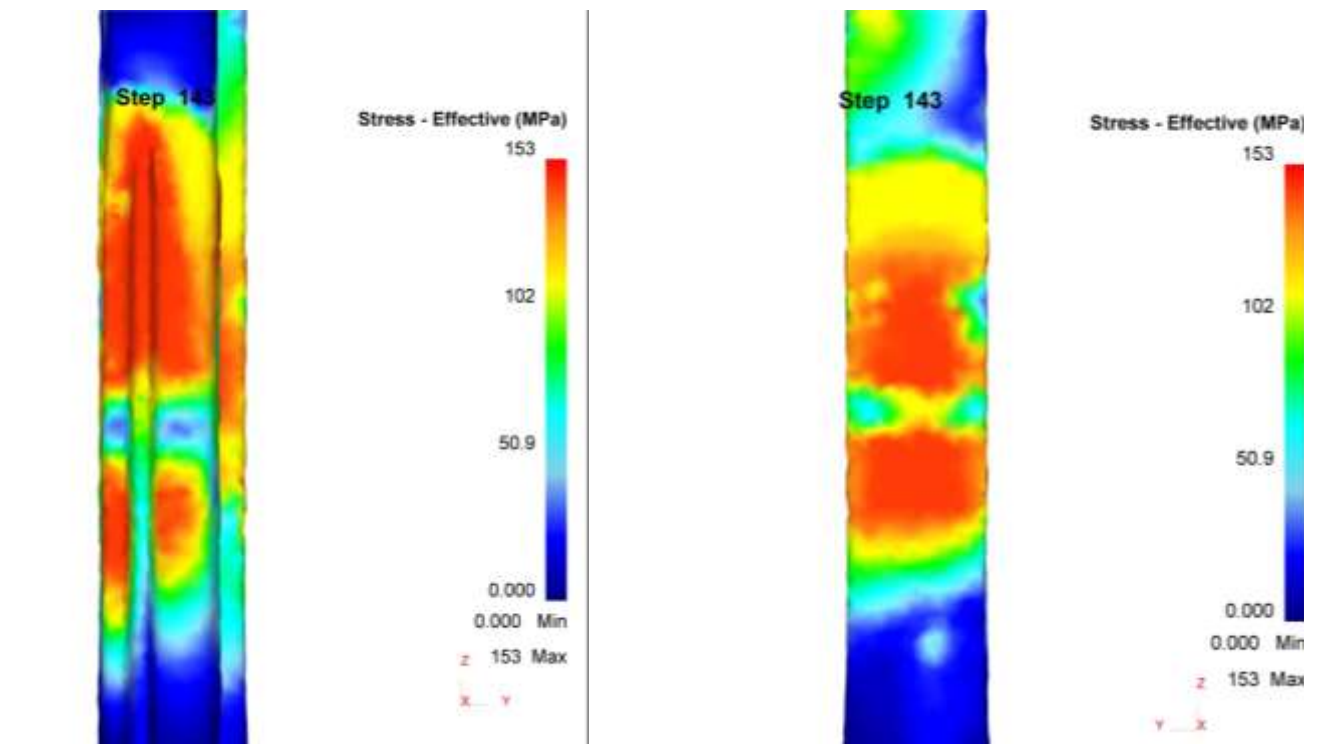
металлов давлением [172, 289]. Также проводили оценку критерия разрушения поверхностных и внутренних слоев металла Кокрофта-Лэтэма.

По итогам проведенных расчетов получены результаты по распределению полей интенсивности напряжений при прокатке с образованием желоба в клетях UR (калибры: UR-1, UR-2, UR-3) и UF. В связи с тем что 55% деформации желоба при разрезке головки приходится на первый калибр (UR-1), в данном разделе приведены результаты исследований объемного напряженного состояния металла для первого четырехвалкового калибра UR-1 непрерывной чистовой группы тандем.

Полученные результаты исследований по распределению полей интенсивности напряжений в первом четырехвалковом калибре показаны на рисунке 2.8. Распределение изолиний интенсивности напряжений в поперечном сечении имеет неравномерную картину – это обусловлено геометрическими факторами калибра, вызываемыми особенностями профиля желобчатого рельса. Наибольшие значения интенсивности напряжений составляют порядка $\sigma_e = 160$ МПа и соответствуют головке профиля, которые возникают из-за деформации металла разрезным гребнем. Также максимальные значения интенсивности напряжений располагаются в месте сопряжения шейки с подошвой профиля, а также зоне по шейке в верхней и нижней ее части, т.е. в тех элементах профиля, где металл находится в стесненных условиях. Зоны с наименьшими значениями интенсивности напряжений $\sigma_e = 128 - 149$ МПа соответствуют головке профиля в верхней и нижней ее части относительно оси желоба на некотором удалении от разрезного валка и горизонтальных валков. С удалением от поверхностных слоев, в зоне контакта разрезного валка, значения интенсивности напряжений уменьшаются, такая же закономерность наблюдалась при распределении полей интенсивности деформаций.



а



б

в

Рисунок 2.8 – Распределение полей интенсивности напряжений в калибре UR-1 (справа на рисунках приведена масштабная шкала): а – в поперечном сечении раската по оси валков; б – по поверхности головки в очаге деформации; в – по поверхности подошвы в очаге деформации

При отдельном рассмотрении распределения значений напряжений в горизонтальной плоскости по оси X (рисунок 2.9) поперечного сечения раската от обжатия вертикальными валками, отмечено, что в поверхностных слоях металла желоба, в верхней его части, наблюдаются сжимающие напряжения порядка $\sigma_e = -266$ МПа, объемы металла при этом находятся в зоне отставания, а по остальному сечению металла отмечаются растягивающие напряжения порядка $\sigma_e = 120$ МПа.

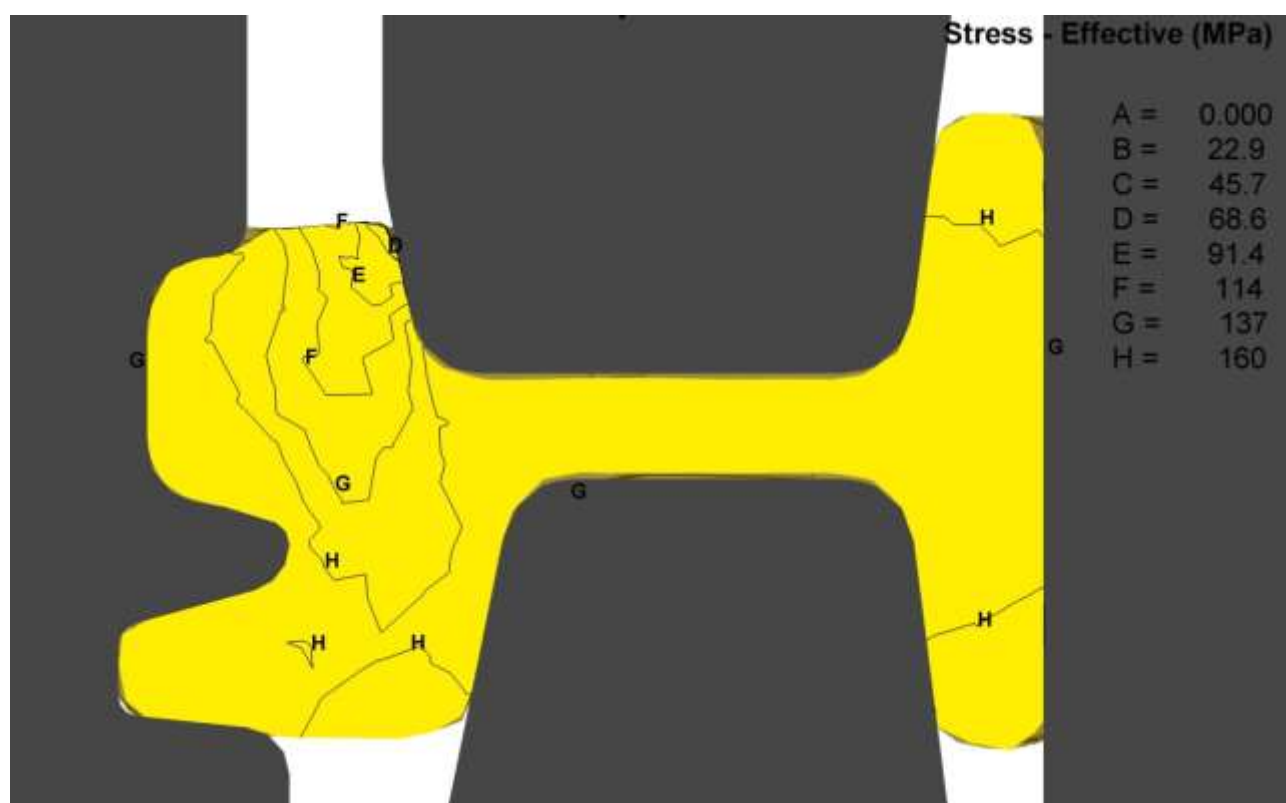


Рисунок 2.9 – Распределение полей напряжений в плоскости X калибра UR-1

На рисунке 2.10 показано распределение изолиний интенсивности напряжений в поперечном сечении металла при прокатке его в чистовом калибре UF.

В процессе моделирования исследован один из основных факторов, влияющих на получение требуемого профиля – ресурс пластичности металла с использованием критерия Кокрофта-Лэтэма, который рассчитывается по формуле

$D = \int_0^{\bar{\varepsilon}} \frac{\sigma^*}{\sigma} d\bar{\varepsilon}$, где, $\bar{\varepsilon}$ – накопленная (эквивалентная) пластическая деформация [205 – 209].



Рисунок 2.10 – Распределение полей интенсивности напряжений в калибре UF

На рисунке 2.11 представлено распределение полей ресурса пластичности в поперечном сечении раската в калибре UR-1. Значения степени использования ресурса пластичности находятся в интервале $D = 0,06 - 0,25$ и располагаются в трех зонах. Первая – максимальные значения $D = 0,25 - 0,146$ соответствуют поверхностным слоям металла в местах контакта по радиусам разрезного гребня. Вторая зона, в которой значения ресурса пластичности доходят до $D = 0,146 - 0,08$, соответствует наружным радиусам по подошве и губе головки профиля. Третья зона, в которой наблюдаются минимальные значения использования коэффициента ресурса пластичности составляет порядка $D = 0,08$ – это шейка профиля в сопряжении с центральной частью подошвы. Вышеперечисленные

зоны по элементам профиля имеют максимальные значения, в которых осуществляются интенсивные деформации со значительными объемами смещаемого металла по элементам профиля. Стоит отметить, что картина распределения ресурса пластичности напрямую зависит от распределения полей интенсивности деформаций и интенсивности напряжений по сечению металла [295].

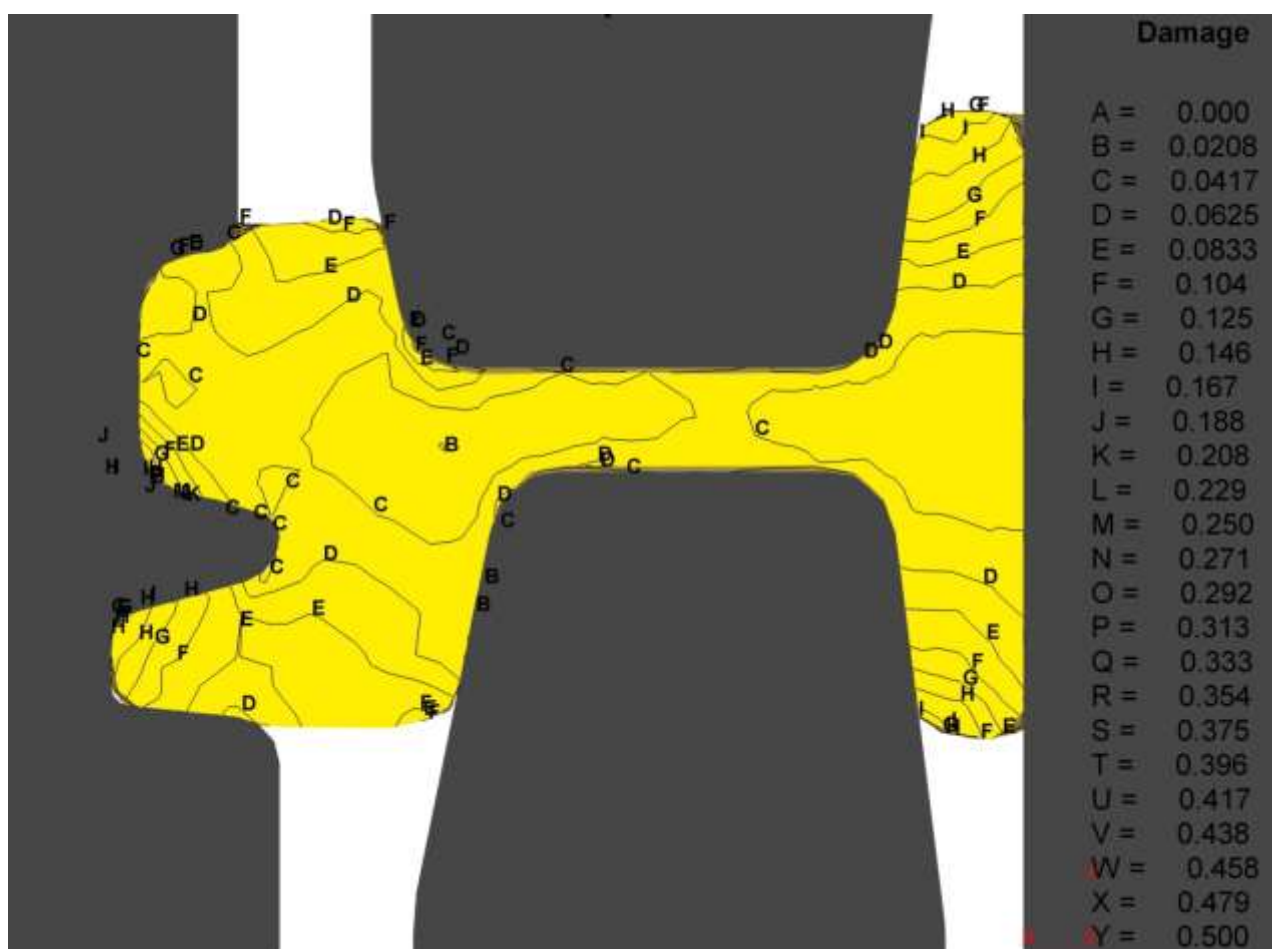


Рисунок 2.11 – Распределение полей ресурса пластичности в поперечном сечении раската при прокатке в калибре UR-1

Распределение полей коэффициента ресурса пластичности для калибра UF показано на рисунке 2.12, а распределение полей гидростатического давления на рисунке 2.13.

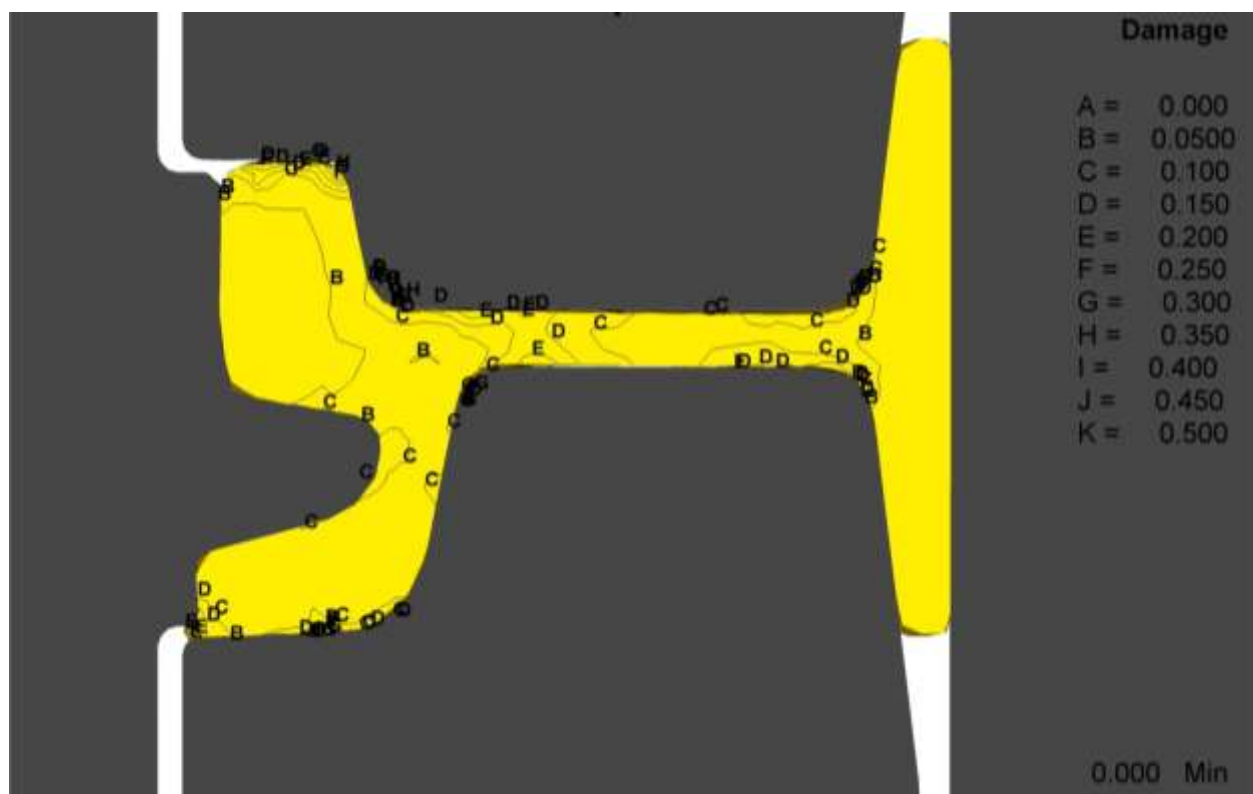


Рисунок 2.12 – Распределение полей коэффициента ресурса пластичности металла при прокатке в калибре UF

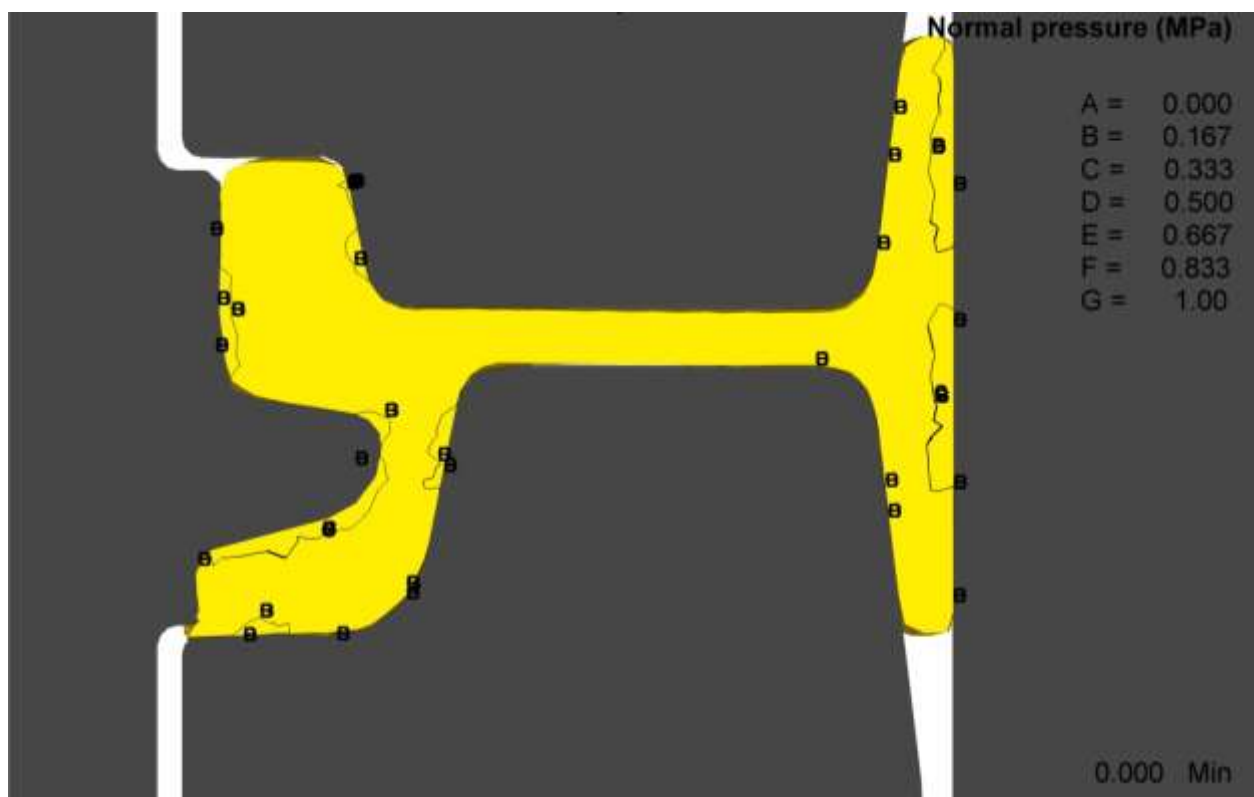


Рисунок 2.13 – Распределение полей гидростатического давления в поперечном сечении раската при прокатке в калибре UF

По результатам исследования напряженного состояния установлено следующее:

- распределение полей интенсивности напряжений в поперечном сечении калибра UR-1 имеет неравномерную картину (минимальные и максимальные значения различаются между собой в 7 раз, минимальные значения $\sigma_{e,\min} = 22,9$ МПа, максимальные значения $\sigma_{e,\max} = 160$ МПа), обусловленную геометрическими факторами калибра, вызванными его асимметрией в горизонтальной и вертикальной плоскостях, определяемой особенностями профиля желобчатого рельса;

- несмотря на значительную неравномерность деформаций, металл обладает значительным ресурсом пластичности, поэтому, с целью эффективного распределения усилий прокатки, имеется возможность по увеличению обжатий по элементам профиля без образования дефектов и нарушения сплошности металла;

- во всех проходах непрерывной чистовой группы клеток существует неравномерность по напряженному (минимальные и максимальные значения интенсивности напряжений в калибре UR-1 отличаются между собой в 7 раз) и деформированному (минимальные и максимальные значения интенсивности деформаций в калибре UR-1 отличаются в 11,7 раза) состоянию металла.

Полученные результаты исследования напряженно-деформированного состояния металла при прокатке трамвайных рельсов в четырехвалковых калибрах, необходимы для дальнейшего исследования энергосиловых параметров прокатки, что является одним из направлений в разработке ресурсосберегающей технологии.

2.1.3 Исследование выработки осевой пористости непрерывнолитой заготовки

Переход при прокатке на ЕВРАЗ ЗСМК с НЛЗ поперечным сечением 330 x 300 мм на заготовку 365 x 300 мм (т.е. произошло увеличение размера порядка 10% большей стороны НЛЗ) потребовало проведения углубленных исследований по выбору эффективной последовательности и конфигурации ящичных и разрезных калибров, обеспечивающих требуемое распределение осевой пористости [252] при прокатке в черновой группе клетей рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

В черновых калибрах величина абсолютного обжатия за проход изменяется в широких пределах: от 110 мм до 12 мм. Суммарное абсолютное обжатие вдоль оси шейки рельса составляет 150 мм и в перпендикулярном направлении 112 мм.

Моделирование методом конечных элементов проводили в Deform-3D. Модельная заготовка из рельсовой стали размерами 365 x 300 мм имела площадь поперечного сечения $S = 109500 \text{ мм}^2$. По оси заготовки, по всей ее длине, выполнено отверстие диаметром 40 мм, которое имитирует опасную зону осевой пористости (рисунок 2.14). Площадь поперечного сечения осевого отверстия составляет $S = 1256,6 \text{ мм}^2$.

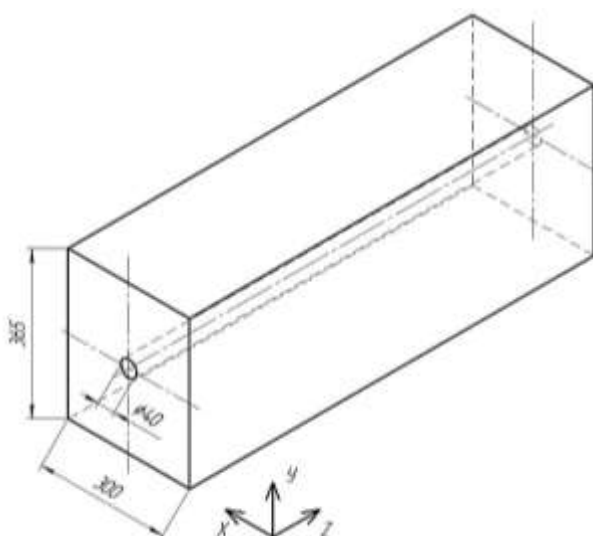
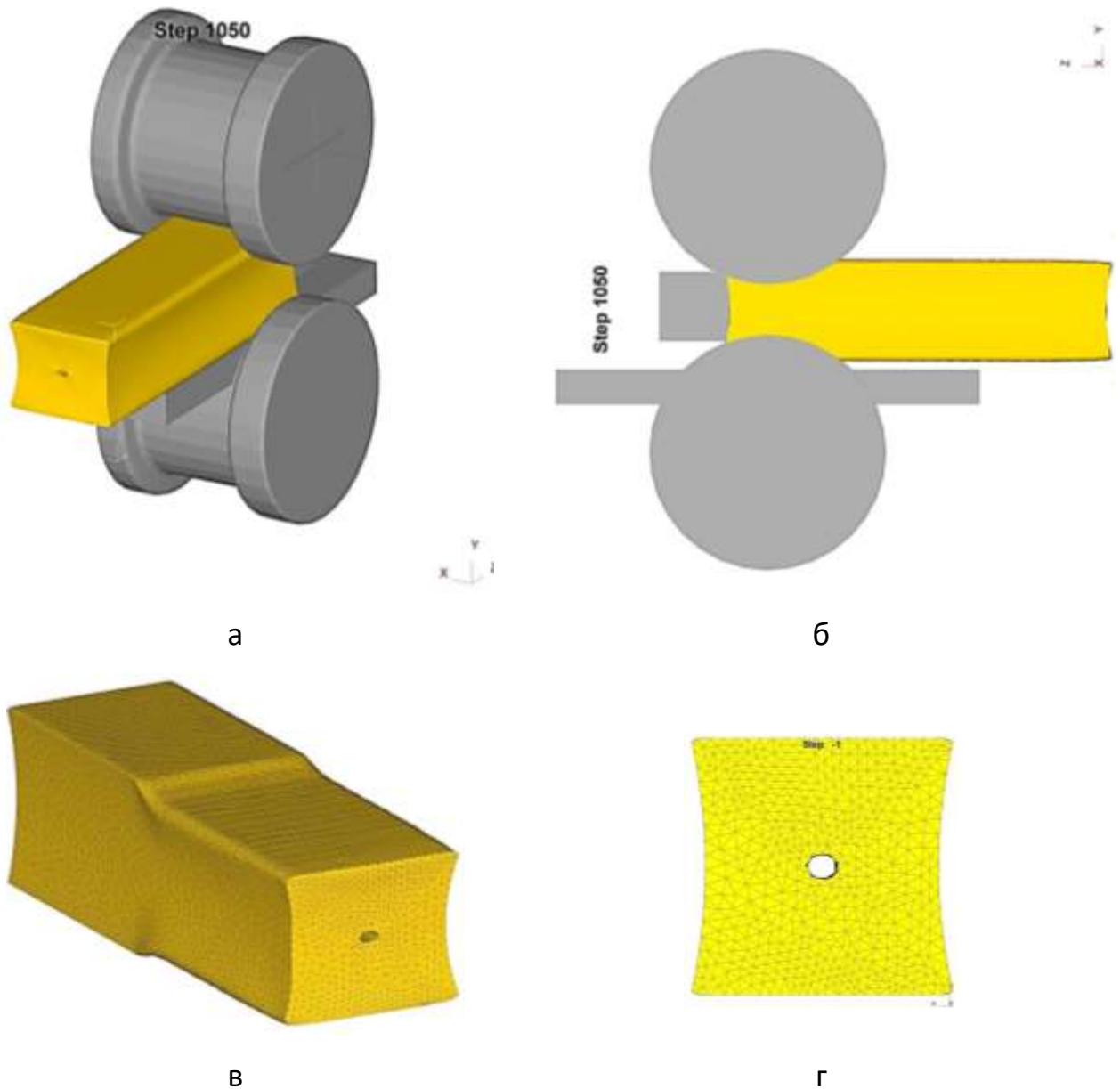


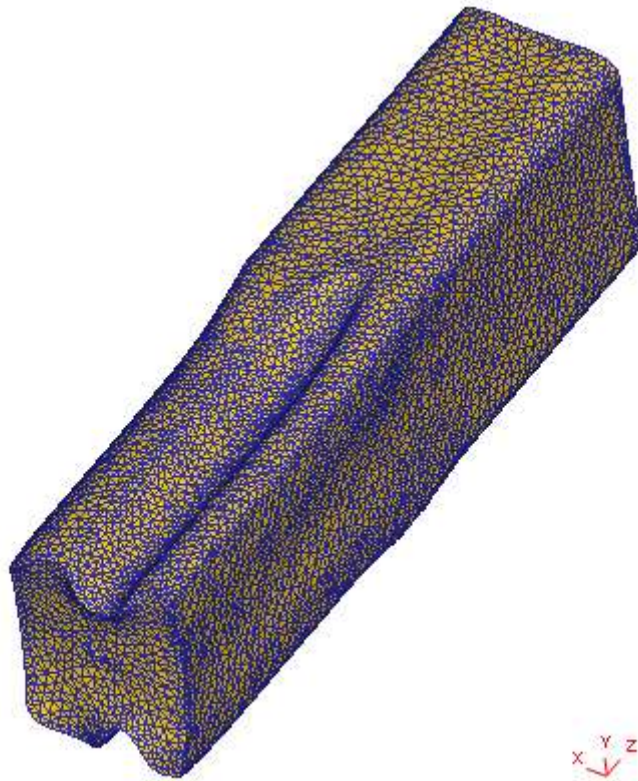
Рисунок 2.14 – Изометрия НЛЗ для компьютерного моделирования с имитатором осевой пористости по всей длине

Условия моделирования: температура заготовки 900 – 1000 °С; средняя скорость прокатки – 3,5 м/с; коэффициент трения – 0,5; температура окружающего воздуха – 20 °С. Оборудование и условия моделирования соответствуют реальному технологическому процессу.

По результатам моделирования изучено формоизменение металла, распределение значений интенсивности деформаций и интенсивности напряжений в поперечном сечении раската после каждого прохода (рисунок 2.15).



(продолжение рисунка 2.15 на следующей странице)



д

Рисунок 2.15 – 3D модели результатов компьютерного моделирования выработки осевой пористости: а – второй проход в ящичном калибре; б – второй проход (плоскость XZ) с отображением формоизменения переднего и заднего конца раската; в – 3D модель недоката после второго прохода; г – 3D модель поперечного сечения заготовки после первого прохода с конечно-элементной сеткой; д – 3D модель недоката разрезного калибра

Распределение полей интенсивности деформаций ε_e в поперечном сечении раската показано на рисунке 2.16. Как видно из рисунка, распределение полей интенсивности деформаций по сечению раската неравномерно. Поверхностные слои раската, которые в первую очередь вступают в контакт с валками, имеют наибольшие значения интенсивности деформаций, при этом значения интенсивности деформаций убывают от поверхности к центральным слоям.

Наибольшие значения интенсивности деформаций после второго прохода в ящичном калибре (рисунок 2.16 а) соответствуют металлу, находящемуся по

радиусам сопряжения горизонтальной бочки с выпусками калибра и составляют $\varepsilon_e = 1,46$. Величина интенсивности деформаций при этом равномерно убывает к центральным слоям до значений $\varepsilon_e = 0,364$.

На исследованных темплетах видно формоизменение центрального отверстия, которое моделирует формоизменение осевой пористости. Площадь поперечного сечения осевой пористости после второго прохода составляет $S = 998,24 \text{ мм}^2$. Наибольшие значения интенсивности деформаций после седьмого прохода в ящичном калибре также имеет металл находящейся по радиусам сопряжения бочки вала с выпусками калибра (рисунок 2.16 б). Максимальные значения интенсивности деформаций составляют $\varepsilon_e = 0,87$, при этом картина распределения полей интенсивности деформаций отличается от второго прохода тем, что поля интенсивности деформаций распределяются от угловых частей раската к центральным слоям и имеют ромбическую форму, вызванную защемлением раската, а площадь поперечного сечения осевой пористости уменьшилась до $S = 364,5 \text{ мм}^2$.

После девятого прохода в разрезном калибре закрытой формы с односторонним расположением разъемов значения интенсивности деформаций распределяются неравномерно (рисунок 2.16 в), что обусловлено геометрическими факторами калибра. Установлено, что наибольшие значения интенсивности деформаций в девятом проходе соответствуют разрезному гребню по закрытому ручью $\varepsilon_e = 2,25$ при угле гребня 77° с радиусом притупления $R = 16 \text{ мм}$, причем поля интенсивности деформаций с максимальными значениями располагаются в верхней части гребня. Средние значения интенсивности деформаций $\varepsilon_e = 1,69$ соответствуют верхнему горизонтальному валку с углом разрезного гребня 100° и радиусом притупления $R = 30 \text{ мм}$, при этом значение полей интенсивности деформаций располагаются до половины высоты разрезного гребня. При прокатке в девятом калибре наблюдается явление перемещения металла фланца подошвы из открытого ручья в закрытый из-за того, что фланец подошвы в открытом ручье получает чрезмерно большое боковое обжатие, и как следствие, такое

перемещение металла сопровождается большим расходом энергии на прокатку и вызывает значительный износ калибра. В десятом проходе происходит заваривание и сжатие осевой пористости, которая становится сосредоточенной и располагается в шейке профиля, что является допустимым, и в последнем калибре клетки BD-2 ее раскрытия не происходит (рисунок 2.16 г). Максимальные значения интенсивности деформаций в двенадцатом проходе составляют $\varepsilon_e = 1,25 - 1,67$.

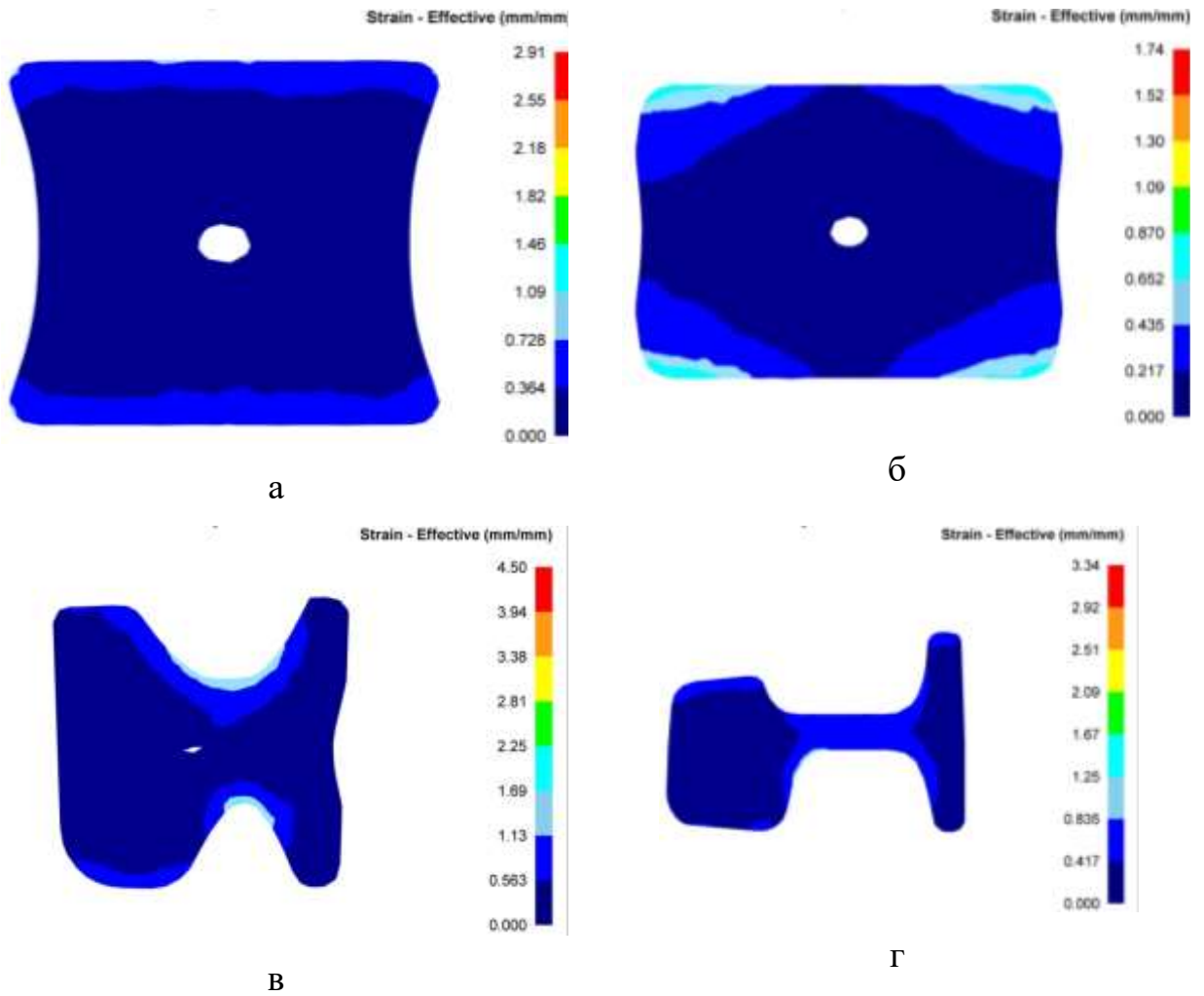


Рисунок 2.16 – Распределение полей интенсивности деформаций:
а – после второго прохода; б – после седьмого прохода; в – после девятого прохода; г – после двенадцатого прохода

Далее проведено исследование распределения полей интенсивности напряжений в поперечном сечении раската. Полученные значения интенсивности напряжений во втором, седьмом, девятом и двенадцатом проходах показаны на рисунке 2.17. Распределение полей интенсивности напряжений после второго прохода (рисунок 2.17, а) симметричны относительно вертикальной оси. Максимальные значения интенсивности напряжений составляют $\sigma_e = 167$ МПа и соответствуют поверхностным слоям, контактирующим с горизонтальными валками. Значения интенсивности напряжений убывают от поверхности к центральным слоям. В центральных слоях выделяются три шаровых зоны с минимальными значениями интенсивности напряжений $\sigma_e = 104$ МПа, располагающихся по обе стороны от осевой пористости, причем по периметру осевой пористости, со стороны горизонтальных валков, также выделяются аналогичные зоны минимальных значений интенсивности напряжений. На рисунке 2.17 б представлено распределение полей интенсивности напряжений после седьмого прохода. Характер распределения полей интенсивности напряжений аналогичен распределению полей интенсивности деформаций, имеет ромбическую форму, а максимальные значения соответствуют местам защемления полосы в радиусах сопряжения горизонтальной бочки вала с выпусками калибра и составляют $\sigma_e = 162$ МПа. На рисунке 2.18 в представлено распределение полей интенсивности напряжений после девятого прохода в разрезном калибре клетки ВД-2. Максимальные значения интенсивности напряжений составляют $\sigma_e = 125 - 167$ МПа и располагаются по периметру ручьев калибра. Стоит отметить, что фланец подошвы при проникновении в закрытый ручей встречает значительные сопротивления со стороны наклонной стенки гребня и со стороны боковой стенки калибра, что вызывает значительные напряжения $\sigma_e = 167$ МПа по фланцу в закрытом ручье, а металл в закрытом ручье как бы протягивается через него. В открытом ручье фланец подошвы находится в пространстве между двумя коническими плоскостями, вращающимися с разными окружными скоростями, при этом фланец обжимается

по толщине, что вызывает значительные напряжения $\sigma_e = 125$ МПа со стороны опорной части подошвы. Из-за различного характера деформации фланцев в закрытом и открытом ручьях калибра и с целью получения профиля с одинаковыми размерами фланцев, необходимо в смежных калибрах чередовать расположение открытых и закрытых фланцевых ручьев. В центральной части раската, в зоне нахождения осевой пористости, наблюдаются значительные напряжения в интервале $\sigma_e = 83 - 125$ МПа, что способствует проработке осевой пористости в организованную полосу, располагающуюся в шейке профиля.

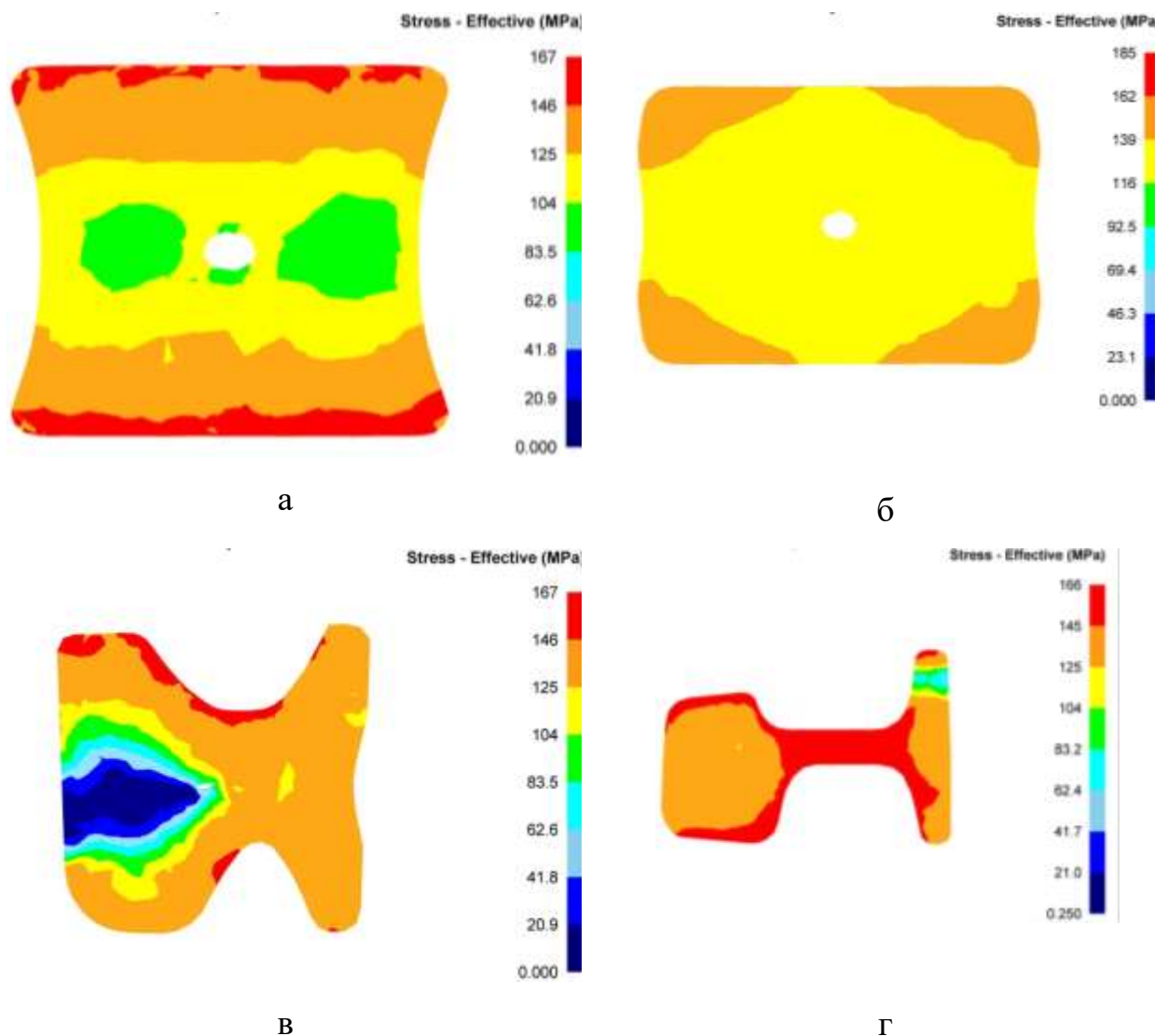


Рисунок 2.17 – Распределение полей интенсивности напряжений:

а – после второго прохода; б – после седьмого прохода; в – после девятого прохода; г – после двенадцатого прохода

Девятый проход является последним, после которого можно наблюдать осевую пористость, а в десятом происходит ее полное заваривание. В двенадцатом проходе (рисунке 2.17 г) характер распределения интенсивности напряжений зависит от распределения интенсивности деформаций, и зоны с максимальными значениями соответствуют шейке и краевым участкам фланцев головки и подошвы $\sigma_e = 166$ МПа. Также стоит отметить, что прокатка в разрезных рельсовых калибрах является различной по времени с точки зрения обработки валками элементов раската.

Далее исследован коэффициент ресурса пластичности металла. На рисунке 2.18 представлено распределение полей ресурса пластичности в поперечном сечении раската во втором, седьмом, девятом и двенадцатом проходах. Во втором проходе (рисунок 2.18 а) выделяются четыре зоны по углам раската в местах сопряжения бочки валков с выпусками калибра. Максимальные значения степени использования ресурса пластичности во втором проходе ящичного калибра составляют $D = 0,2$, при этом в основной массе поперечного сечения раската пластические свойства металла практически не используются $D = 0$. Распределение полей использования ресурса пластичности после седьмого прохода показано на рисунке 2.18 б. Зона с максимальным использованием ресурса пластичности $D = 0,122 - 0,162$ имеет ромбическую форму, которая соотносится с распределением полей интенсивности деформаций и интенсивности напряжений. Осевая пористость в данном случае является концентратором напряжений, в верхней и нижней частях которой в максимальной степени, относительно всего поперечного сечения, использован коэффициент ресурса пластичности, который составляет $D = 0,162$. При рассмотрении распределения использования ресурса пластичности после девятого прохода (рисунок 2.18 в) стоит отметить, что максимальные значения соответствуют фланцу подошвы, причем по открытому ручью, и составляют $D = 0,2 - 0,3$ с наибольшими значениями по торцевой части в открытом ручье. Максимальное использование ресурса пластичности во фланце подошвы объясняется тем, что при разрезке объемы металла интенсивно перетекают в зону с наименьшим

сопротивлением, при этом по центральной части подошвы имеется не заполнение. Также максимум значений находится в радиусе головки по раскрытию калибра. Минимальные значения использования коэффициента ресурса пластичности соответствуют объему металла в области головки и составляют $D = 0,06 - 0,188$. В десятом проходе в разрезном калибре происходит заваривание осевой пористости, и в последующих калибрах ее раскрытие не наблюдается (рисунок 2.18 г). Стоит отметить, что картина распределения ресурса пластичности напрямую зависит от распределения интенсивности напряжений по сечению металла. Максимальные значения коэффициента ресурса пластичности составляют $D = 0,125 - 0,168$.

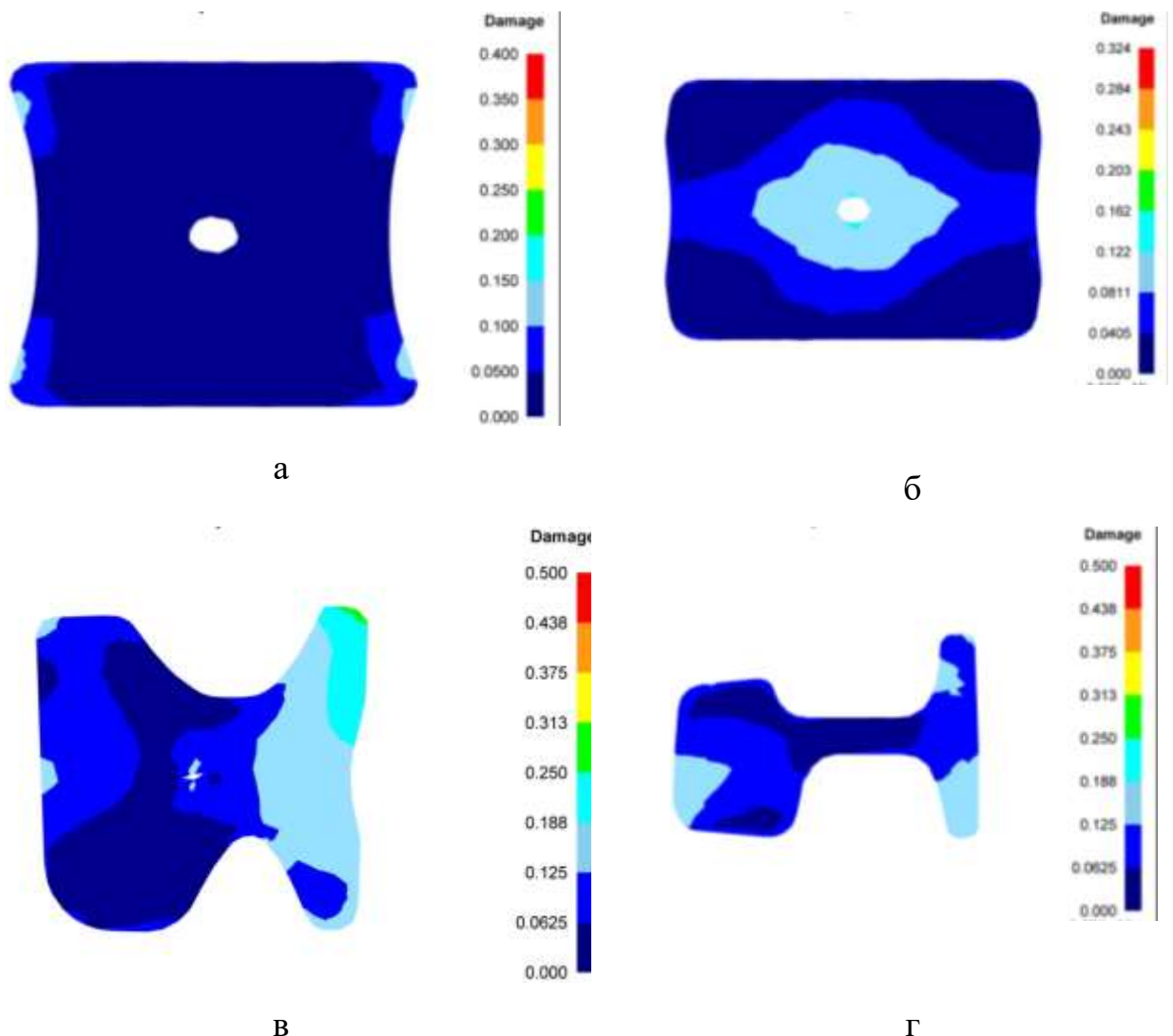


Рисунок 2.18 – Распределение полей коэффициента ресурса пластичности:
а – после второго прохода; б – после седьмого прохода; в – после девятого прохода; г – после двенадцатого прохода

Ниже представлены графики (рисунок 2.19, 2.20), которые отражают изменение площади поперечного сечения осевой пористости в зависимости от коэффициента суммарной вытяжки и номера прохода. Получено уравнение регрессии [341] полиномиальной зависимости пятой степени с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0,99$ по нахождению площади поперечного сечения осевой пористости в зависимости от суммарного коэффициента вытяжки, мм²:

$$S_{\text{оп}} = -27,508\lambda_{\Sigma}^5 + 434,32\lambda_{\Sigma}^4 - 2633,6\lambda_{\Sigma}^3 + 7727,6\lambda_{\Sigma}^2 - 11301\lambda_{\Sigma} + 7078,1,$$

при величине достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9929$, где λ_{Σ} – суммарный коэффициент вытяжки в текущем калибре.

Изучение формоизменения металла показало, что все калибры полностью заполняются металлом. Поверхностные дефекты на раскате отсутствуют. Зона осевой пористости по всем проходам располагается в центральной части раската, при этом площадь поперечного сечения осевой пористости уменьшается с увеличением коэффициента вытяжки (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Изменение площади поперечного сечения осевой пористости в зависимости от суммарного коэффициента вытяжки

№ прохода	Суммарная вытяжка, λ_{Σ}	Площадь поперечного сечения осевой пористости $S_{\text{оп}}$, мм ²
0	0	1256,64
1	1,062	1121,55
2	1,16	998,24
3	1,32	841,16
4	1,63	479,01
5	1,744	442,02
6	1,96	412,33
7	2,2	364,5
8	2,54	237,5
9	3,24	40,13
10	4,13	0
11	5,11	0
12	6,02	0

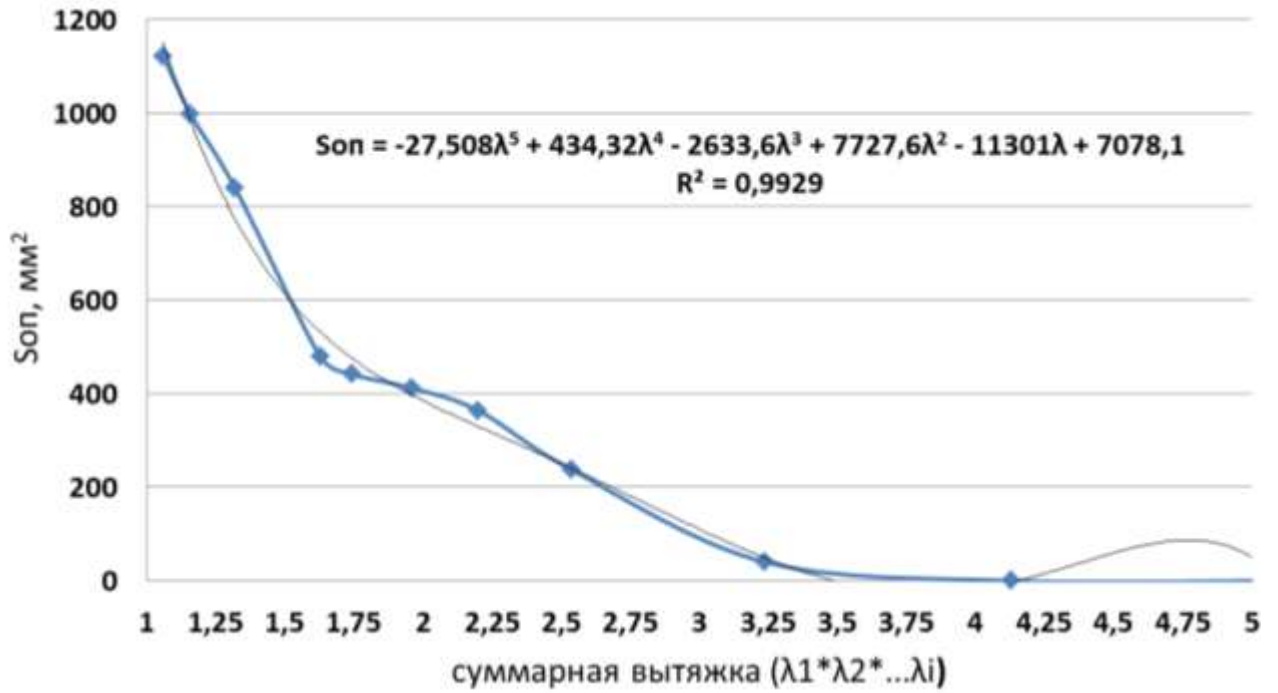


Рисунок 2.19 – Изменение площади поперечного сечения осевой пористости в зависимости от суммарного коэффициента вытяжки

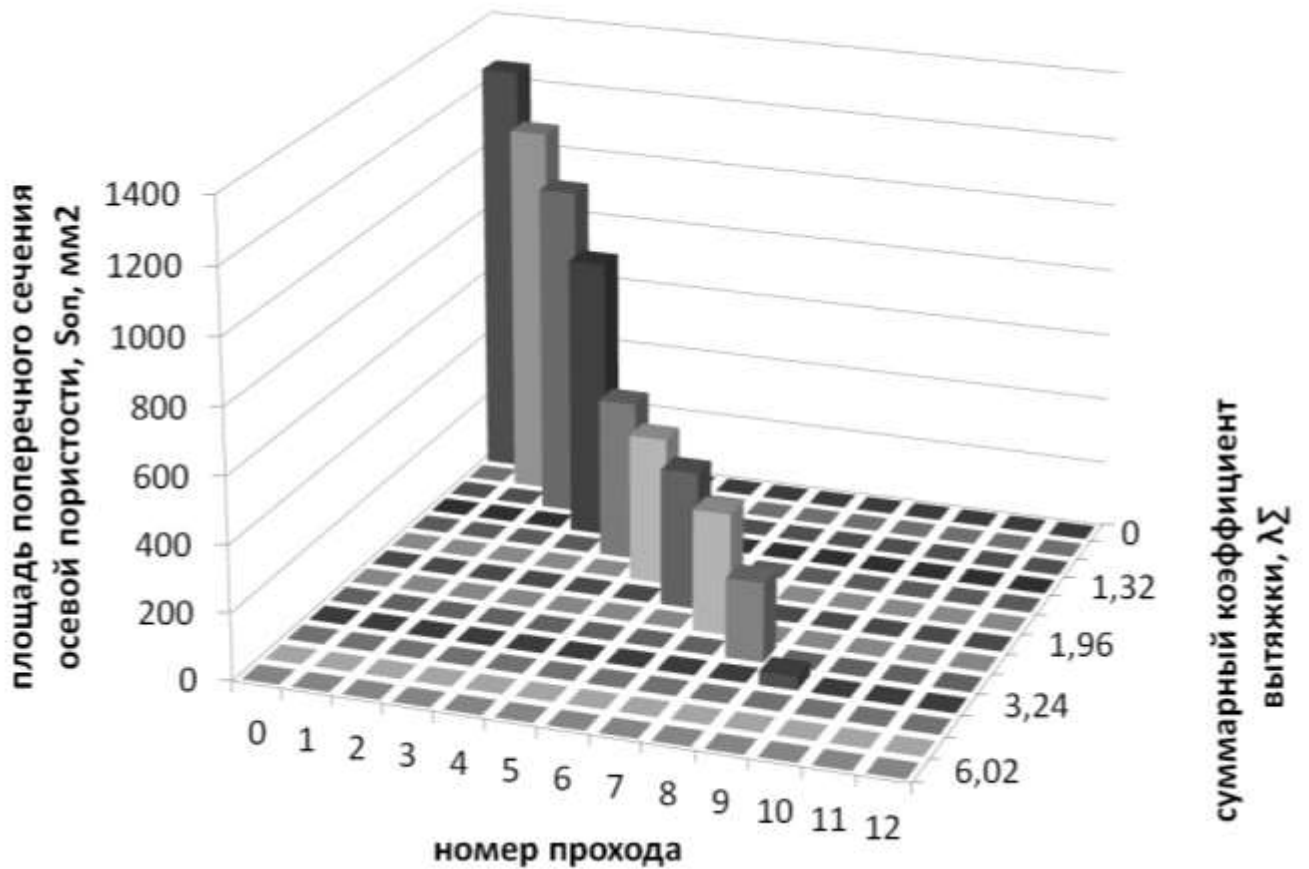


Рисунок 2.20 – Изменение площади поперечного сечения осевой пористости в зависимости от номера прохода и суммарного коэффициента вытяжки

2.2. Планирование эксперимента процесса прокатки трамвайных рельсов. Нахождение требуемых размеров фланцев профиля при прокатке в четырёхвалковых калибрах

С целью определения влияния различных факторов при прокатке и выявления закономерностей процесса изменения размеров фланцев трамвайного рельса проведено планирование многофакторного эксперимента по факторам и уровням их варьирования, подробное описание которых приведено в главе 3 диссертации [266, 267, 270, 271]. Планирование эксперимента проведено с целью получения профиля с регламентированной геометрией. Критерием эффективности является получение фланцев профиля с регламентированной геометрией в соответствии с требованиями ГОСТ на трамвайные рельсы.

В связи с тем что для проведения экспериментов определено 6 факторов, которые оказывают наибольшие влияния на процесс прокатки трамвайных рельсов в четырёхвалковых калибрах, применение таких методов как крутого восхождения, априорного ранжирования, латинский квадрат, греческий квадрат или функции желательности, является не эффективным, поэтому в диссертации применен сверхнасыщенный план по методу случайного баланса. Подробное описание данного метода изложено в работе [270].

С целью определения влияния выбранных факторов и уровней их варьирования на величину изменения размеров фланцев трамвайного рельса, при полном факторном эксперименте составит $4 \cdot 3^2 \cdot 2^3 = 288$ экспериментов.

По разработанному плану были выполнены численные эксперименты в программном комплексе Deform-3D согласно расчетным схемам эксперимента, указанного на рисунке 3.10. Для характеристики формы очага деформации использовали безразмерные величины с учетом исследований [260, 261]. По каждой полученной модели производился замер поперечного сечения раската по подошве в точках П1, П2, П3 и по головке в точках Г1, Г2, Г3 (рисунок 2.21, 2.22). По полученным размерам определили коэффициент приращения и утяжки головки β_2 и подошвы β_n по следующим формулам [165, 260]:

$$\beta_n = \frac{\Pi 1}{H_{n1}} \div \frac{\Pi 2}{H_{n2}} \div \frac{\Pi 3}{H_{n3}}; \quad \beta_z = \frac{\Gamma 1}{H_{z1}} \div \frac{\Gamma 2}{H_{z2}} \div \frac{\Gamma 3}{H_{z3}},$$

где $\Pi 1$, $\Pi 2$, $\Pi 3$, $\Gamma 1$, $\Gamma 2$, $\Gamma 3$ – измеряемые размеры в соответствующих точках по подошве и головке профиля, мм.

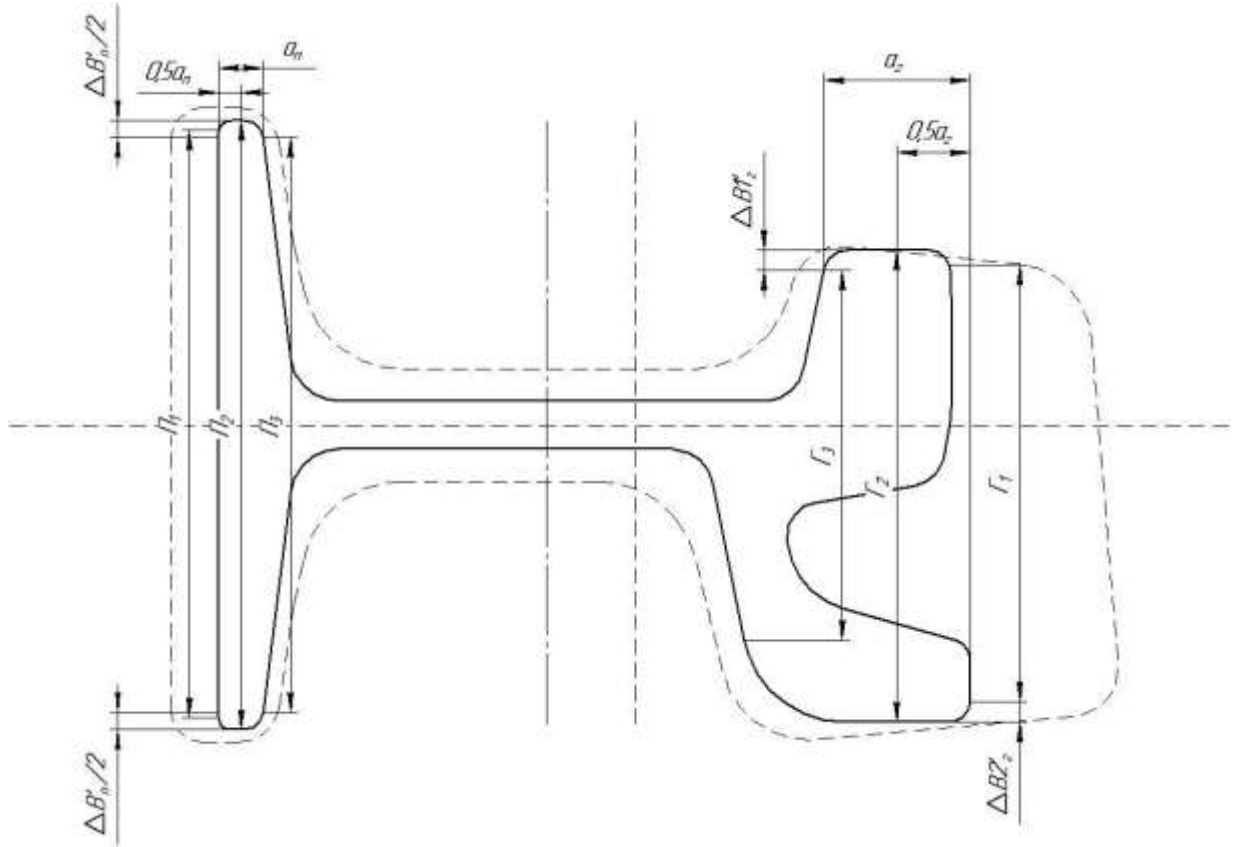


Рисунок 2.21 – Схема измерения фланцев профиля в характерных точках (пунктиром показан профиль раската с клетки BD-2; сплошной линией показан чистовой калибр UF)

По итогам проведенного компьютерного моделирования получены результаты исследований по изменению размеров фланцев профиля, которые приведены в таблице 2.2. Как показали полученные результаты исследований, наиболее эффективными с точки зрения изменения размеров фланцев являются эксперименты № 3, 13, 14. Эффективным изменением размера фланцев является коэффициент, значение которого максимально приближено к единице. Проверка этих трех вариантов будет рассчитана в дальнейшем при проведении исследований силовых условий прокатки.

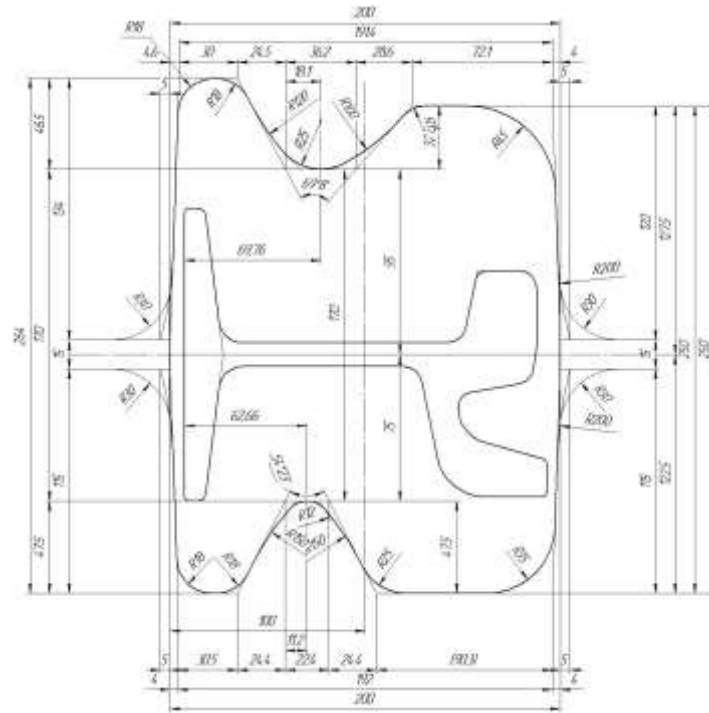


Рисунок 2.22 – Сравнение поперечных сечений раскатов после первого разрезного калибра в VD-2 и чистового калибра UF

Таблица 2.2 – Расчетные коэффициенты приращения и утяжки фланцев в характерных точках

Номер эксперимента	$\beta_{п1}$	$\beta_{п2}$	$\beta_{п3}$	$\beta_{г1}$	$\beta_{г2}$	$\beta_{г3}$	$\beta_{п}$	$\beta_{г}$
1	0,98	0,98	1,01	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99
2	1,06	1,11	1,07	0,87	1,07	1,42	1,08	1,12
3	0,98	0,98	1,00	0,99	0,98	0,98	0,99	0,99
4	0,91	1,02	0,97	0,86	1,03	1,15	0,97	1,01
5	1,06	1,12	1,15	0,83	0,97	0,98	1,11	0,93
6	0,85	0,94	0,85	0,88	1,03	1,31	0,88	1,08
7	0,75	0,85	0,78	1,01	0,97	0,99	0,79	0,99
8	1,18	1,15	1,19	0,83	1,00	1,09	1,17	0,97
9	1,12	1,13	1,17	0,87	0,98	1,05	1,14	0,97
10	0,92	0,98	0,93	0,84	1,00	1,39	0,94	1,08
11	0,72	0,86	0,81	0,98	0,95	1,00	0,79	0,98
12	0,96	1,03	0,94	0,88	1,05	1,20	0,98	1,04
13	1,00	0,99	1,02	0,99	1,00	1,05	1,00	1,01
14	1,03	1,01	1,00	0,97	1,03	1,00	1,01	1,00
15	0,96	0,99	0,97	0,98	0,95	0,95	0,98	0,96
16	0,94	1,03	0,93	0,86	1,03	1,15	0,97	1,01
$\overline{\beta}$	0,96	1,01	0,99	0,90	1,00	1,11	0,99	1,01

Выбранная модель для главных эффектов [270, 271]:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^6 b_i x_i + \sum_{i=1}^3 b_{ii} z_i + b_{111} q_1. \quad (1)$$

Коэффициенты b находятся по следующим формулам:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N x_{0u} y_u}{\sum x_{0u}^2}; \quad b_1 = \frac{\sum_{u=1}^N x_{1u} y_u}{\sum x_{1u}^2};$$

$$b_2 = \frac{\sum_{u=1}^N x_{2u} y_u}{\sum x_{2u}^2}; \quad b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} y_u}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}, \quad (2)$$

где $i = 0, 1, 2, \dots, k$, – номер фактора.

Обозначим $\beta_n = y_n$, $\alpha \beta_z = y_z$, получим для фланца подошвы:

$$\begin{aligned} \sum x_0 y_n &= 15,78; \quad \sum x_0^2 = 16; \\ \sum x_1 y_n &= 2,49; \quad \sum x_1^2 = 50,72; \\ \sum x_2 y_n &= 0,21; \quad \sum x_2^2 = 11,76; \\ \sum x_3 y_n &= 5,17; \quad \sum x_3^2 = 25,48; \\ \sum x_4 y_n &= 614,86; \quad \sum x_4^2 = 24327,04; \\ \sum x_5 y_n &= 0,32; \quad \sum x_5^2 = 16; \\ \sum x_6 y_n &= 17,6; \quad \sum x_6^2 = 16; \\ \sum z_1 y_n &= -869,51; \quad \sum z_1^2 = 60187,92; \\ \sum z_2 y_n &= -0,76; \quad \sum z_2^2 = 159,63; \\ \sum z_3 y_n &= -175,85; \quad \sum z_3^2 = 5784,36; \\ \sum z_4 y_n &= -318510,66; \quad \sum z_4^2 = 9874836989,29; \\ \sum q_1 y_n &= 217,79; \quad \sum q_1^2 = 5923,08. \end{aligned}$$

Оценки коэффициентов получаем следующие: $b_{n0} = 0,99$; $b_{n1} = 0,049$;
 $b_{n2} = 0,02$; $b_{n3} = 0,2$; $b_{n4} = 0,03$; $b_{n5} = 0,02$; $b_{n6} = 1,1$; $b_{n11} = -0,014$;
 $b_{n22} = -0,005$; $b_{n33} = -0,03$; $b_{n44} = -0,00003$; $b_{n111} = 0,04$.

Дисперсии оценок коэффициентов рассчитано по формуле:

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}, \quad (3)$$

где S_y^2 – дисперсия эксперимента.

Произведя несложные расчеты, получим:

$$S_{bn_0}^2 = S_{bn_5}^2 = S_{bn_6}^2 = 0,001; \quad S_{bn_0} = S_{bn_5} = S_{bn_6} = 0,033;$$

$$S_{bn_1}^2 = 0,0003; S_{bn_1} = 0,018;$$

$$S_{bn_2}^2 = 0,0015; S_{bn_2} = 0,038;$$

$$S_{bn_3}^2 = 0,00069; S_{bn_3} = 0,026;$$

$$S_{bn_4}^2 = 0,0000007; S_{bn_4} = 0,00084;$$

$$S_{bn_{11}}^2 = 0,0000003; S_{bn_{11}} = 0,0005;$$

$$S_{bn_{22}}^2 = 0,0001; S_{bn_{22}} = 0,01;$$

$$S_{bn_{33}}^2 = 0,000003; S_{bn_{33}} = 0,002;$$

$$S_{bn_{44}}^2 = 0; S_{bn_{44}} = 0;$$

$$S_{bn_{111}}^2 = 0,000003; S_{bn_{111}} = 0,002.$$

Доверительные интервалы оценок коэффициентов определили по формуле:

$$\Delta_{b_i} = t_{\alpha}; f_1 S_{b_i}, \quad (4)$$

где t – критерий Стьюдента, в зависимости от уровня значимости α и числа степеней свободы f_1 при определении дисперсии эксперимента S_y^2 ;

S_{b_i} - среднеквадратичная ошибка в определении коэффициента регрессии.

Получаем при $\alpha = 0,05$ и $f_1 = 10$ значение критерия $t_{0,05;10} = 2,23$. Следовательно: $\Delta_{bn_0} = \Delta_{bn_5} = \Delta_{bn_6} = 0,074$; $\Delta_{bn_1} = 0,04$; $\Delta_{bn_2} = 0,085$; $\Delta_{bn_3} = 0,06$; $\Delta_{bn_4} = 0,002$; $\Delta_{bn_{11}} = 0,001$; $\Delta_{bn_{22}} = 0,02$; $\Delta_{bn_{33}} = \Delta_{bn_{111}} = 0,004$; $\Delta_{bn_{44}} = 0$.

Поскольку коэффициенты $b_{n_0}, b_{n_1}, b_{n_3}, b_{n_4}, b_{n_6}, b_{n_{11}}, b_{n_{33}}, b_{n_{44}}, b_{n_{111}}$ по абсолютной величине больше своих доверительных интервалов, их следует признать статистически значимыми при 5% уровне значимости. Остальные коэффициенты являются статистически незначимыми, и в модель их можно не включать [265, 342, 343].

Таким образом, получено следующее уравнение регрессии для нахождения требуемых размеров фланцев подошвы:

$$\beta_n = (0,99 + 0,049x_1 + 0,2x_3 + 0,03x_4 + 1,1x_6 - 0,014z_1 - 0,03z_3 - 0,3 \cdot 10^{-4}z_4 + 0,04q_1)/1 \cdot 10^5. \quad (5)$$

Полученное уравнение для нахождения β_n характеризуется коэффициентом множественной корреляции 0,998, значимость которого проверена по критерию Фишера $F_p = 64,6$, значение критерия, при уровне значимости $\alpha = 0,05$, имеем $F_{табл} = 3,11$. Поскольку $F_p > F_{табл}$, то с вероятностью 95% можно утверждать, что полученное уравнение является адекватным и позволяет с указанной достоверностью предсказывать экспериментальные результаты.

Коэффициенты регрессии показывают степень влияния каждой из переменных на изменение размеров фланца подошвы профиля. Наиболее значимым для изменения размера подошвы является величина обжатия горизонтальными валками внутренней части подошвы и обжатия шейки профиля. Также значительным фактором (второй по величине значимости) на изменение размера подошвы оказывает обжатие гладкого валка по подошве (X_3), а в третью величину влияет температура прокатки и разрезка головки профиля.

По аналогии с расчетами для подошвы получаем следующие значения для головки профиля:

$$\sum x_0 y_2 = 16,1; \sum x_0^2 = 16;$$

$$\sum x_1 y_2 = 26,18; \sum x_1^2 = 50,72;$$

$$\sum x_2 y_2 = 0,02; \sum x_2^2 = 11,76;$$

$$\sum x_3 y_2 = 0,37; \sum x_3^2 = 25,48;$$

$$\sum x_4 y_2 = 627,48; \sum x_4^2 = 24327,04;$$

$$\sum x_5 y_2 = 0,08; \sum x_5^2 = 16;$$

$$\sum x_6 y_2 = -4; \sum x_6^2 = 16;$$

$$\sum z_1 y_2 = -915,37; \sum z_1^2 = 60187,92;$$

$$\sum z_2 y_2 = 0,06; \sum z_2^2 = 159,63;$$

$$\sum z_3 y_2 = -160,61; \sum z_3^2 = 5784,36;$$

$$\sum z_4 y_2 = -399967,77; \sum z_4^2 = 9874836989,29;$$

$$\sum q_1 y_2 = 235,6; \sum q_1^2 = 5923,08.$$

Оценки коэффициентов получены следующие: $b_{z_0} = 1,01$; $b_{z_1} = 0,52$;
 $b_{z_2} = 0,002$; $b_{z_3} = 0,014$; $b_{z_4} = 0,03$; $b_{z_5} = 0,005$; $b_{z_6} = -0,25$; $b_{z_{11}} = -0,02$;
 $b_{z_{22}} = 0,0004$; $b_{z_{33}} = -0,03$; $b_{z_{44}} = -0,000004$; $b_{z_{111}} = 0,04$.

Дисперсии оценок:

$S_{b_{z_0}}^2 = S_{b_{z_5}}^2 = S_{b_{z_6}}^2 = 0,00025$; $S_{b_{z_0}} = S_{b_{z_5}} = S_{b_{z_6}} = 0,016$; $S_{b_{z_1}}^2 = 0,00008$; $S_{b_{z_1}} = 0,009$; $S_{b_{z_2}}^2 = 0,0003$; $S_{b_{z_2}} = 0,018$; $S_{b_{z_3}}^2 = 0,00016$; $S_{b_{z_3}} = 0,013$;
 $S_{b_{z_4}}^2 = 0,0000002$; $S_{b_{z_4}} = 0,0004$; $S_{b_{z_{11}}}^2 = 0,00000007$; $S_{b_{z_{11}}} = 0,0003$;
 $S_{b_{z_{22}}}^2 = 0,00003$; $S_{b_{z_{22}}} = 0,005$; $S_{b_{z_{33}}}^2 = 0,0000007$; $S_{b_{z_{33}}} = 0,0008$;
 $S_{b_{z_{44}}}^2 = 0$; $S_{b_{z_{44}}} = 0$; $S_{b_{z_{111}}}^2 = 0,0000007$; $S_{b_{z_{111}}} = 0,0008$.

Доверительные интервалы оценок коэффициентов:

$\Delta_{b_{z_0}} = \Delta_{b_{z_5}} = \Delta_{b_{z_6}} = 0,036$; $\Delta_{b_{z_1}} = 0,02$; $\Delta_{b_{z_2}} = 0,04$; $\Delta_{b_{z_3}} = 0,029$; $\Delta_{b_{z_4}} = 0,0009$;
 $\Delta_{b_{z_{11}}} = 0,0007$; $\Delta_{b_{z_{22}}} = 0,011$; $\Delta_{b_{z_{33}}} = \Delta_{b_{z_{111}}} = 0,002$; $\Delta_{b_{z_{44}}} = 0$.

Коэффициенты $b_{z_0}, b_{z_1}, b_{z_3}, b_{z_4}, b_{z_6}, b_{z_{11}}, b_{z_{33}}, b_{z_{44}}, b_{z_{111}}$ по абсолютной величине больше своих доверительных интервалов, их следует признать статистически значимыми при 5% уровне значимости. Остальные коэффициенты являются статистически незначимыми, и в модель их можно не включать. Получено следующее уравнение регрессии для нахождения требуемых размеров фланца головки профиля:

$$\beta_z = (1,01 + 0,52x_1 + 0,014x_3 + 0,03x_4 - 0,25x_6 - 0,02z_1 - 0,03z_3 - 0,4 \cdot 10^{-5}z_4 + 0,04q_1)/1 \cdot 10^5 \quad (6)$$

Полученное уравнение для нахождения β_z характеризуется коэффициентом множественной корреляции 0,998, значимость которого также проверена по критерию Фишера $F_p = 15,96$, значение критерия, при уровне значимости $\alpha = 0,05$ имеем $F_{табл} = 3,11$. $F_p > F_{табл}$, следовательно, с вероятностью 95% полученное уравнение является адекватным и позволяет с указанной достоверностью предсказывать экспериментальные результаты.

Анализируя полученное уравнение, стоит отметить, что изменение размера головки не зависит от диаметра разрезного и гладкого вала. Больше всего

зависит от глубины внедрения разрезного валка и во вторую очередь от обжатия горизонтальными валками внутренней части головки. Меньше всего воздействуют обжатия гладкого валка и температура прокатки. Стоит отметить, что температура прокатки (фактор X_4) является одинаково значимой с коэффициентом 0,03, квадратичной функции от X_3 с коэффициентом 0,03, а также кубическая функция от X_1 и для головки и подошвы.

Если рассматривать калибр в целом, то возможно рассчитать технологию прокатки, обеспечивая равенство изменения размеров головки и подошвы профиля, варьируя пятью факторами – это диаметр разрезного валка, диаметр валка со стороны подошвы, глубина внедрения разрезного валка, величина обжатия со стороны валка подошвы и величина соотношения смещаемых объемов металла от вертикальных валков, решая следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_n = y_n = (0,99 + 0,049x_1 + 0,2x_3 + 0,03x_4 + 1,1x_6 - 0,014z_1 - 0,03z_3 - \\ 0,3 \cdot 10^{-4}z_4 + 0,04q_1)/1 \cdot 10^5; \\ \beta_2 = y_2 = (1,01 + 0,52x_1 + 0,014x_3 + 0,03x_4 - 0,25x_6 - 0,02z_1 - 0,03z_3 - \\ - 0,4 \cdot 10^{-5}z_4 + 0,04q_1)/1 \cdot 10^5. \end{array} \right. \quad (7)$$

Переведем z_1 в x_1 , z_3 в x_3 , z_4 в x_4 , q_1 в x_1 .

$$z_1 = x_1^2 - 34,98x_1 - 3,1713,$$

$$z_3 = 0,66(x_3^2 - 26,56x_3 - 1,6875),$$

$$z_4 = x_4^2 - 624,5x_4 - 1520,44,$$

$$q_1 = x_1^3 + 2,31x_1^2 - 0,028x_1 + 0,4.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_n = (0,99 + 0,49x_1 + 0,2x_3 + 0,03x_4 + 1,1x_6 - 0,014(x_1^2 - 34,98x_1 - 3,1713) - \\ - 0,02(x_3^2 - 26,56x_3 - 1,6875) - 0,3 \cdot 10^{-4}(x_4^2 - 624,5x_4 - 1520,44) + \\ + 0,04(x_1^3 + 2,31x_1^2 - 0,028x_1 + 0,4))/1 \cdot 10^5; \\ \beta_2 = (1,01 + 0,52x_1 + 0,014x_3 + 0,03x_4 - 0,25x_6 - 0,02(x_1^2 - 34,98x_1 - 3,1713) - \\ - 0,02(x_3^2 - 26,56x_3 - 1,6875) - 0,4 \cdot 10^{-5}(x_4^2 - 624,5x_4 - 1520,44) + \\ + 0,04(x_1^3 + 2,31x_1^2 - 0,028x_1 + 0,4))/1 \cdot 10^5. \end{array} \right. \quad (8)$$

Запишем: $x_1 = h_2$ – глубина внедрения разрезного валка, мм; $x_2 = D_p$ – диаметр разрезного валка, мм; $x_3 = \Delta h_{II}$ – обжатие гладкого валка по подошве, мм; $x_4 = t$

– температура прокатки, °С; $x_5 = D_2$ – диаметр гладкого валка, мм; $x_6 = D$ – диаметр горизонтальных валков, мм.

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_n = (0,99 + 0,49h_2 + 0,2\Delta h_{\Pi} + 0,03t + 1,1D - 0,014(h_2^2 - 34,98h_2 - 3,1713) - \\ - 0,02(\Delta h_n^2 - 26,56\Delta h_{\Pi} - 1,6875) - 0,3 \cdot 10^{-4}(t^2 - 624,5t - 1520,44) + \\ + 0,04(h_2^3 + 2,31h_2^2 - 0,028h_2 + 0,4))/1 \cdot 10^5; \quad (8) \\ \beta_2 = (1,01 + 0,52h_2 + 0,014\Delta h_{\Pi} + 0,03t - 0,25D - 0,02(h_2^2 - 34,98h_2 - 3,1713) - \\ - 0,02(\Delta h_n^2 - 26,56\Delta h_{\Pi} - 1,6875) - 0,4 \cdot 10^{-5}(t^2 - 624,5t - 1520,44) + \\ + 0,04(h_2^3 + 2,31h_2^2 - 0,028h_2 + 0,4))/1 \cdot 10^5. \end{array} \right.$$

Полученные уравнения позволяют определить требуемые размеры фланцев трамвайного рельса при прокатке в четырехвалковых калибрах. Для получения профиля, соответствующего требованиям ГОСТ Р 55941 – 2014, при расчетах коэффициентов изменения размеров фланцев требуется выполнение условия: $\beta_{\Pi} = \beta_{\Gamma} = 0,99 \div 1,01$.

Анализируя полученные данные, стоит отметить, что у подошвы максимальная склонность к утяжке у коэффициента $\overline{\beta_{n1}} = 0,96$, а $\overline{\beta_{n2}} = 1,01$ имеет максимальную склонность к приращению, при этом для головки максимальное приращение соответствует $\overline{\beta_{23}} = 1,11$, а максимальная склонность к утяжке $\overline{\beta_{21}} = 0,9$.

Получены уравнения регрессии, описывающие абсолютное изменение размеров фланцев ΔB , которое определяется по формулам:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta B_{\Pi} = -0,0408\beta_{\Pi}^2 + 0,1798\beta_{\Pi} + 0,817; \\ \Delta B_{\Gamma} = 0,004\beta_{\Gamma}^2 + 0,0909\beta_{\Gamma} + 0,8054 \end{array} \right. ; \quad (9)$$

у полученных уравнений коэффициент детерминации $R^2 = 0,99$.

В связи с тем что после первого четырехвалкового калибра (UR-1) раскат обжимается вспомогательным калибром ER-1 на величину ΔB , полученную в калибре UR-1, а последующие проходы чередуются, как ER-2–UR-2 и UR-3–EF–UF, следовательно, фланцы профиля получают без утяжки, а их высотные размеры будут сохранены постоянными для всех калибров чистой группы тандем.

В изученной области определения влияния факторов на величину изменения размеров фланцев профиля получили 3 эффективных варианта – это эксперименты: №3 ($D_p=840$; $D_n=800$; $h_p=80$; $h_n=11,91$); №13 ($D_p=840$; $D_n=800$; $h_p=20$; $h_n=1,52$) и №14 ($D_p=840$; $D_n=650$; $h_p=60$; $h_n=11,91$). При этом соотношение коэффициентов изменения размеров фланцев составляет 0,99, 1,01 и 1,01 соответственно (рисунок 2.29, 2.30, 2.31, 2.32, 2.33).

Проведя исследования по изучению и установлению закономерностей требуемых размеров фланцев трамвайного рельса, применение методов планирования эксперимента и моделирования методом конечных элементов позволило установить закономерности и выявить влияние геометрических факторов калибра на формоизменение фланцев профиля. В результате проведенного моделирования методом конечных элементов получены следующие результаты и закономерности:

- уравнения регрессии по нахождению коэффициентов изменения размеров фланцев подошвы и головки трамвайного рельса в зависимости от диаметра вертикальных и горизонтальных валков, величины обжатия по элементам профиля и температуры;
- контур свободных поверхностей фланцев характеризуется переменным коэффициентом изменения размеров подошвы и головки профиля, а используя полученные уравнения возможно получить эффективное соотношение коэффициентов приращения-утяжки фланцев профиля;
- используя полученные уравнения возможно разработать калибровку, позволяющую обеспечить геометрию профиля трамвайного рельса согласно требованиям ГОСТ. Наиболее эффективным является вариант, при котором разрезка головки трамвайного рельса осуществляется в четырех калибрах, при этом разрезка в первом калибре является максимальной.

2.3 Точность расчета силы прокатки и определение площадей контактной поверхности металла с валками

В данном разделе приведены результаты по нахождению геометрического очага деформации. В работе [172]: «Пространство, ограниченное сверху и снизу дугами захвата, боковыми гранями полосы и плоскостями входа и выхода металла из валков, называется геометрическим очагом (зоной) деформации». Из определения геометрического очага деформации следует, что такие параметры как температура и ее равномерность по сечению полосы, скорость прокатки и деформации, материал полосы при горячей прокатке, состояние поверхности валков, модель трения на него не влияют. Данные факторы учитывает фактический очаг деформации.

Проведены исследования по определению контактной площади металла с валками в геометрическом очаге деформации. Исследование проводили на калибрах, оказывающих определяющее значение на формоизменение раската, обеспечивающих геометрию готового профиля – это первый разрезной калибр (8 проход), последний рельсовый калибр в черновой клетке (12 проход) и первый разрезной калибр головки рельса чистовой группы клетей (13 проход). При определении контактной площади использовали графический пакет Компас-3D [344].

Произведена оценка критерия эффективности деформации металла, предложенного Павловым И.М. и Зайцевым М.Л., который представляет собой отношение смещенных объемов металла в длину $V_{\text{выт}}$ и по высоте $V_{\text{см}}$ [60]:

$$K_{\text{эф}} = \frac{V_{\text{выт}}}{V_{\text{см}}} = 1 - \mu \frac{F_{\text{уш}}}{F_{\text{см}}}$$

где μ – коэффициент вытяжки;

$F_{\text{уш}}$ – часть площади поперечного сечения, смещенной в ширину;

$F_{\text{см}}$ – смещенная площадь проекции металла по высоте.

Смещаемым объемом верхней/нижней части очага деформации принят смещаемый объем металла верхним/нижним ручьем калибра относительно

нейтральной линии калибра (НЛК). Термин «смещенный объем металла» применен в работе [275]. Исходя из принятых определений, та часть калибра, которая находится выше НЛК, в диссертации названа верхней, которая ниже НЛК, соответственно нижней. Данная терминология употреблена по аналогии с материалом, изложенным в работе [165].

2.3.1 3D-метод определения площади контактных поверхностей металла с валками

Площадь контактной поверхности является одной из величин, которая необходима для расчета важнейшей характеристики процесса прокатки – силы прокатки. Сила прокатки является одной из основополагающих величин, с помощью которой производится расчет энергосиловых параметров прокатки и прочностных расчетов станины, прокатных валков, шпинделей, выбор главного привода прокатного стана, моментов и мощности прокатки, расхода электроэнергии и т.д., поэтому точность расчета площади контактной поверхности определяет корректность расчета процесса прокатки и выбор оборудования прокатного стана.

Как отмечалось в главе 1, в настоящее время площадь контактной поверхности рассчитывается в упрощенном виде как произведение длины дуги контакта на среднюю ширину полосы ($F_k = l_d \cdot b_{cp}$). Данный подход эффективен для простых калибров. Очевидно, что по данной формуле невозможно точно оценить площадь контактной поверхности металла с валками в калибрах сложной формы. Для этого существует ряд формул и методов, предложенных Дроздом В.Г., Смирновым В.С., Зюзиным В.И., Кривенцовым А.М., Динником А.А., Синельниковым Ю.И., Цоухар Г., или по методу Симпсона. Однако они не дают требуемой точности при расчете площади контактной поверхности металла с валками в калибрах сложной формы – асимметричных рельсовых калибрах. Для таких калибров формулы расчета площади контактной поверхности металла с

валками отсутствуют, поскольку каждая калибровка профиля является уникальным продуктом.

Предложен новый 3D-метод нахождения контактных площадей металла с валками, который в сравнении с известными методами (графическим, аналитическим и графоаналитическим) позволяет:

- уменьшить временные затраты на расчет;
- повысить точность расчета.

Основные отличия и преимущества данного метода по сравнению с известными состоят в следующем:

- применение компьютерных программ трехмерного твердотельного моделирования;
- позволяет рассчитать площади контактной поверхности металла с валками в геометрическом очаге деформации с высокой точностью (на 25 – 30% точнее в сравнении с известными), также позволяет рассчитать смещаемые объемы металла;
- снижение времени расчетов по сравнению с существующими в 30 раз (предложенный метод позволяет сделать точный расчет за 15 мин.).

Разработан четвертый метод определения площади контактной поверхности металла с валком в геометрическом очаге деформации. Предложенный метод состоит из следующих шагов:

- 1) разрабатываются 3-D модели калиброванных валков;
- 2) разрабатывается 3-D модель задаваемого раската;
- 3) строится 3-D сборка калибра и позиционируется задаваемый раската;
- 4) 3-D сборка экспортируется главным видом в 2-D;
- 5) выполняются разрезы по требуемым поверхностям;
- 6) производится расчет проекций площади контактных поверхностей металла с валками на плоскости OX, OY, OZ;
- 7) анализируются степень деформации металла по элементам профиля и контактные площади металла с валками, которые необходимы для расчета полного усилия прокатки.

Имеющиеся методы расчета площади контактной поверхности металла с валками в геометрическом очаге деформации не позволяют ее точно рассчитать для сложных фланцевых профилей, вследствие чего возникают значительные неточности в расчете силы прокатки, которая определяет требуемые мощности, выбор оборудования, конструкцию клетки, прокатных валков и т.д.

Исходя из вышеизложенного, предложенный метод имеет не только теоретическое, но и прикладное значение.

2.3.2 Применение разработанного 3D-метода определения площади контактных поверхностей металла с валками для расчета силы прокатки при калибровке асимметричных рельсовых профилей

Трамвайные рельсы.

На рисунке 2.23 приведена 3D-модель поперечного сечения раската по оси валков первого разрезного калибра (8-ой проход) с проекциями очага деформации. Из рисунка 2.23 а, видно, что захват металла валками осуществляется разрезным гребнем валков. Небольшую высотную деформацию получают части раската, из которых формируется головка и подошва профиля. На рисунке 2.23 б, приведено сечение калибра по оси валков с проекциями очага деформации от обжатия верхним и нижним горизонтальными валками. Как видно из рисунка 2.23 б, разрезные гребни верхнего и нижнего валков имеют разную высоту и разный угол наклона гребней, поэтому контактная площадь со стороны нижнего валка (верхняя часть рисунка) и верхнего валка (нижняя часть рисунка) различны и составляют $26503,5 \text{ мм}^2$ и $20195,9 \text{ мм}^2$ соответственно. В первом разрезном калибре объем верхней части очага деформации составляет $V_{\text{в}}=326\,756,34 \text{ мм}^3$, объем нижней части очага деформации составляет $V_{\text{н}}=542\,759,26 \text{ мм}^3$, различие верхнего и нижнего частей очага деформации составляет 1,66 раза. В верхней части калибра проекция длины очага деформации составляет 186,66 мм, а в нижней 231,95 мм, при этом различие в длинах

составляет 45,29 мм. Коэффициент вытяжки в 8-ом калибре составляет $\lambda=1,19$. Коэффициент эффективности калибра составляет 0,799 (таблица 2.3).

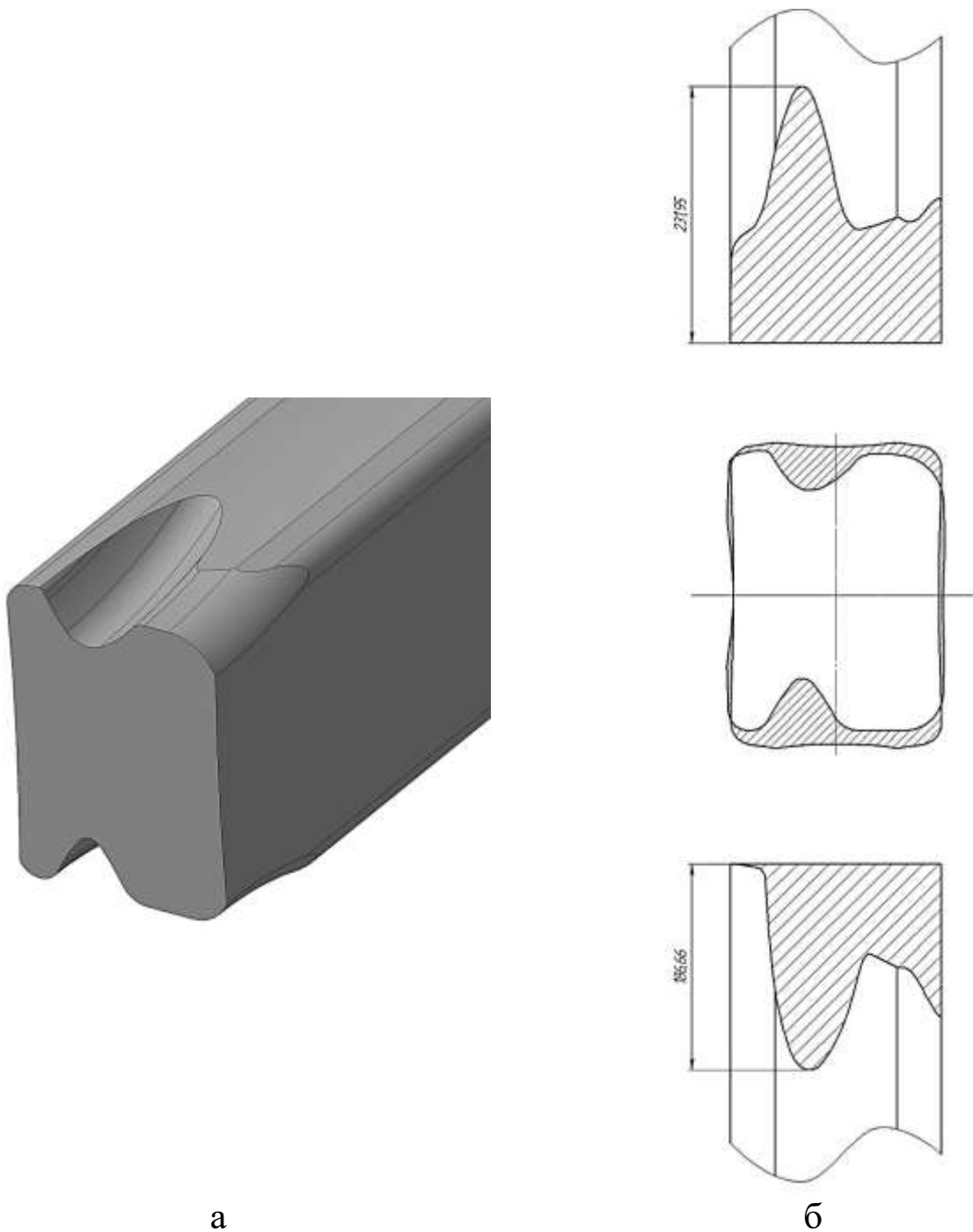


Рисунок 2.23 – Поперечное сечение раската по оси валков (8 проход):
 а – 3D модель с геометрическим очагом деформации; б – проекции
 геометрического очага деформации (штриховкой показаны проекции контактных
 площадей от верхнего и нижнего горизонтальных валков)

На рисунке 2.24 приведено поперечное сечение раската по оси валков с очагом деформации в 12-ом проходе. Из рисунка 2.24 а видно, что захват металла валками осуществляется боковыми поверхностями разрезных гребней валков. Наибольшую высотную деформацию получает металл со стороны нижнего валка. На рисунке 2.24 б приведено сечение калибра по оси валков с проекциями очага деформации. Как видно из рисунка 2.24 б, боковые поверхности разрезного гребня нижнего валка первыми вступают в контакт с металлом раската, поэтому на проекции контактной площади (верхняя часть рисунка) имеются характерные пики. Верхний валок более равномерно деформирует металл по высоте по сравнению с нижним. Контактная площадь со стороны нижнего валка (верхняя часть рисунка) и верхнего валка (нижняя часть рисунка) примерно равны и составляют 21516 мм^2 и $21630,7 \text{ мм}^2$ соответственно. Установлено, что объем верхней части очага деформации составляет $V_{\text{в}} = 135\,058,85 \text{ мм}^3$, объем нижней части очага деформации составляет $V_{\text{н}} = 237\,947,79 \text{ мм}^3$, различие объемов смещаемого металла составляет 1,76 раза. Также имеется значительное различие по геометрическим длинам очагов деформации, которые составляют для верхнего валка 133,65 мм, для нижнего валка 223,96 мм. Соприкосновение металла раската с нижним валком происходит на 90,31 мм раньше, чем с верхним. Коэффициент вытяжки 12-го калибра $\lambda = 1,17$, а коэффициент эффективности калибра составляет 0,654. Остальные полученные результаты представлены в таблице 2.3.

Общий коэффициент эффективности можно определить по уравнению [275]:

$$K_{\text{эф.общ}} = \frac{K_{\text{эф.1}} F_{\text{см.1}} + K_{\text{эф.2}} F_{\text{см.2}}}{F_{\text{см.1}} + F_{\text{см.2}}}$$

При сравнении рельсовых калибров (8 и 12 проход) наиболее эффективным является рельсовый разрезной калибр (8 проход), коэффициент эффективности этого калибра значительно выше, чем в калибре 12.

Проведя исследования, установлено, что в первом четырехвалковом разрезном калибре (рисунок 2.25) чистовой группы клетей, где происходит предварительная разрезка головки профиля, по всем обрабатываемым поверхностям существует

значительная неравномерность деформаций. Первым в контакт с металлом вступает вертикальный валок с разрезным гребнем, который осуществляет деформацию головки рельса (рисунок 2.25 а), при этом длина очага деформации составляет 189,8 мм. Вертикальный валок со стороны подошвы последним осуществляет обжатие, а длина очага деформации при этом составляет всего 34,8 мм.

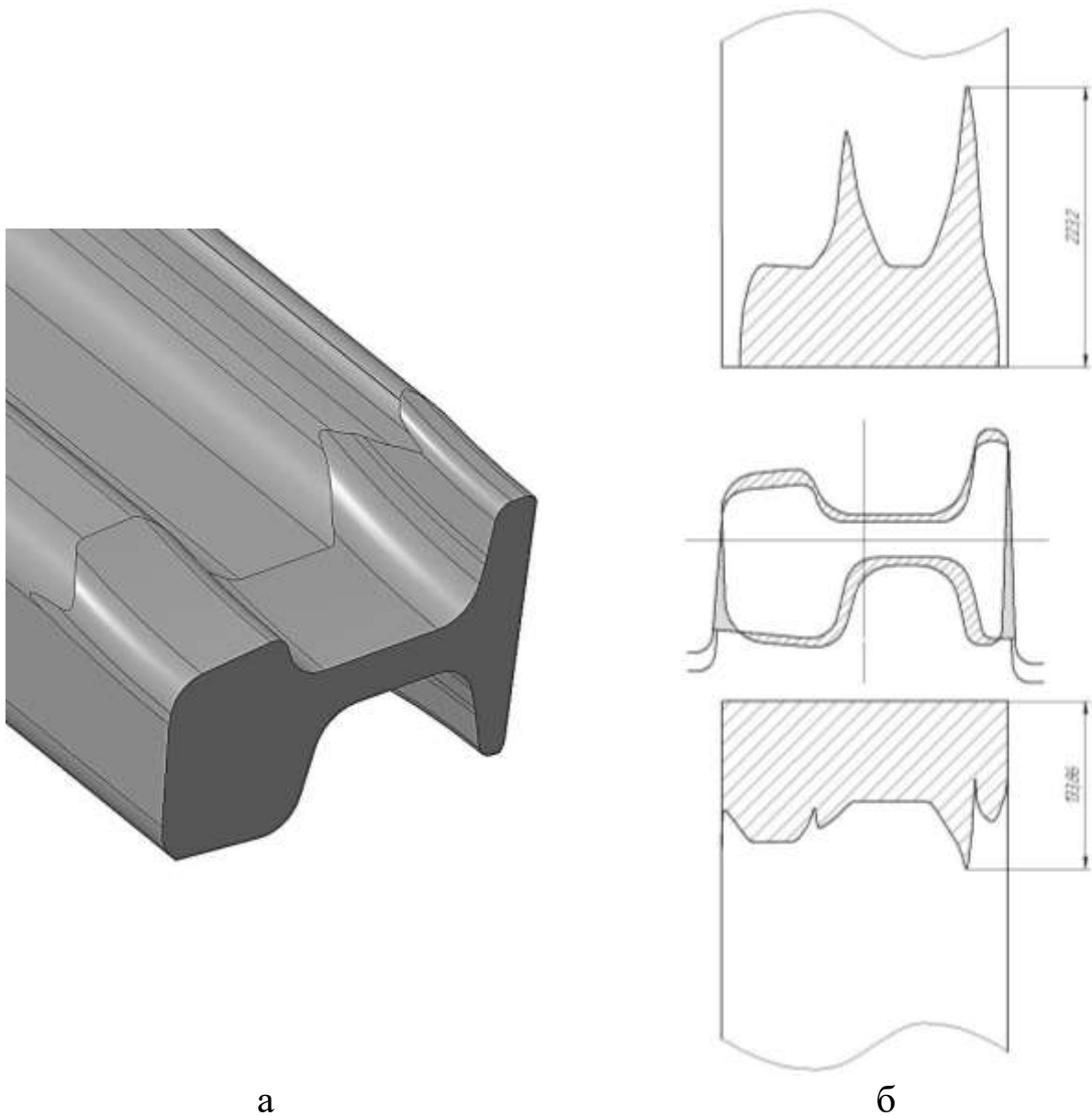


Рисунок 2.24 – Поперечное сечение раската по оси валков (12 проход):
 а – 3D модель с геометрическим очагом деформации; б – проекции геометрического очага деформации (штриховкой показаны деформируемые объемы металла)

Таблица 2.3 – Геометрические параметры очагов деформации при прокатке трамвайного рельса в калибрах клетки BD-2

Оцениваемый критерий	Новая технология прокатки			
	Первый разрезной калибр (8 проход)		Последний рельсовый калибр (12 проход)	
	Верх калибра	Низ калибра	Верх калибра	Низ калибра
Объем очага деформации, мм ³	326 756,34	542 759,26	135 058,85	237 947,79
Суммарный объем очагов деформации	869 515,6		373 006,64	
Геометрическая длина очага деформации, мм	186,66	231,95	133,65	223,96
Разность длин очагов деформации, мм	45,29		90,31	
Смещенная площадь по высоте, мм ²	3 442,69	4 748,45	2 052,41	2 569,87
Суммарная смещенная площадь по высоте, мм ²	8 191,14		4 622,28	
Площадь проекции очага деформации, мм ²	20 195,91	26 503,51	21 630,66	21 516,04
Коэф. вытяжки	1,19		1,17	
Площадь поперечного сечения, смещенная в ширину, мм ²	1 382,57		1 366,27	
Коэф. эффективности калибра	0,799		0,654	
Общий коэф. эффективности	0,747			

На рисунке 2.25 б видно, что со стороны верхнего валка (нижняя часть рисунка) и со стороны нижнего валка (верхняя часть рисунка) на эпюрах контактной площади наблюдаются два пика. Наличие пиков означает, что захват металла валками происходит боковыми поверхностями выступа валка и максимальная деформация наблюдается на радиусах перехода шейки и головки, а также шейки и подошвы соответственно. Максимальная длина очага деформации от обжатия нижним валком составляет 156,2 мм, от обжатия верхним валком 149,5 мм. Полученная форма проекций очага деформации от обжатия горизонтальными валками является наиболее приемлемой с точки зрения позиционирования раската в калибре за счет того, что раскат удерживается в четырех точках, тем самым обеспечивая его устойчивость в калибре при захвате раската, после чего происходит обжатие по всему периметру профиля. Объемы очага деформации распределились следующим образом: от нижнего валка $V_n = 47377,16 \text{ мм}^3$, от верхнего валка $V_v = 56310,44 \text{ мм}^3$, со стороны разрезного валка $V_p = 52135,67 \text{ мм}^3$, со стороны гладкого валка $V_r = 5153,77 \text{ мм}^3$. Коэффициент вытяжки составляет $\lambda=1,21$. Коэффициент эффективности деформации в данном калибре равен 1. В таблице 2.4 приведены результаты расчетов проекции площади контактной поверхности по методу «приведенной полосы» и полученных с помощью программы трехмерного моделирования.

Таблица 2.4 – Результаты расчетов проекции площади контактной поверхности по методу «приведенной полосы» и 3D-метода

Наименование параметра	Горизонтальные валки	Разрезной валок	Валок подошвы
Площадь контактной поверхности, м ²			
по общепринятым теоретическим формулам	0,0129	0,0219	0,0039
по результатам геометрических построений в программе Компас-3D	0,0097 и 0,0103	0,0099	0,0052

Проведено моделирование методом конечных элементов в программном комплексе Deform-3D с определением силы прокатки, после чего проведены промышленные прокатки с замерами усилий прокатки на действующем рельсобалочном стане в рассматриваемых калибрах. Полученные результаты представлены в таблице 2.5. Из таблицы 2.5 видно, что усилие прокатки, полученное путем моделирования в программном комплексе Deform-3D, отличается от фактических замеров не более, чем на 10 %. Эти данные свидетельствуют о высокой сходимости результатов компьютерного моделирования с результатами фактических замеров усилия прокатки. Наблюдается значительное различие экспериментальных данных усилий прокатки от полученных значений расчетным путем по методу «приведенной полосы». Так, для первого четырехвалкового калибра (UR-1) рассчитанные значения усилия прокатки больше, чем экспериментальные для горизонтальных валков в 1,37 раза, вертикального валка с разрезным гребнем в 2,2 раза, для вертикального валка со стороны подошвы в 1,3 раза.

Полученные значительные расхождения данных между теоретическими расчетами и экспериментальными результатами можно объяснить неточностью расчета площади контактной поверхности. Отношение значений контактных площадей, полученных по методу «приведенной полосы» и полученных путем моделирования в программном комплексе, составляет от 0,75 до 2,2 раза, причем с увеличением сложности поверхности различие в площадях становится больше. Поэтому предлагается, при проведении расчетов силы прокатки, применять разработанный в диссертации метод определения проекции площади контактной поверхности металла с валками.

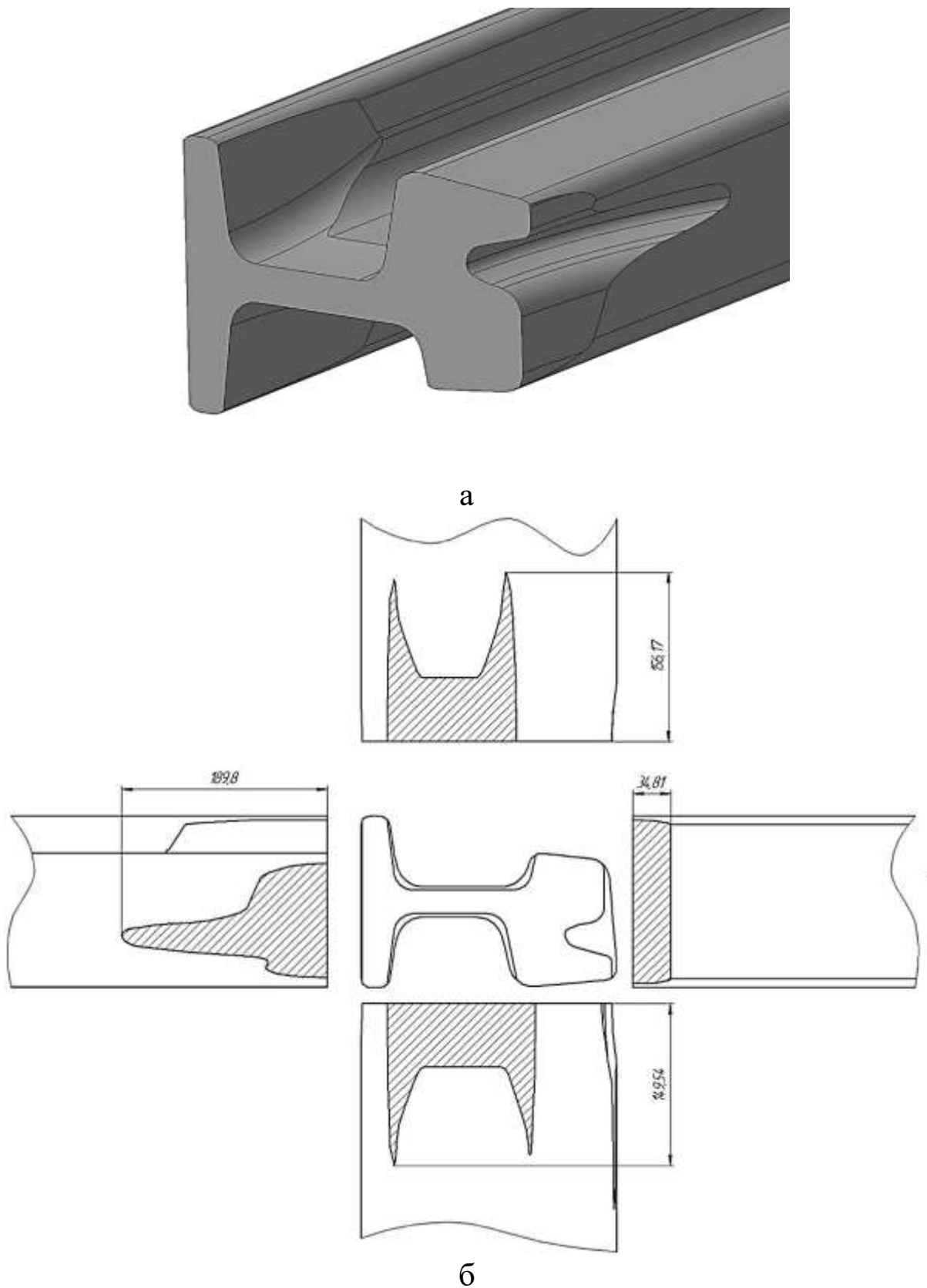


Рисунок 2.25 – Поперечное сечение раската по оси валков с геометрическим очагом деформации (13 проход): а – 3D модель с геометрическим очагом деформации; б – проекции геометрического очага деформации (штриховкой показаны деформируемые площади металла)

Можно отметить, что при проведении промышленных исследований экспериментально замеренные усилия прокатки на вертикальных валках калибра UR-1 имеют различные значения. Со стороны вертикального валка с разрезным гребнем усилие прокатки составляет 1,65 МН, а со стороны гладкого валка подошвы только 1,15 МН, что говорит о несбалансированности калибра и наличии горизонтальных усилий, действующих на приводные валки прокатного стана при разрезке головки профиля.

Проекции геометрических контактных поверхностей валков и прокатываемого металла в чистовом калибре UF приведены на рисунке 2.26.

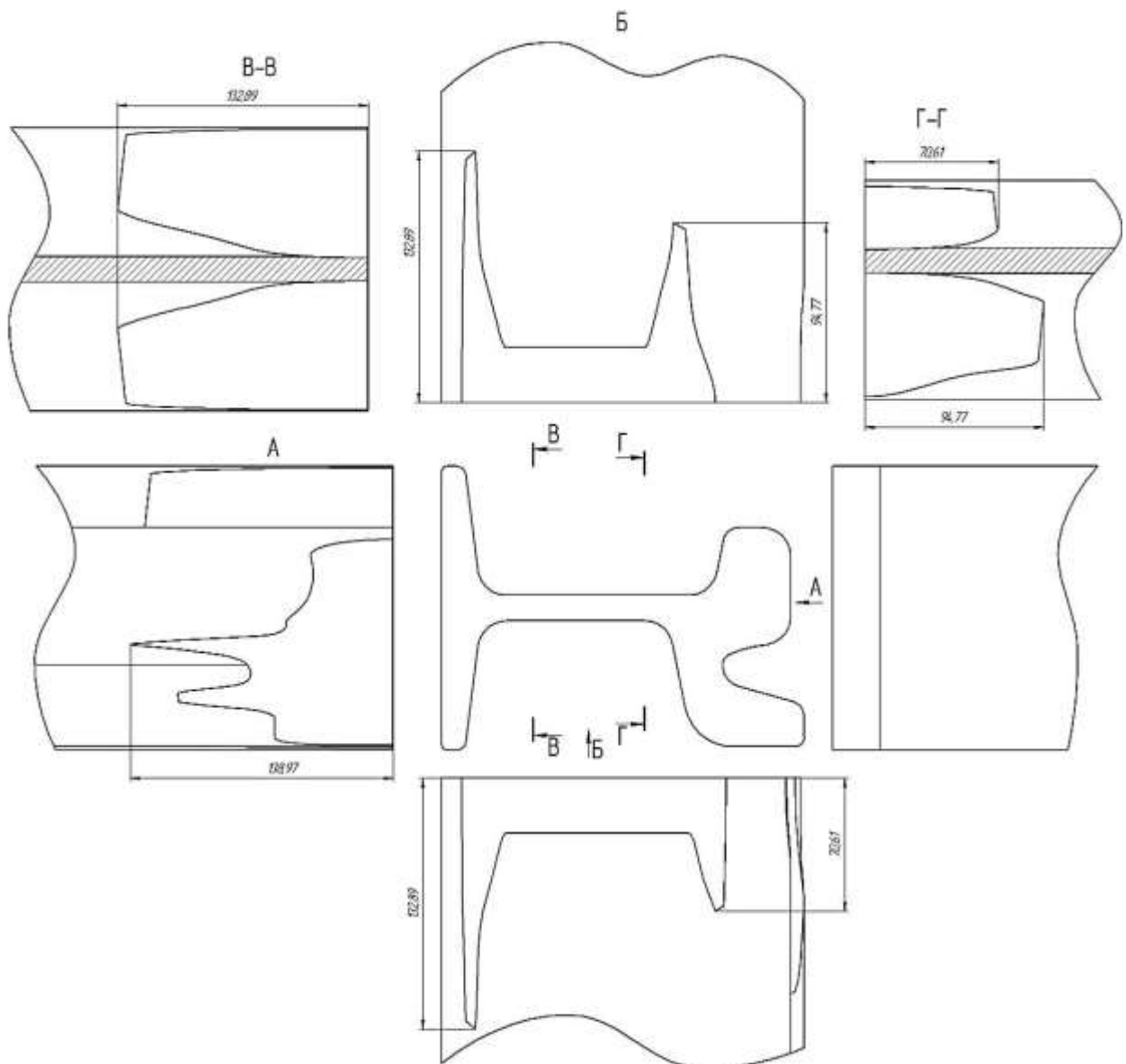


Рисунок 2.26 – Проекция контактных поверхностей геометрического очага деформации чистового калибра трамвайного рельса

Таблица 2.5 – Результаты теоретических и промышленных исследований усилия прокатки в существующей калибровке

Наименование параметра	Первый разрезной калибр (8-ой проход)	Последний рельсовый калибр (12-ый проход)	Первый калибр группы тандем (разрезка головки 13 проход)		
			Горизонтальные валки	Разрезной валок	Валок подошвы
Усилие прокатки, МН					
- по общепринятым теоретическим формулам [275]	10,2	5,26	3,16	3,7	1,5
- расчет в программном комплексе Deform-3D	6	4,3	2,4	1,5	1,1
- по результатам промышленных экспериментов	–	–	2,3	1,65	1,15
Погрешность расчетов (сравнение), %					
- по общепринятым теоретическим формулам и расчет в программном комплексе Deform-3D	41,18	18,25	24,05	59,46	26,67
- расчет в программном комплексе Deform-3D и по результатам промышленных экспериментов	–	–	4,17	10	4,55

Сложная форма и несимметричность профиля трамвайного рельса обуславливают его прокатку с неравномерными обжатиями, при этом необходимо стремиться к тому, чтобы неравномерная деформация по возможности осуществлялась в первых проходах, когда металл обладает наибольшей пластичностью и наименьшим сопротивлением деформации. В последних проходах неравномерность деформации должна быть наименьшей [60].

По результатам исследования контактной площади и усилия прокатки установлено: сила прокатки, полученная с применением предложенного 3D-метода определения контактной площади, с высокой сходимостью совпадает с результатами промышленного эксперимента и в 1,4 раза меньше, чем при использовании метода «приведенной полосы»; экспериментальные данные показали, что при прокатке горизонтальная сила со стороны вертикального вала с разрезным гребнем в 1,43 раза больше, чем сила со стороны вертикального вала подошвы; получены данные о последовательном заполнении очага деформации и контактные площади при прокатке трамвайного рельса.

Предложен метод определения геометрической контактной площади при прокатке сложных профилей с использованием программы трехмерного твердотельного моделирования.

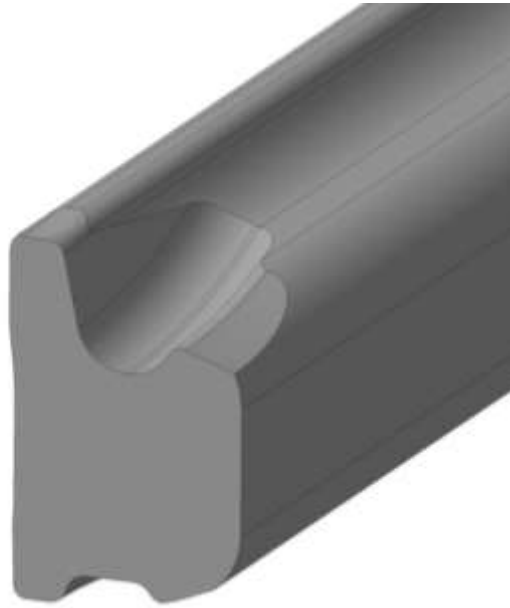
Проведя совместный анализ полученных результатов исследований установлено, что возможно разработать технологию обеспечивающую равенство сил (минимальное различие сил) прокатки между вертикальными валками $P_{\Gamma}/P_{\Pi} = 0,85 \div 1,19$ обеспечивая выполнение условия отношений смещаемых объемов металла вертикальными валками, в котором $V_p/V_{\Pi} = 3,22 \div 4,44$, при этом коэффициенты изменения размеров головки и подошвы профиля составляют $\beta_n = \beta_2 = 0,99 \div 1,01$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{P_{\Gamma}}{P_{\Pi}} = 0,85 \div 1,19 \\ \frac{V_p}{V_{\Pi}} = 3,22 \div 4,44 \\ \beta_{\Pi} = \beta_{\Gamma} = 0,99 \div 1,01 \end{array} \right.$$

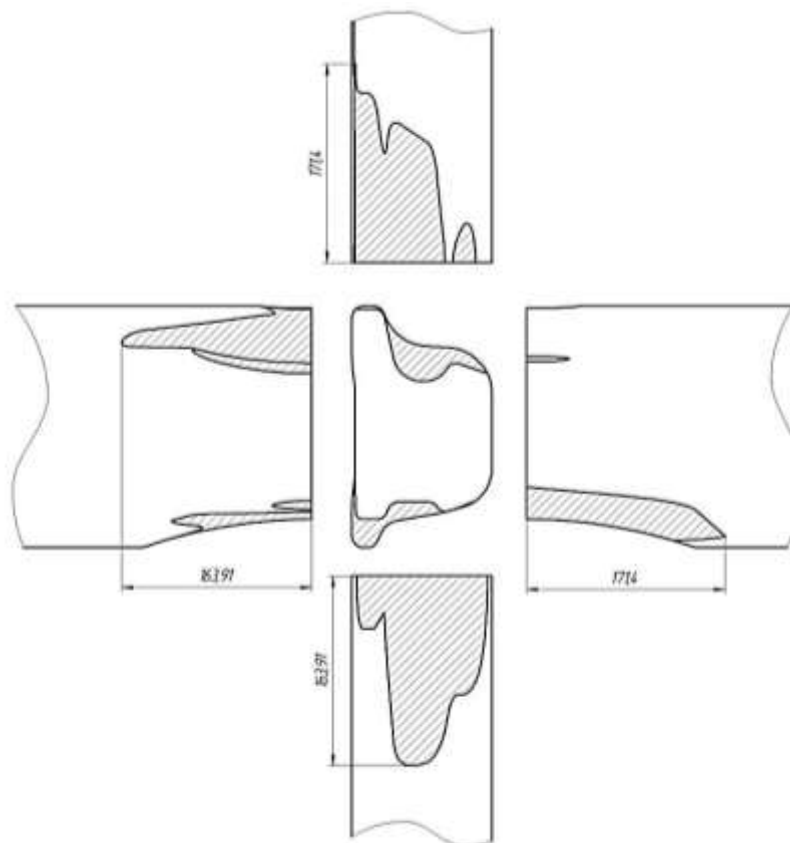
Остряковые рельсы.

Согласно разработанной методике определения площадей проекций контактных поверхностей металла с валками в геометрическом очаге деформации, проведено компьютерное моделирование по исследованию геометрического очага деформации при прокатке остряковых рельсов на стане с группой тандем, в состав которого входит чистовая непрерывная реверсивная группа клетей.

На рисунке 2.27 приведена 3D модель поперечного сечения раската по оси валков первого рельсового калибра клетки ВD-2 при прокатке ОР50. Различную высотную деформацию испытывает металл в верхней и нижней частях очага деформации преимущественно в местах образования шейки и подошвы, что обусловлено асимметрией профиля (рисунок 2,27 а). На рисунке 2,27 б приведено сечение калибра по оси валков с проекциями очага деформации на горизонтальную и вертикальную плоскость. Установлено, что первым в контакт с металлом вступает нижний горизонтальный валок на расстоянии 171,4 мм от оси валков. Различие в длинах проекций контактных поверхностей незначительное и составляет 7,49 мм, что говорит о практической одновременности захвата полосы горизонтальными валками. Площадь проекции контактной поверхности металла с валками составляет: для нижнего горизонтального валка $F = 9272,3 \text{ мм}^2$; для верхнего горизонтального валка $F = 12213,6 \text{ мм}^2$. В первом рельсовом калибре смещаемый объем металла в верхней части очага деформации составляет $V = 174689,4 \text{ мм}^3$, в нижней части очага деформации $V = 131893,4 \text{ мм}^3$ (рисунок 2.28). Различие смещаемых объемов металла верхнего и нижнего частей геометрического очага деформации составляет 1,32 раза. Коэффициент вытяжки в данном калибре составляет $\lambda = 1,21$.



а



б

Рисунок 2.27 – Поперечное сечение раската по оси валков первого рельсового калибра в клети ВД-2 при прокатке ОР50: а – 3-D модель раската с геометрическим очагом деформации; б – проекции геометрического очага деформации

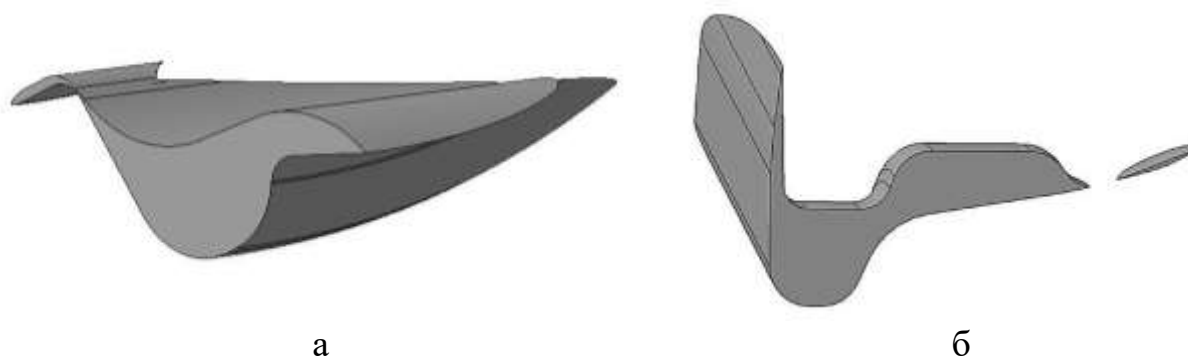
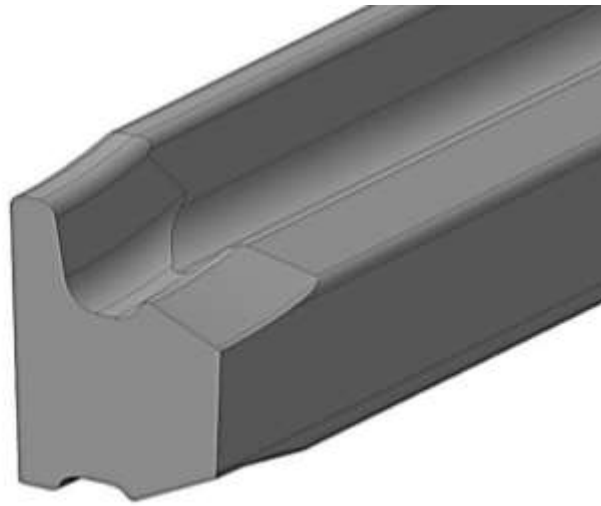


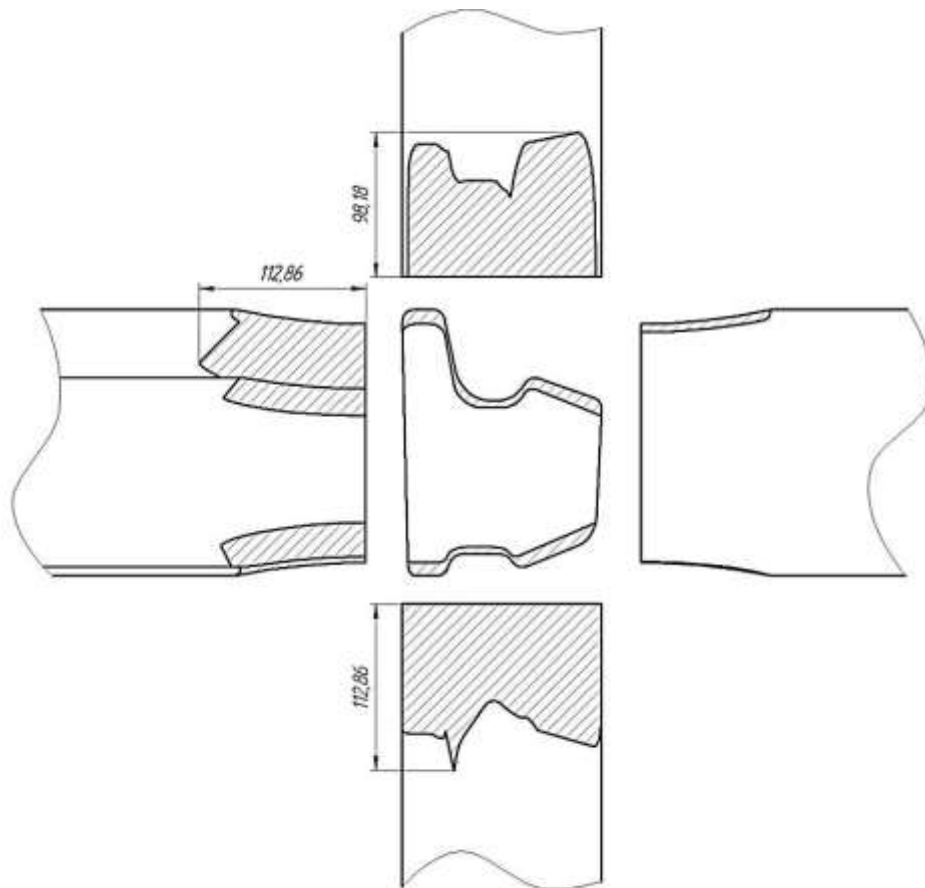
Рисунок 2.28 – Смещаемые объемы металла в геометрическом очаге деформации первого рельсового калибра в клети ВD-2 при прокатке ОР50:

- а – смещаемый объем металла верхним горизонтальными валком;
- б – смещаемый объем металла нижним горизонтальным валком

Проведено исследование геометрического очага деформации для последнего рельсового калибра клети ВD-2 при прокатке ОР50. На рисунке 2.29 а приведена 3-D модель поперечного сечения раската по оси валков с геометрическим очагом деформации, на рисунке 2.29 б приведены проекции контактных поверхностей металла с валками на горизонтальные и вертикальные плоскости. Первым в контакт с металлом вступает верхний валок на расстоянии 112,86 мм по радиусу сопряжения шейки с подошвой профиля. Нижний горизонтальный валок вступает в контакт с металлом на расстоянии 98,18 мм, таким образом, различие в длинах проекции верхней и нижней частей очага деформации составляет 14,68 мм. Площадь проекции контактной поверхности металла с валками составляет: для нижнего горизонтального вала $F = 10321,32 \text{ мм}^2$; для верхнего горизонтального вала $F = 11536,95 \text{ мм}^2$. В последнем рельсовом калибре ВD-2 смещаемый объем металла в верхней части очага деформации составляет $V = 66769,83 \text{ мм}^3$, в нижней части очага деформации $V = 54381 \text{ мм}^3$ (рисунок 2.30). Различие смещаемых объемов металла в верхней и нижней частях очага деформации составляет 1,23 раза. Коэффициент вытяжки в данном калибре составляет $\lambda = 1,14$.



а



б

Рисунок 2.29 – Поперечное сечение раската по оси валков последнего рельсового калибра в клети ВД-2 при прокатке ОР50: а – 3-D модель раската с геометрическим очагом деформации; б – проекции геометрического очага деформации

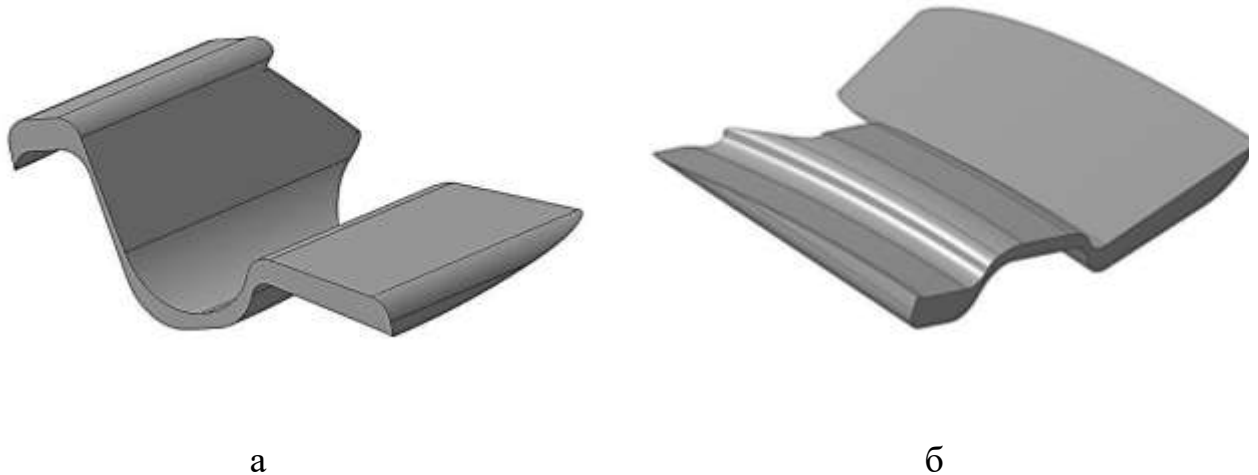
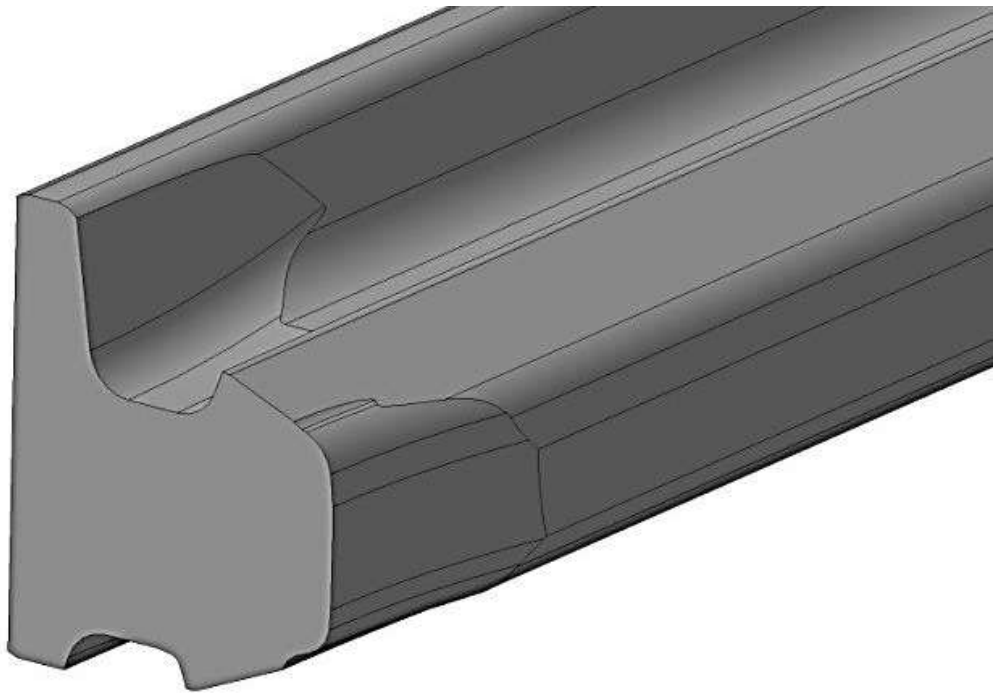


Рисунок 2.30 – Смещаемые объемы металла геометрического очага деформации последнего рельсового калибра в клетии ВD-2 при прокатке ОР50:
 а – смещаемый объем металла верхним горизонтальным валком;
 б – смещаемый объем металла нижним горизонтальным валком

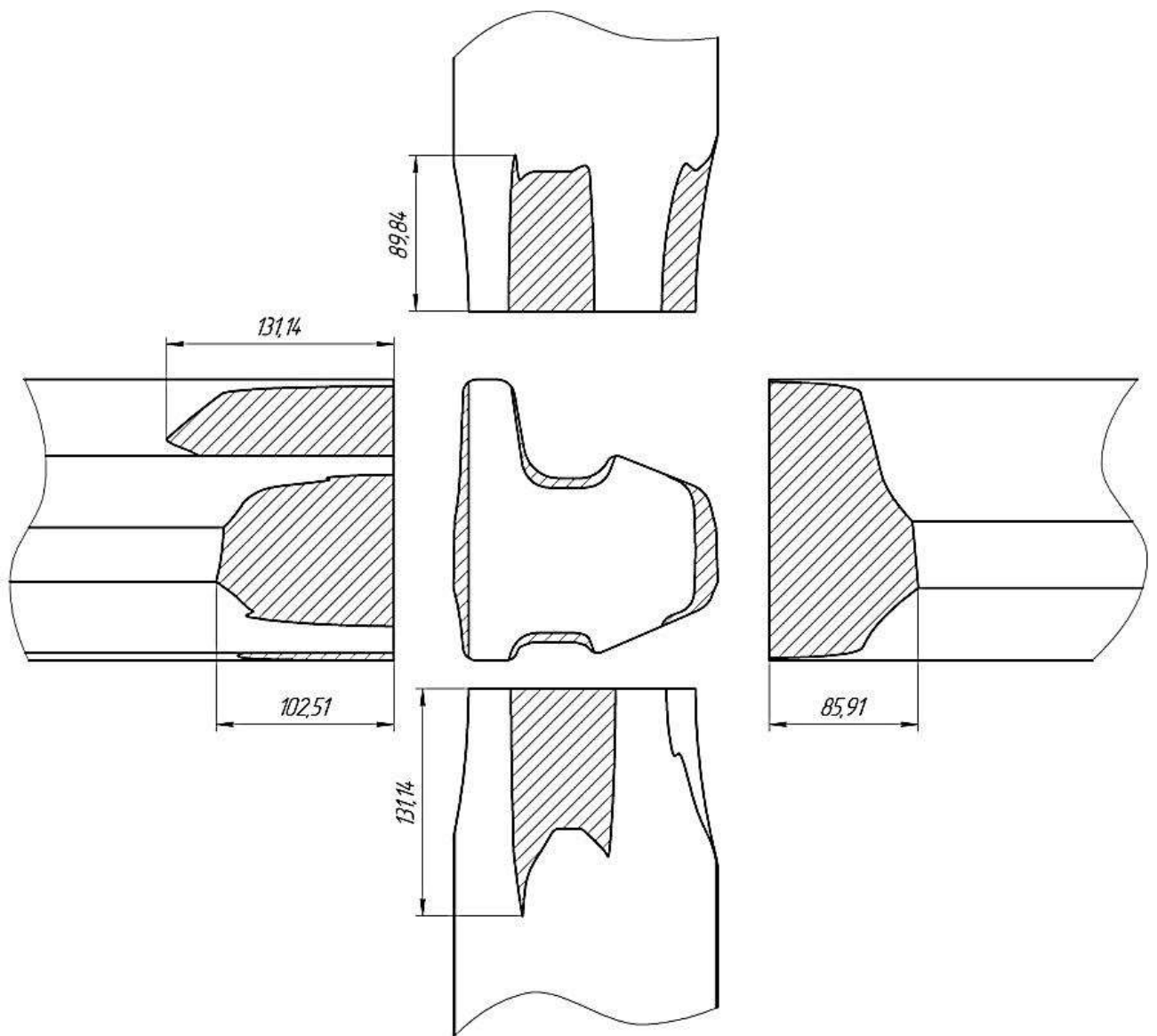
Проведено исследование геометрического очага деформации для первого четырехвалкового калибра UR-1 чистовой группы клетей при прокатке ОР50. На рисунке 2.31 а приведена 3-D модель поперечного сечения раската по оси валков с геометрическим очагом деформации, на рисунке 2.31 б приведены проекции контактных поверхностей металла с горизонтальными и вертикальными валками на соответствующие плоскости. Первым в контакт с металлом вступает верхний горизонтальный валок на расстоянии 131,14 мм по радиусу сопряжения шейки с подошвой профиля. Нижний горизонтальный валок вступает в контакт с металлом на расстоянии 89,84 мм. Вертикальный валок со стороны головки начинает осуществлять деформацию на расстоянии 102,51 мм, а вертикальный валок со стороны подошвы на расстоянии 85,91 мм от оси валков. Таким образом, различие в длинах проекции верхней и нижней частей очага деформации от обжатия горизонтальными валками составляет 41,3 мм, а различие длин контактных поверхностей от обжатия вертикальными валками составляет 16,6 мм. Площадь проекции контактной поверхности металла с валками составляет: для

нижнего горизонтального валка $F = 3887,02 \text{ мм}^2$; для верхнего горизонтального валка $F = 5386,24 \text{ мм}^2$, для вертикального ролика со стороны головки $F = 7623,01 \text{ мм}^2$, для вертикального ролика со стороны подошвы $F = 10767,08 \text{ мм}^2$. В первом четырехвалковом калибре UR-1 смещаемый объем металла в верхней части очага деформации составляет $V = 26514,78 \text{ мм}^3$, в нижней части очага деформации $V = 13913,02 \text{ мм}^3$, для вертикального валка со стороны головки $V = 53630,71 \text{ мм}^3$, для вертикального валка со стороны подошвы $V = 43206,16 \text{ мм}^3$ (рисунок 2.32). Различие объемов верхней и нижней частей очага деформации составляет 1,91 раза, различие объемов частей очага деформации от обжатия вертикальными валками составляет 1,24 раза. Коэффициент вытяжки в калибре UR-1 составляет $\lambda = 1,18$.



а

Продолжение рисунка 2.31 на следующей странице



б

Рисунок 2.31 – Поперечное сечение раската по оси валков первого четырехвалкового калибра UR-1 чистовой группы клетей при прокатке OP50:

а – 3-D модель раската с геометрическим очагом деформации;

б – проекции геометрического очага деформации

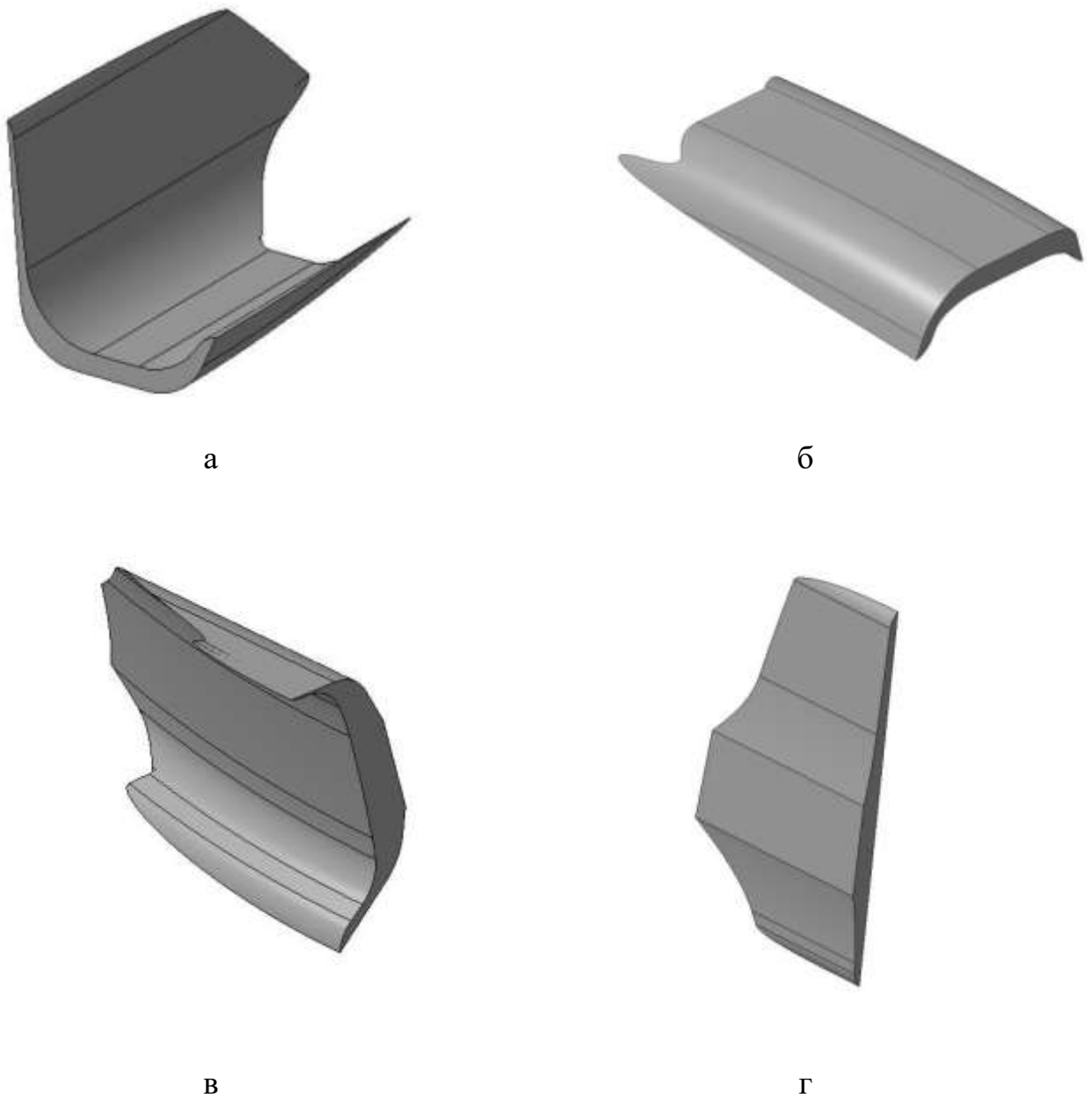
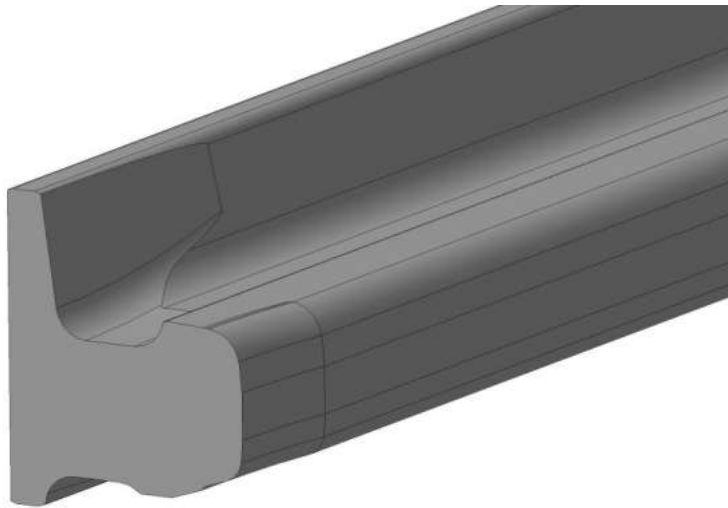
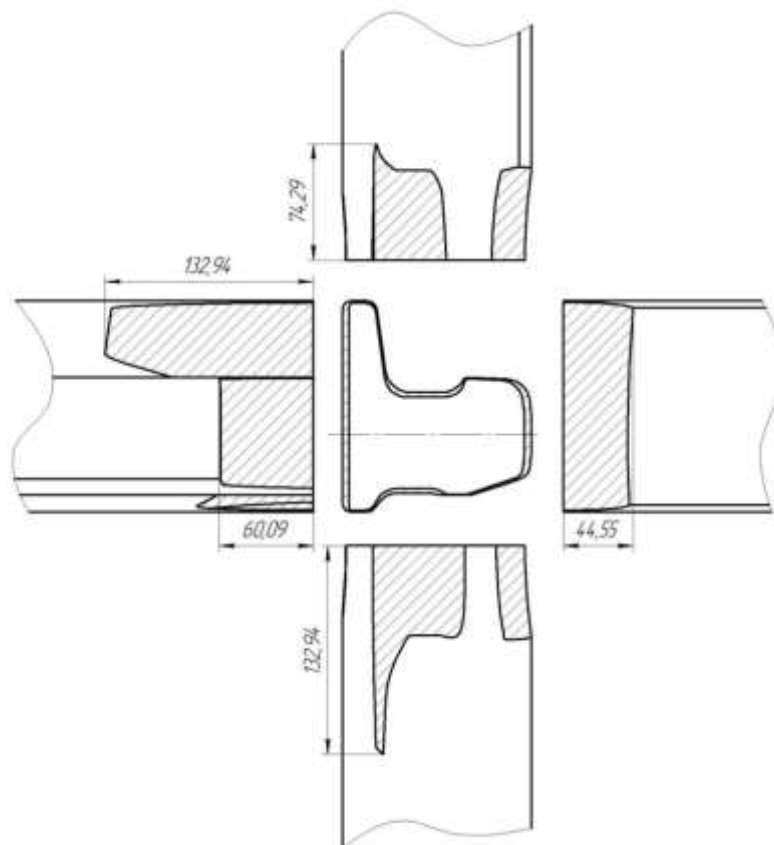


Рисунок 2.32 – Смещаемые объемы металла геометрического очага деформации в первом четырехвалковом калибре UR-1 чистовой группы клетей при прокатке ОР50: а – смещаемый объем металла верхним горизонтальным валком; б – смещаемый объем металла нижним горизонтальным валком; в – смещаемый объем металла вертикальным валком по головке; г – смещаемый объем металла вертикальным валком по подошве

Проведено исследование геометрического очага деформации для чистового четырехвалкового калибра UF чистовой группы клетей при прокатке ОР50. На рисунке 2.33 а приведена 3-D модель поперечного сечения раската по оси валков с геометрическим очагом деформации, на рисунке 2.33 б, приведены проекции контактных поверхностей металла с горизонтальными и вертикальными валками на соответствующие плоскости. Первым в контакт с металлом вступает верхний горизонтальный валок на расстоянии 132,94 мм по радиусу сопряжения шейки с подошвой профиля. Нижний горизонтальный валок вступает в контакт с металлом на расстоянии 74,29 мм. Вертикальный валок со стороны головки начинает осуществлять деформацию на расстоянии 60,09 мм, а вертикальный валок со стороны подошвы на расстоянии 44,55 мм от оси валков. Таким образом, различие в длинах проекции верхней и нижней частей очага деформации от обжатия горизонтальными валками составляет 58,65 мм, а различие длин контактных поверхностей от обжатия вертикальными валками составляет 15,54 мм. Площадь проекции контактной поверхности металла с валками составляет: для нижнего горизонтального валка $F = 2596,19 \text{ мм}^2$; для верхнего горизонтального валка $F = 4075,37 \text{ мм}^2$, для вертикального валка со стороны головки $F = 4122,52 \text{ мм}^2$, для вертикального ролика со стороны подошвы $F = 5506,26 \text{ мм}^2$. В чистовом четырехвалковом калибре UF смещаемый объем металла от обжатия верхним горизонтальным валком составляет $V = 15599,28 \text{ мм}^3$, от обжатия нижним горизонтальным валком $V = 5078,26 \text{ мм}^3$, для вертикального валка со стороны головки $V = 11698,68 \text{ мм}^3$, для вертикального валка со стороны подошвы $V = 7521,17 \text{ мм}^3$ (рисунок 2.34). Различие объемов верхнего и нижнего частей очага деформации составляет 3,07 раза, различие объемов частей очага деформации от обжатия вертикальными валками составляет 1,56 раза. Коэффициент вытяжки в калибре UF составляет $\lambda = 1,15$.



а



б

Рисунок 2.33 – Поперечное сечение раската по оси валков чистового четырехвалкового калибра UF чистовой группы клетей при прокатке ОР50:

а – 3-D модель раската с геометрическим очагом деформации;

б – проекции геометрического очага деформации

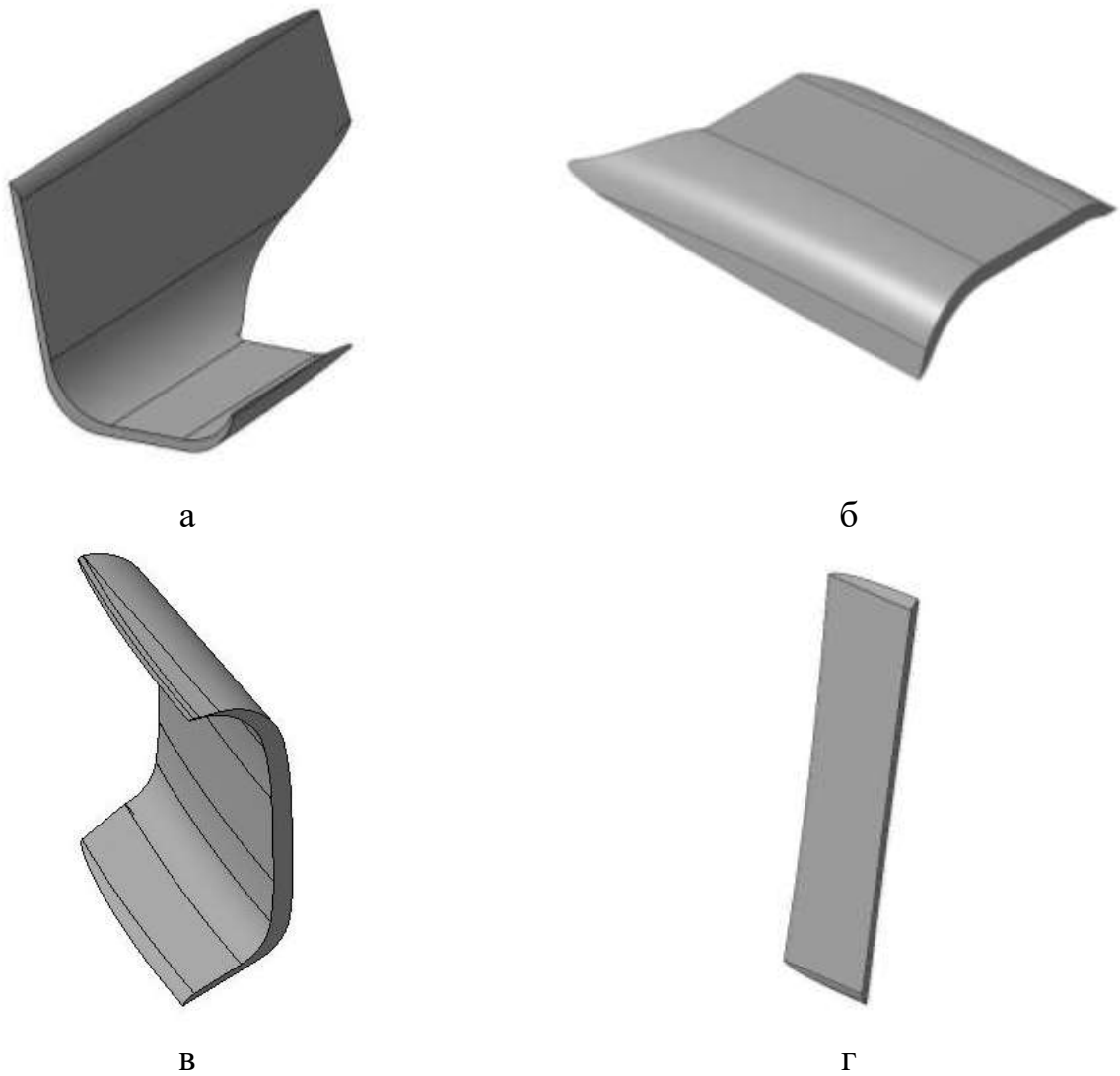
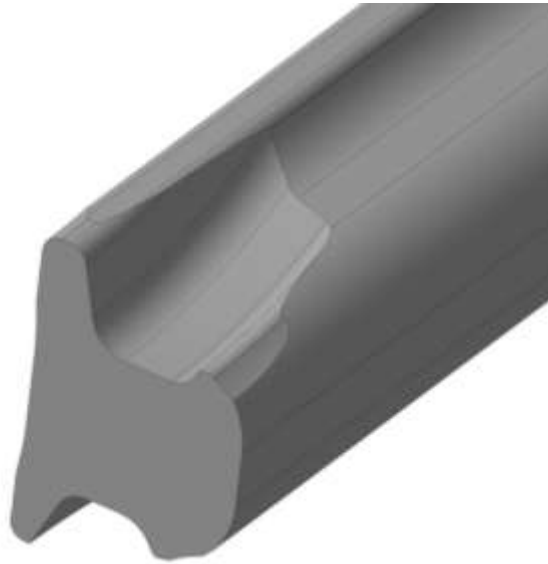
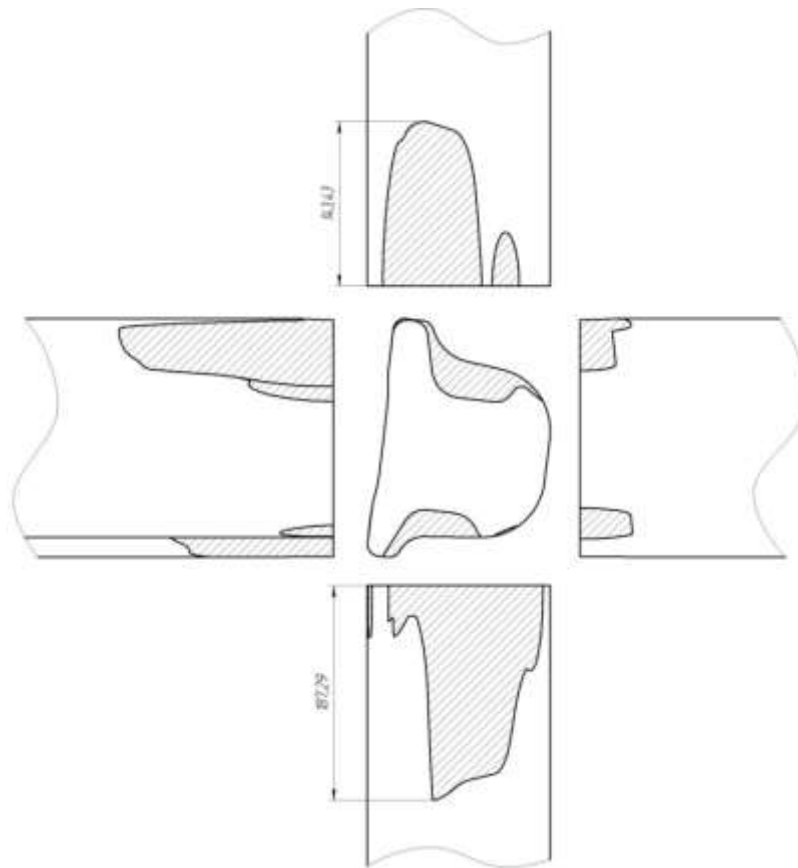


Рисунок 2.34 – Смещаемые объемы металла геометрического очага деформации в чистовом четырехвалковом калибре UF чистовой группы клетей при прокатке ОР50: а – смещаемый объем металла верхним горизонтальным валком; б – смещаемый объем металла нижним горизонтальным валком; в – смещаемый объем металла вертикальным валком по головке; г – смещаемый объем металла вертикальным валком по подошве

Проведено исследование геометрического очага деформации при прокатке рельсов ОР65 по аналогии с вышеприведенными результатами для ОР50. Исследованы очаги деформации для первого (рисунок 2.35) и последнего (рисунок 2.36) рельсовых калибров в клетях ВД-2 и для первого (рисунок 2.37) и последнего (рисунок 2.38) четырехвалковых калибров в чистовой группе клетей.

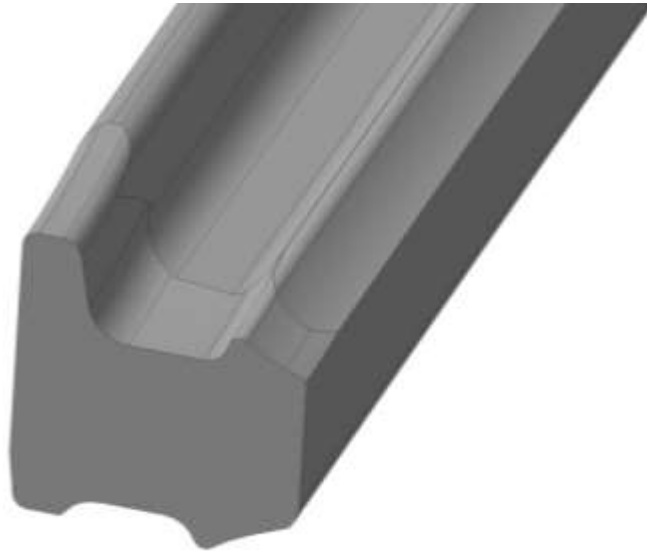


а

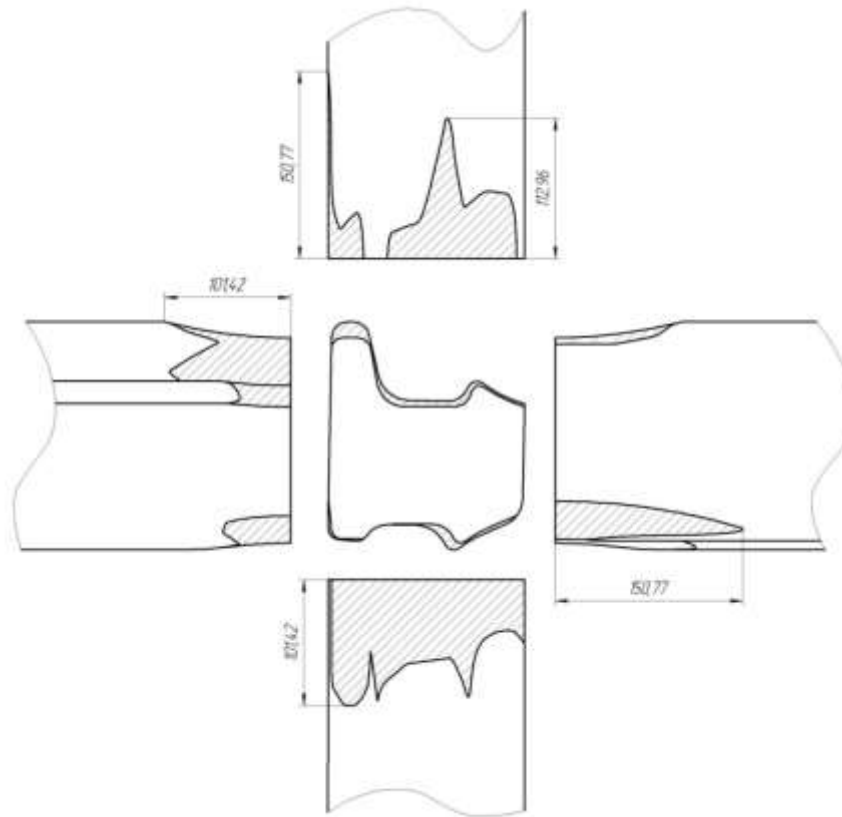


б

Рисунок 2.35 – Поперечное сечение раската по оси валков первого рельсового калибра в клети ВД-2 при прокатке ОР65: а – 3-D модель раската с геометрическим очагом деформации; б – проекции геометрического очага деформации

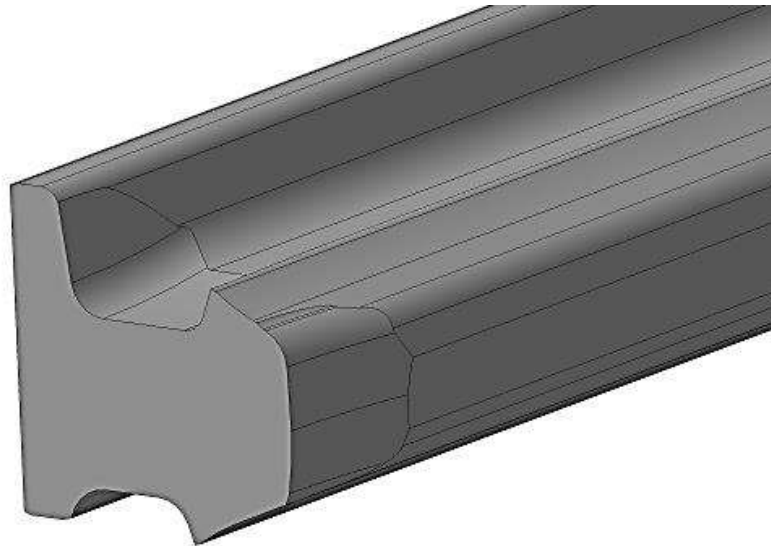


а

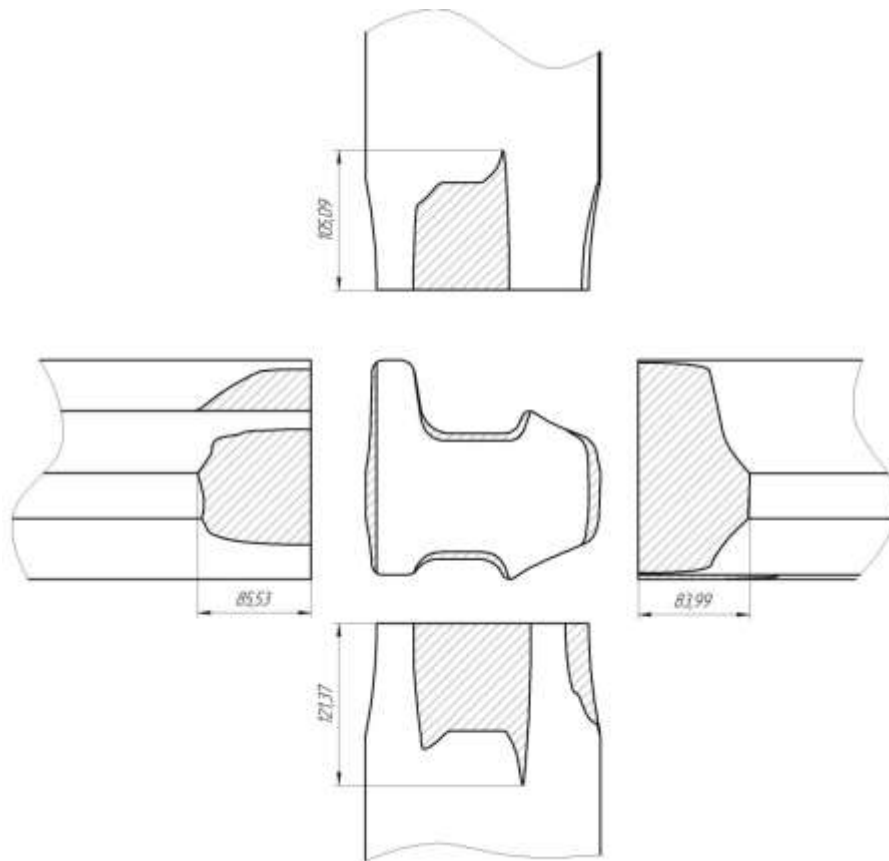


б

Рисунок 2.36 – Поперечное сечение раската по оси валков последнего рельсового калибра в клети ВД-2 при прокатке ОР65: а – 3-D модель раската с геометрическим очагом деформации; б – проекции геометрического очага деформации

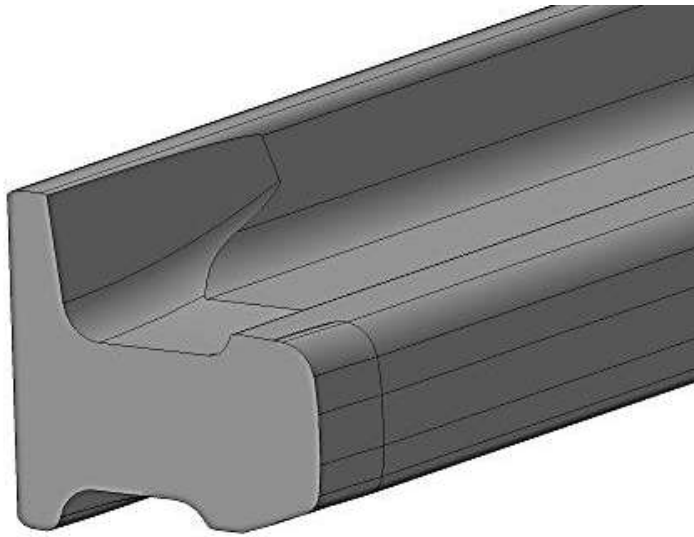


а

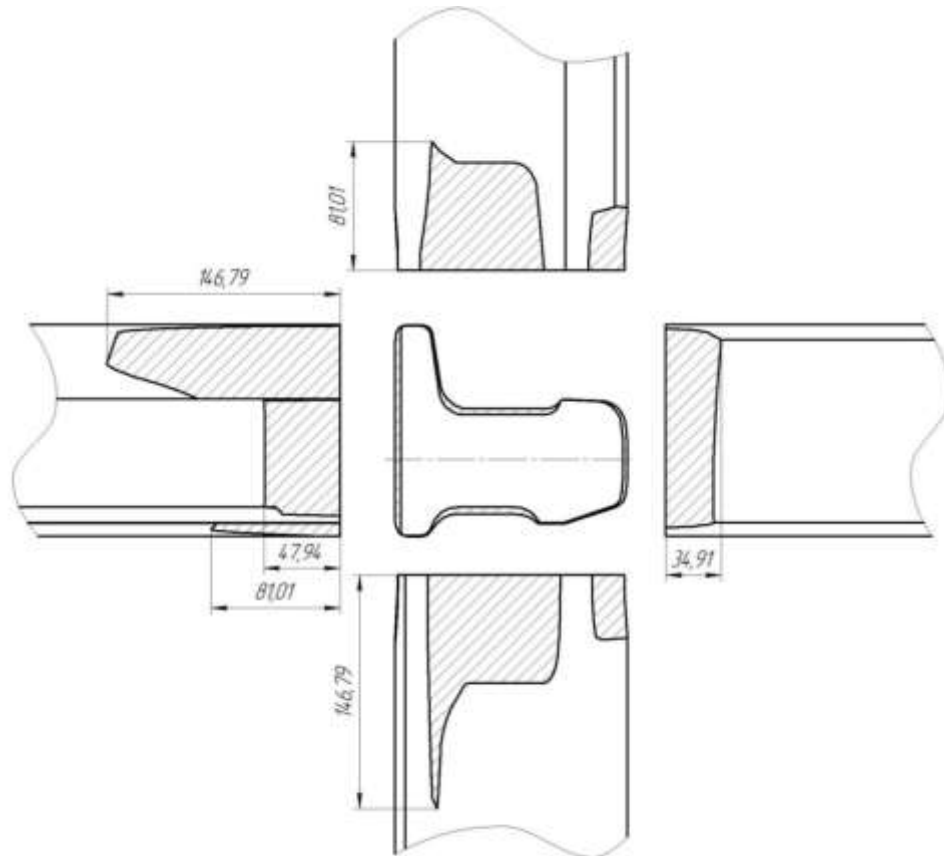


б

Рисунок 2.37 – Поперечное сечение раската по оси валков первого четырехвалкового калибра UR-1 чистовой группы клетей при прокатке ОР65: а – 3-D модель раската с геометрическим очагом деформации; б – проекции геометрического очага деформации



а



б

Рисунок 2.38 – Поперечное сечение раската по оси валков чистового четырехвалкового калибра UF чистовой группы клетей при прокатке ОР65:

а – 3-D модель раската с геометрическим очагом деформации;

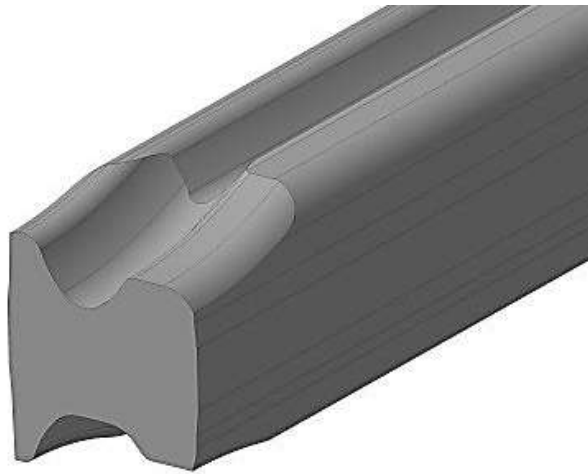
б – проекции геометрического очага деформации

Усовиковые рельсы.

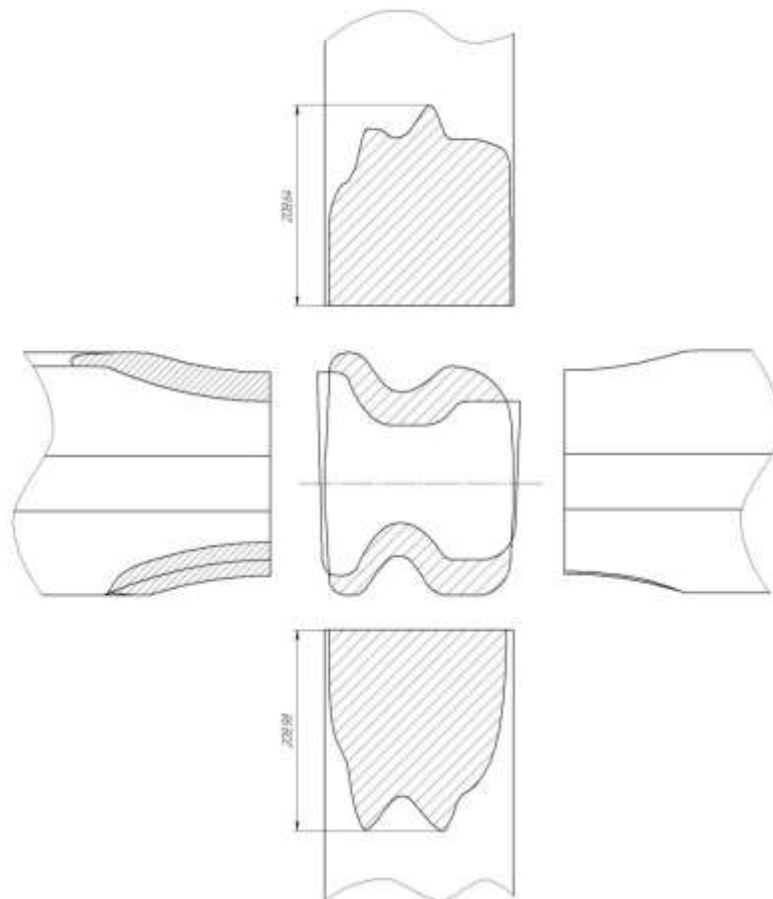
Проведено исследование геометрического очага деформации при прокатке асимметричного рельсового профиля – усовиковых рельсов тип УР65.

На рисунке 2.39 приведена 3-D модель поперечного сечения раската по оси валков первого рельсового калибра клетки ВД-2 при прокатке УР65. Различную высотную деформацию испытывает металл в верхней и нижней частях очага деформации (рисунок 2.39, а). На рисунке 2.39 б приведено сечение калибра по оси валков с проекциями очага деформации на горизонтальную и вертикальную плоскости. Установлено, что горизонтальные валки вступают в контакт с металлом практически одновременно, при этом длина проекции очага деформации составляет практически 209 мм от оси валков. Различие в длинах проекций контактных поверхностей незначительное и составляет 0,34 мм, что говорит об одновременности захвата полосы горизонтальными валками. Площадь проекции контактной поверхности металла с валками составляет: для нижнего горизонтального валка $F = 32216,45 \text{ мм}^2$; для верхнего горизонтального валка $F = 31061,71 \text{ мм}^2$. В первом рельсовом калибре смещаемый объем металла в верхней части очага деформации составляет $V = 789526,05 \text{ мм}^3$, в нижней части очага деформации $V = 735629,7 \text{ мм}^3$ (рисунок 2.40). Различие верхней и нижней частей очага деформации составляет 1,07 раза. Коэффициент вытяжки в данном калибре составляет $\lambda = 1,4$.

Проведено исследование геометрического очага деформации для последнего рельсового калибра клетки ВД-2 при прокатке УР65. На рисунке 2.41 а приведена 3-D модель поперечного сечения раската по оси валков с геометрическим очагом деформации, на рисунке 2.41 б приведены проекции контактных поверхностей металла с валками на горизонтальные и вертикальные плоскости.



а



б

Рисунок 2.39 – Поперечное сечение раската по оси валков первого рельсового калибра в клети ВД-2 при прокатке ОР50: а – 3-D модель раската с геометрическим очагом деформации; б – проекции геометрического очага деформации

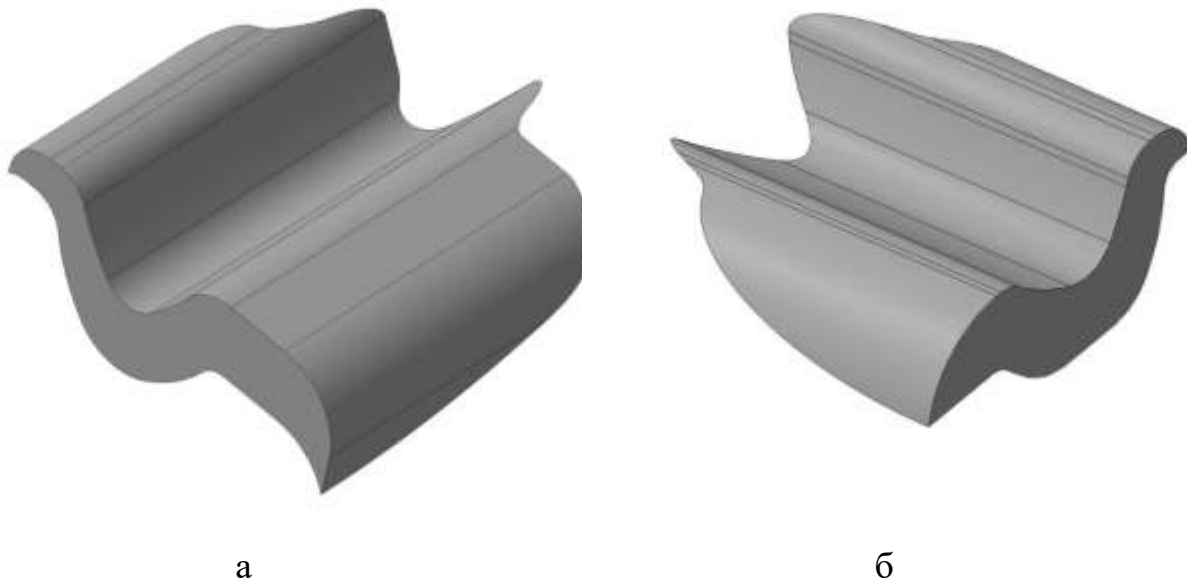
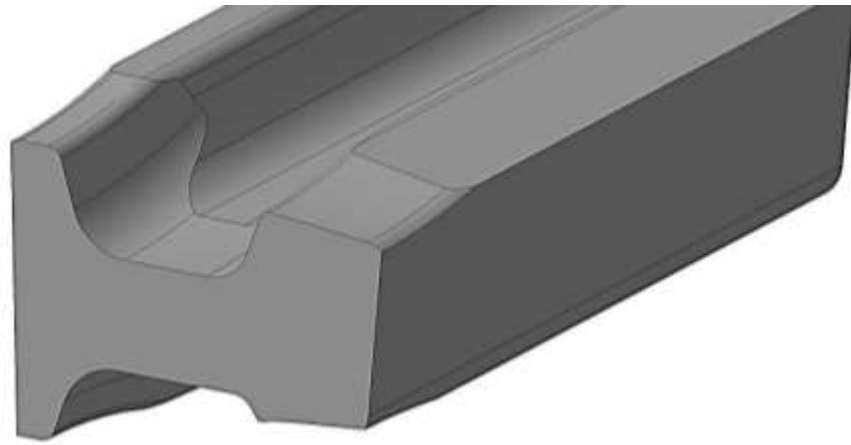


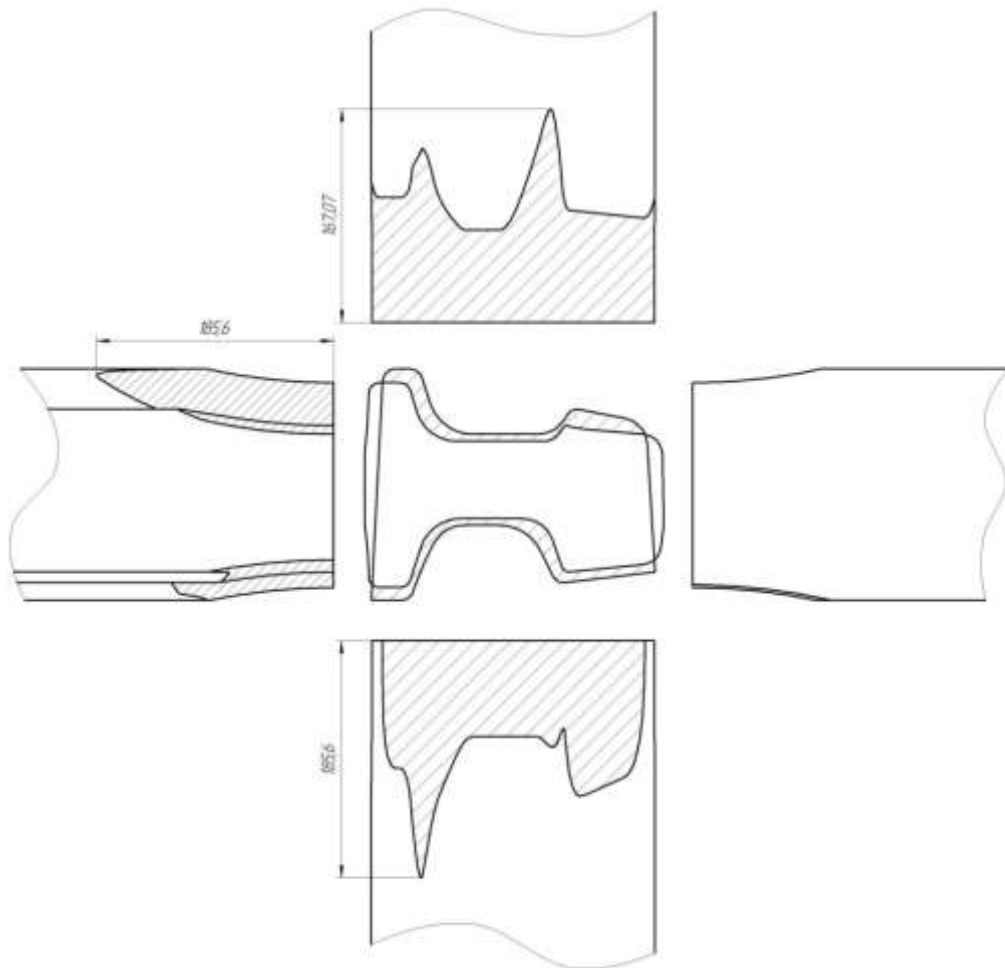
Рисунок 2.40 – Смещаемые объемы металла геометрического очага деформации первого рельсового калибра в клетки ВD-2 при прокатке УР65:

- а – смещаемый объем металла верхним горизонтальными валком;
- б – смещаемый объем металла нижним горизонтальным валком

Первым в контакт с металлом вступает верхний горизонтальный валок на расстоянии 185,6 мм по радиусу сопряжения шейки с подошвой профиля (рисунок 2.41). Нижний горизонтальный валок вступает в контакт с металлом на расстоянии 167,07 мм, таким образом, различие в длинах проекции верхней и нижней частей очага деформации составляет 18,53 мм. Площадь проекции контактной поверхности металла с валками составляет: для нижнего горизонтального валка $F = 21370,07 \text{ мм}^2$; для верхнего горизонтального валка $F = 20227,51 \text{ мм}^2$. В последнем рельсовом калибре ВD-2 смещаемый объем металла в верхней части очага деформации составляет $V = 160794,59 \text{ мм}^3$, в нижней части очага деформации $V = 166793,11 \text{ мм}^3$ (рисунок 2.42). Различие верхнего и нижнего частей очага деформации составляет 1,04 раза. Коэффициент вытяжки в данном калибре составляет $\lambda = 1,1$.



а



б

Рисунок 2.41 – Поперечное сечение раската по оси валков последнего рельсового калибра в клети ВД-2 при прокатке УР65: а – 3-D модель раската с геометрическим очагом деформации; б – проекции геометрического очага деформации

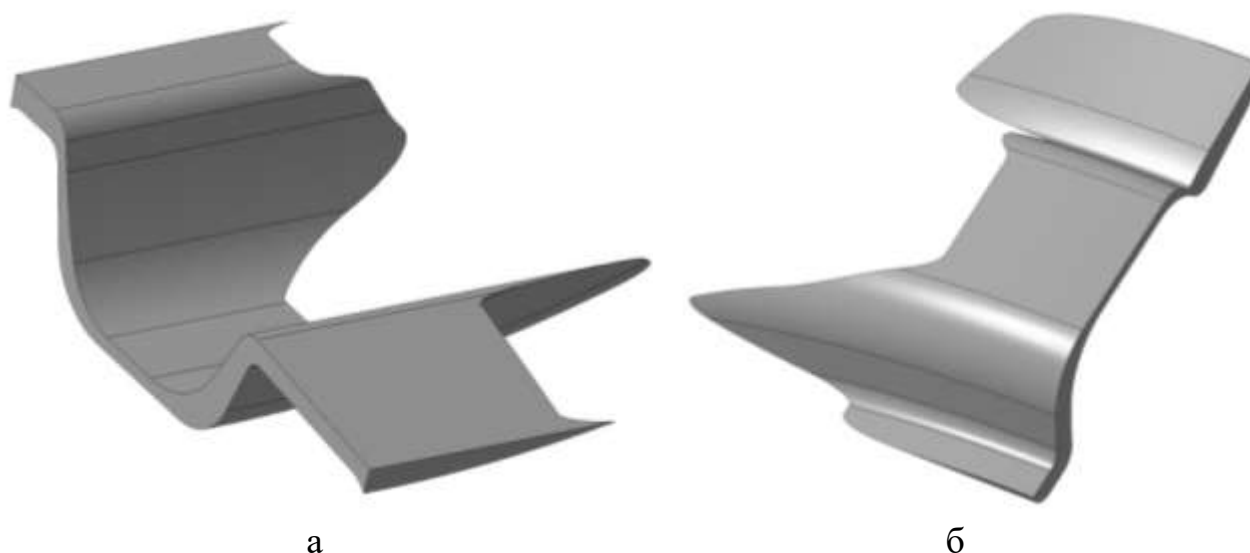
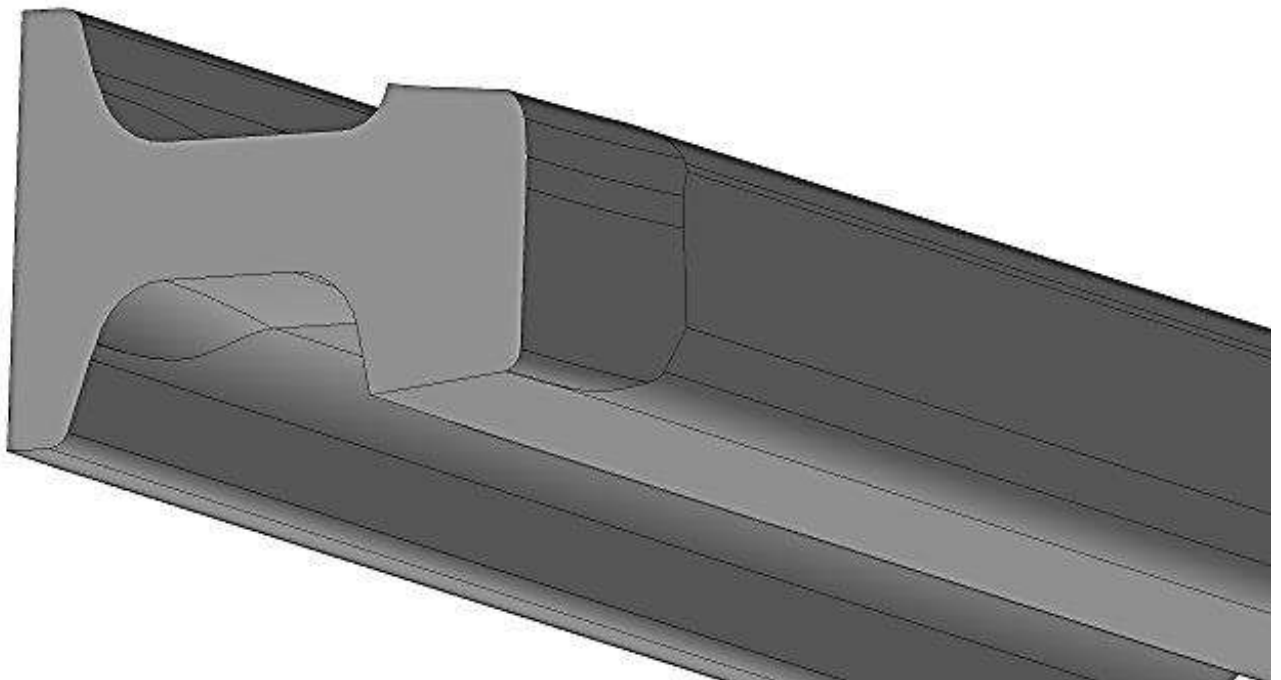


Рисунок 2.42 – Смещаемые объемы металла геометрического очага деформации последнего рельсового калибра в клетке BD-2 при прокатке УР65:

- а – смещаемый объем металла верхним горизонтальным валком;
- б – смещаемый объем металла нижним горизонтальным валком

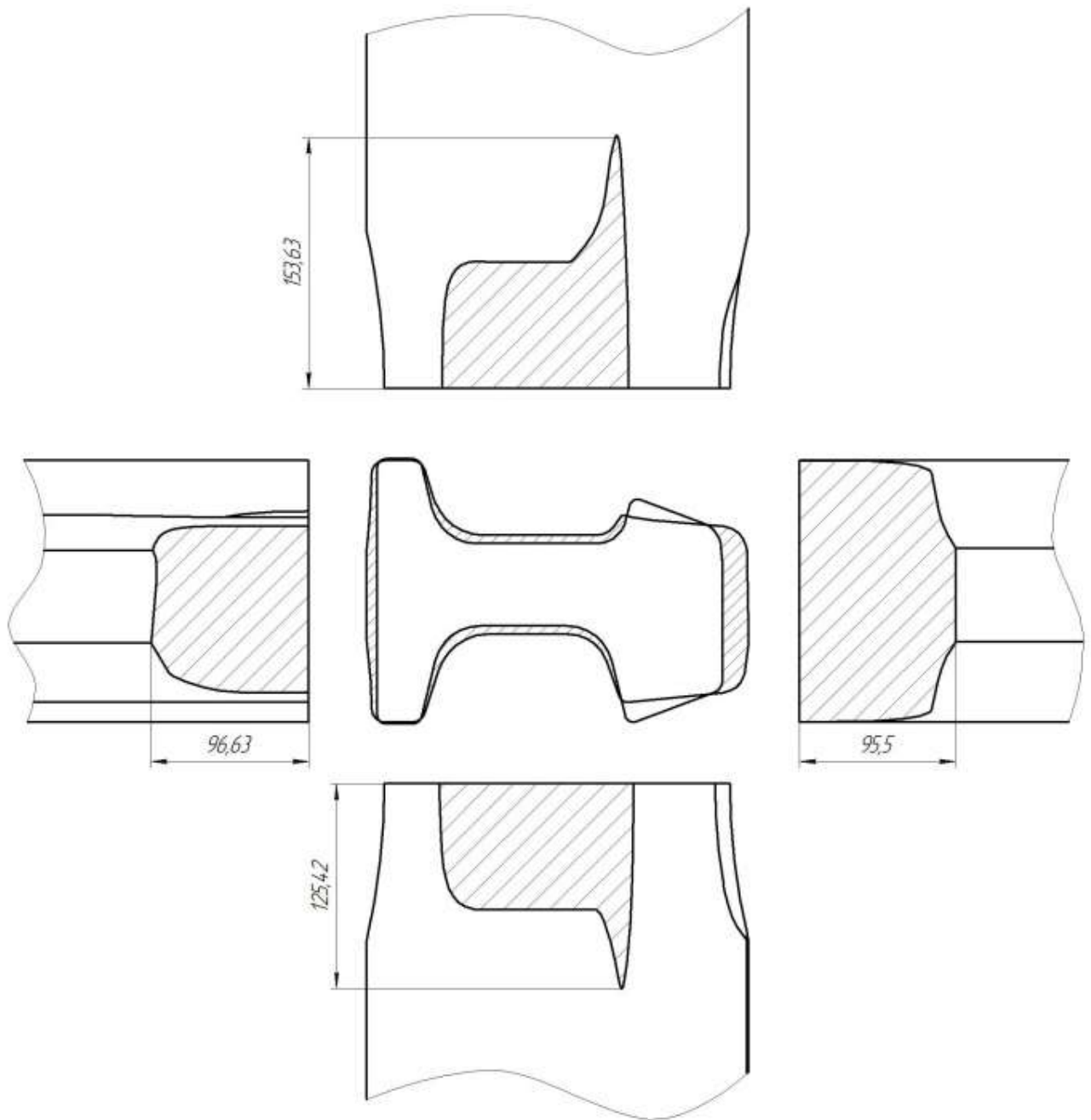
Проведено исследование геометрического очага деформации для первого четырехвалкового калибра UR-1 чистовой группы клетей при прокатке УР65. На рисунке 2.43 а приведена 3-D модель поперечного сечения раската по оси валков с геометрическим очагом деформации, на рисунке 2.43 б приведены проекции контактных поверхностей металла с горизонтальными и вертикальными валками на соответствующие плоскости. Первым в контакт с металлом вступает нижний горизонтальный валок на расстоянии 153,63 мм со стороны большей части выступа головки по радиусу сопряжения с шейкой. Нижний горизонтальный валок вступает в контакт с металлом на расстоянии 125,42 мм. Вертикальный валок со стороны головки начинает осуществлять деформацию на расстоянии 96,63 мм, а вертикальный валок со стороны подошвы на расстоянии 95,5 мм от оси валков. Таким образом, различие в длинах проекции верхней и нижней частей очага деформации от обжатия горизонтальными валками составляет 28,21 мм, а различие длин контактных поверхностей от обжатия вертикальными валками составляет 1,13 мм. Площадь проекции контактной поверхности металла с

валками составляет: для нижнего горизонтального валка $F = 9711,09 \text{ мм}^2$; для верхнего горизонтального валка $F = 9405,19 \text{ мм}^2$, для вертикального ролика со стороны головки $F = 9242,97 \text{ мм}^2$, для вертикального ролика со стороны подошвы $F = 14087,92 \text{ мм}^2$. В первом четырехвалковом калибре UR-1 при прокатке УР65 смещаемый объем металла в верхней части очага деформации составляет $V = 36110,94 \text{ мм}^3$, в нижней части очага деформации $V = 48502,25 \text{ мм}^3$, для вертикального валка со стороны головки $V = 64794,16 \text{ мм}^3$, для вертикального валка со стороны подошвы $V = 88650,74 \text{ мм}^3$ (рисунок 2.44). Различие объемов верхнего и нижнего частей очага деформации составляет 1,34 раза, различие объемов частей очага деформации от обжатия вертикальными валками составляет 1,37 раза. Коэффициент вытяжки в калибре UR-1 составляет $\lambda = 1,16$.



а

Продолжение рисунка 2.43 на следующей странице

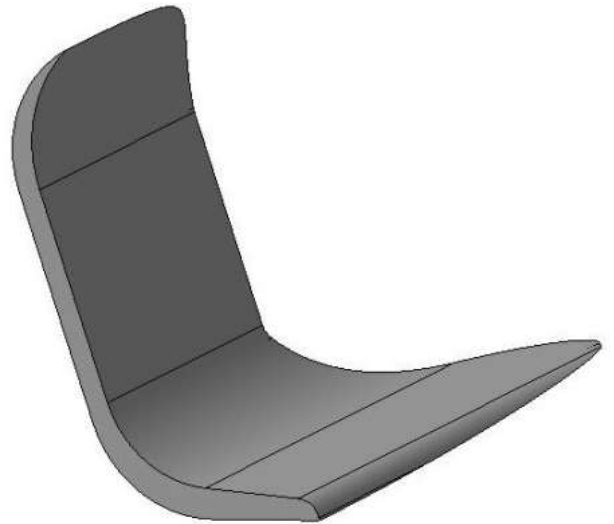


б

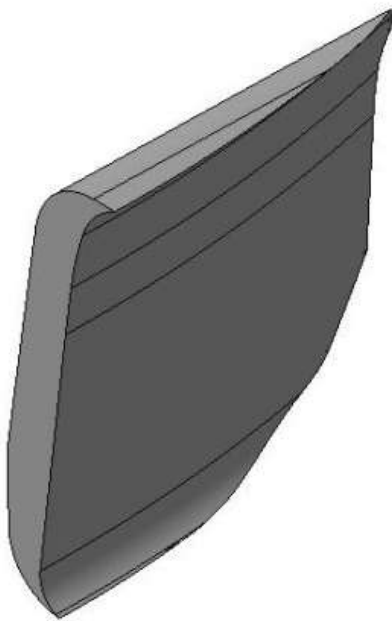
Рисунок 2.43 – Поперечное сечение раската по оси валков первого четырехвалкового калибра UR-1 чистовой группы клетей при прокатке УР65: а – 3-D модель раската с геометрическим очагом деформации; б – проекции геометрического очага деформации



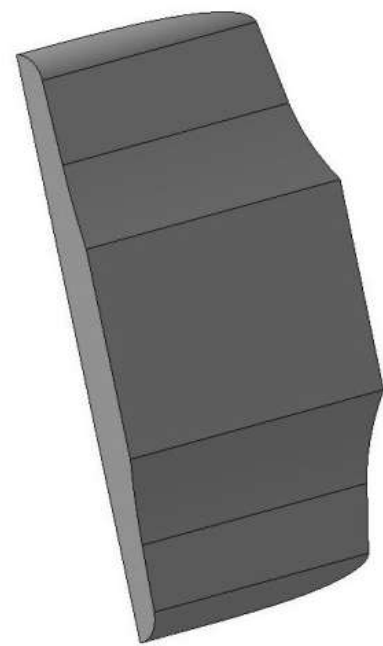
а



б



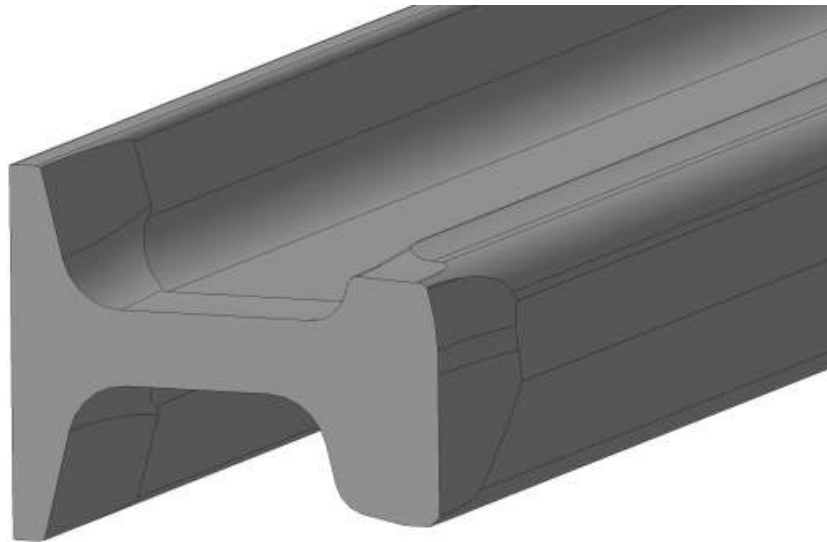
в



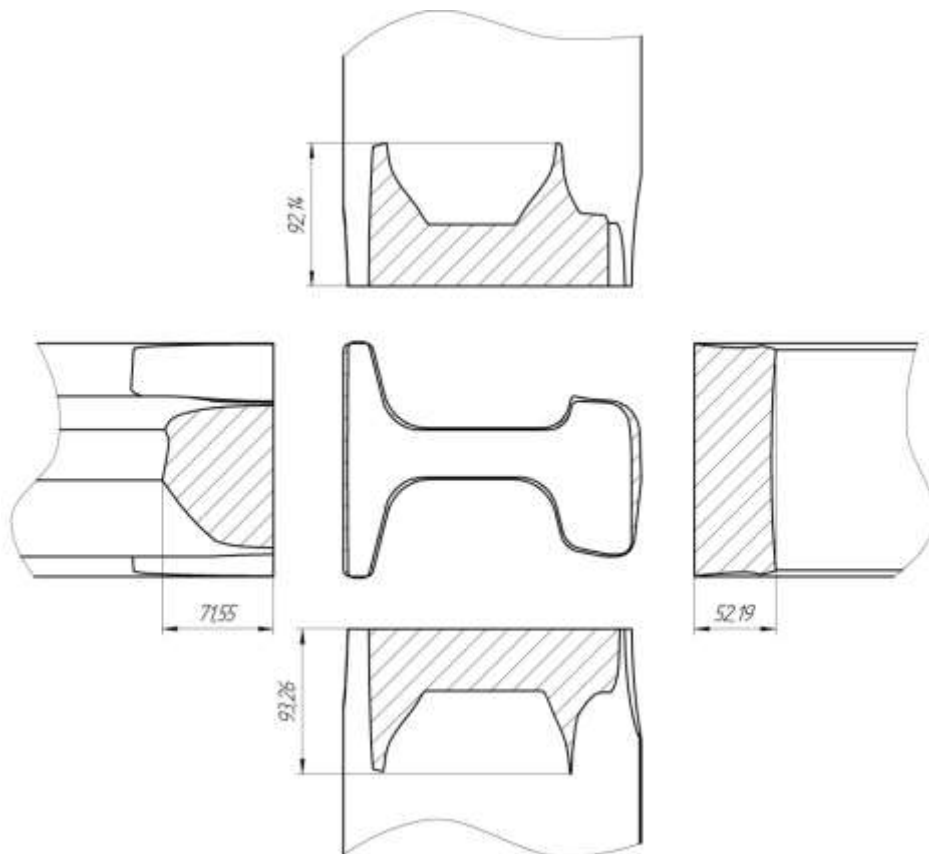
г

Рисунок 2.44 – Смещаемые объемы металла геометрического очага деформации в первом четырехвалковом калибре UR-1 чистовой группы клетей при прокатке УР65: а – смещаемый объем металла верхним горизонтальным валком; б – смещаемый объем металла нижним горизонтальным валком; в – смещаемый объем металла вертикальным валком по головке; г – смещаемый объем металла вертикальным валком по подошве

Проведено исследование геометрического очага деформации для чистового четырехвалкового калибра UF непрерывной группы клетей при прокатке УР65. На рисунке 2.45 а приведена 3-D модель поперечного сечения раската по оси валков с геометрическим очагом деформации, на рисунке 2.45 б приведены проекции контактных поверхностей металла с горизонтальными и вертикальными валками на соответствующие плоскости. В контакт с металлом горизонтальные валки вступают практически одновременно, так, нижний горизонтальный валок на расстоянии 92,14 мм, а верхний горизонтальный валок на расстоянии 93,26 мм. Вертикальный валок со стороны головки начинает осуществлять деформацию на расстоянии 71,55 мм, а вертикальный валок со стороны подошвы на расстоянии 52,19 мм от оси валков. Таким образом, различие в длинах проекции верхней и нижней частей очага деформации от обжатия горизонтальными валками составляет 1,12 мм, а различие длин контактных поверхностей от обжатия вертикальными валками составляет 19,36 мм. Площадь проекции контактной поверхности металла с валками составляет: для нижнего горизонтального валка $F = 8238,96 \text{ мм}^2$; для верхнего горизонтального валка $F = 7919,09 \text{ мм}^2$, для вертикального ролика со стороны головки $F = 5463,4 \text{ мм}^2$, для вертикального ролика со стороны подошвы $F = 7342,8 \text{ мм}^2$. В чистовом четырехвалковом калибре UF при прокатке УР65 смещаемый объем металла в верхней части очага деформации составляет $V = 14542,1 \text{ мм}^3$, в нижней части очага деформации $V = 18326,71 \text{ мм}^3$, для вертикального валка со стороны головки $V = 17405,13 \text{ мм}^3$, для вертикального валка со стороны подошвы $V = 13993,4 \text{ мм}^3$ (рисунок 2.46). Различие объемов верхнего и нижнего частей очага деформации составляет 1,26 раза, различие объемов частей очага деформации от обжатия вертикальными валками составляет 1,24 раза. Коэффициент вытяжки в калибре UF составляет $\lambda = 1,15$.



а



б

Рисунок 2.45 – Поперечное сечение раската по оси валков чистового четырехвалкового калибра UF чистовой группы клетей при прокатке УР65:

а – 3-D модель раската с геометрическим очагом деформации;

б – проекции геометрического очага деформации

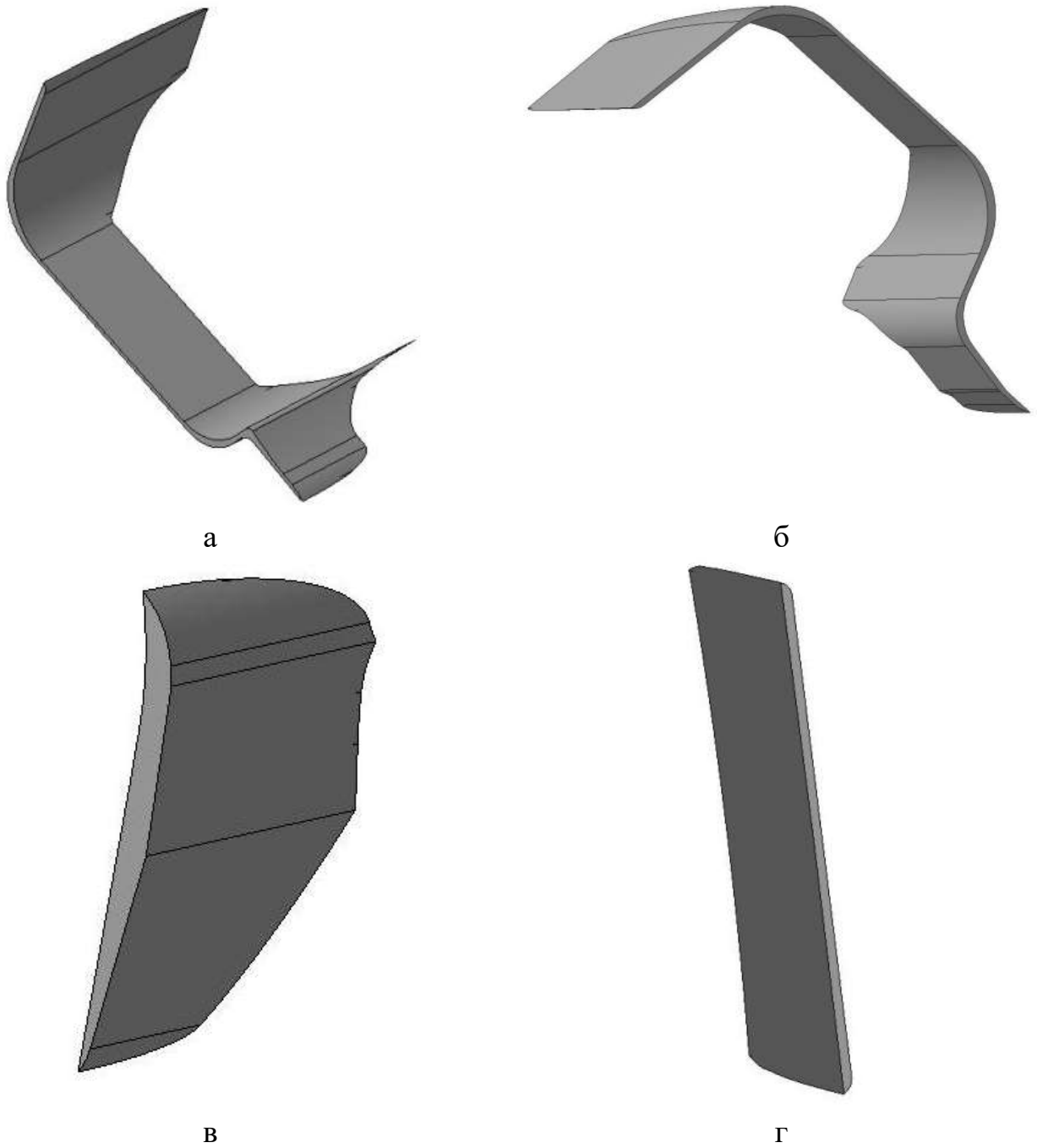


Рисунок 2.46 – Смещаемые объемы металла геометрического очага деформации в чистовом четырехвалковом калибре UF чистовой группы клетей при прокатке УР65: а – смещаемый объем металла верхним горизонтальным валком; б – смещаемый объем металла нижним горизонтальным валком; в – смещаемый объем металла вертикальным валком по головке; г – смещаемый объем металла вертикальным валком по подошве

2.4 Разработка эффективных скоростных режимов прокатки в группе тандем

Для ресурсосберегающих технологий прокатки асимметричных рельсовых профилей разработаны эффективные скоростные режимы прокатки в чистовой непрерывно-реверсивной группе клетей (группа тандем) на примере технологии прокатки трамвайных рельсов. Критерием эффективности является загрузка электродвигателей непрерывной группы тандем по моменту, то есть при захвате металла валками крутящий момент не должен превышать максимальный, за счет исключения динамического момента стана $M_{\text{дин. стана}}$. Между двигателем и клетью установлена шестеренная клеть с передаточным числом $i = 5,3$.

Первый проход. В первом проходе раскат рельсового металла прокатывают в двух рабочих клетях – универсальной UR и двухвалковой, только с горизонтальными валками, клетки Edger (ER). Диаграмма скоростей для первого прохода представлена на рисунке 2.47. Валки универсальной клетки UF разведены для свободного прохода раската.

При подходе металла к непрерывной группе клетей автоматически запускаются двигателя универсальной клетки UR и вспомогательной клетки ER. Разгон валков клетки UR происходит при оборотах вала двигателя от 0 до 152 об/мин·с ускорением 74,15 об/мин·с. Разгон валков клетки ER происходит при оборотах вала двигателя от 0 до 175 об/мин. с ускорением 85,37 об/мин·с. После чего клетки UR и ER автоматически переводятся на вращение валков с постоянной скоростью. Для исследуемых режимов деформации захват металла производится на постоянной частоте вращения валков, для клетки UR при 152 об/мин, для клетки ER при 175 об/мин. Количество оборотов между клетями отличается из-за того, что валки клетей различного диаметра и необходимо в каждой последующей клетке при непрерывной прокатке учитывать вытяжку от обжатия в предшествующем калибре с учетом постоянства секундных объемов. После захвата металла в двух клетях UR и ER раскат прокатывают некоторое время с постоянной скоростью. Далее одновременно в двух клетях происходит ускорение вращения валков с

металлом. Ускорение продолжается до максимальной скорости прокатки, при этом обороты вала двигателя клетки UR составляют 297,55 об/мин и клетки ER – 338,65 об/мин. Далее происходит прокатка металла при максимальной скорости одновременно в двух клетях.

Выход раската из клетки UR и ER происходит при постоянной частоте вращения валков и некоторое время валки вращаются без раската.

Торможение валков клеток UR и ER без металла производится за два этапа. Для клетки UR на первой ступени торможения происходит снижение оборотов вала двигателя от 297,55 до 161,49 об/мин после чего валки вращаются с постоянной частотой вращения. На второй ступени торможения происходит снижение оборотов вращения вала двигателя от 161,49 до 0 об/мин. Для клетки ER на первой ступени производится торможение и число оборотов вала двигателя снижается с 338,65 об/мин до 181,52 об/мин. После чего валки клетки ER некоторое время вращаются с постоянной частотой вращения. На второй ступени торможения происходит снижение оборотов вала двигателя клетки ER от 181,52 до 0 об/мин (таблица 2.6).

Таблица 2.6 – Работа группы тандем в первом проходе

Операция	Клетки UR и ER, с
Время ускорения валков без раската, t_{1p}	2,05
Время вращения валков с постоянной скоростью, t_{1n1}	3,2
Время ускорения валков с раскатом, t_{1y}	1,75
Время прокатка металла при постоянной максимальной скорости, t_{1n2}	4,85
Время торможения на первой ступени, t_{13}	1,65
Время вращения валков с постоянной скоростью, t_{1n3}	0,65
Время второй ступени торможения, t_{1o}	2,05

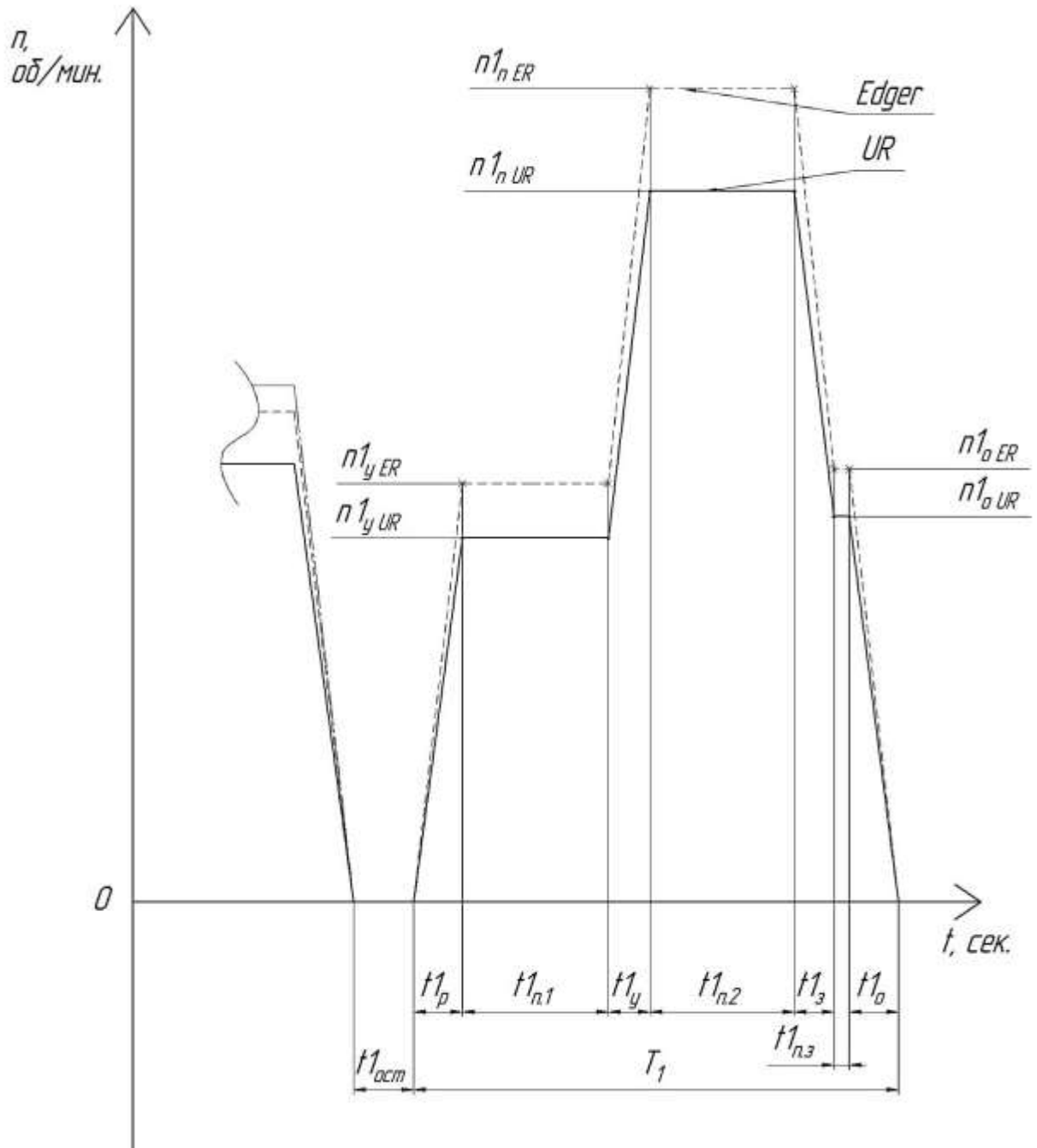


Рисунок 2.47 – Диаграмма скоростей первого прохода (сплошная линия – клеть UR, пунктирная линия – клеть ER)

где t_p – время ускорения стана без металла; t_{n1} – время вращения валков с постоянной скоростью; t_y – время ускорения стана с металлом; t_{n2} – время прокатки металла с постоянной максимальной скоростью; t_3 – время первой ступени торможения; t_{n3} – время вращения валков с постоянной скоростью; t_o – время второй ступени торможения; цифра «1» после буквы «t» означает первый проход металла

Второй проход. После остановки валков и поджатия калибров начинается второй проход в реверсивном режиме (рисунок 2.48). Во втором проходе прокатка осуществляется в непрерывном режиме в двух клетях ER и UR. Валки универсальной клетки UF разведены для свободного прохода раската.

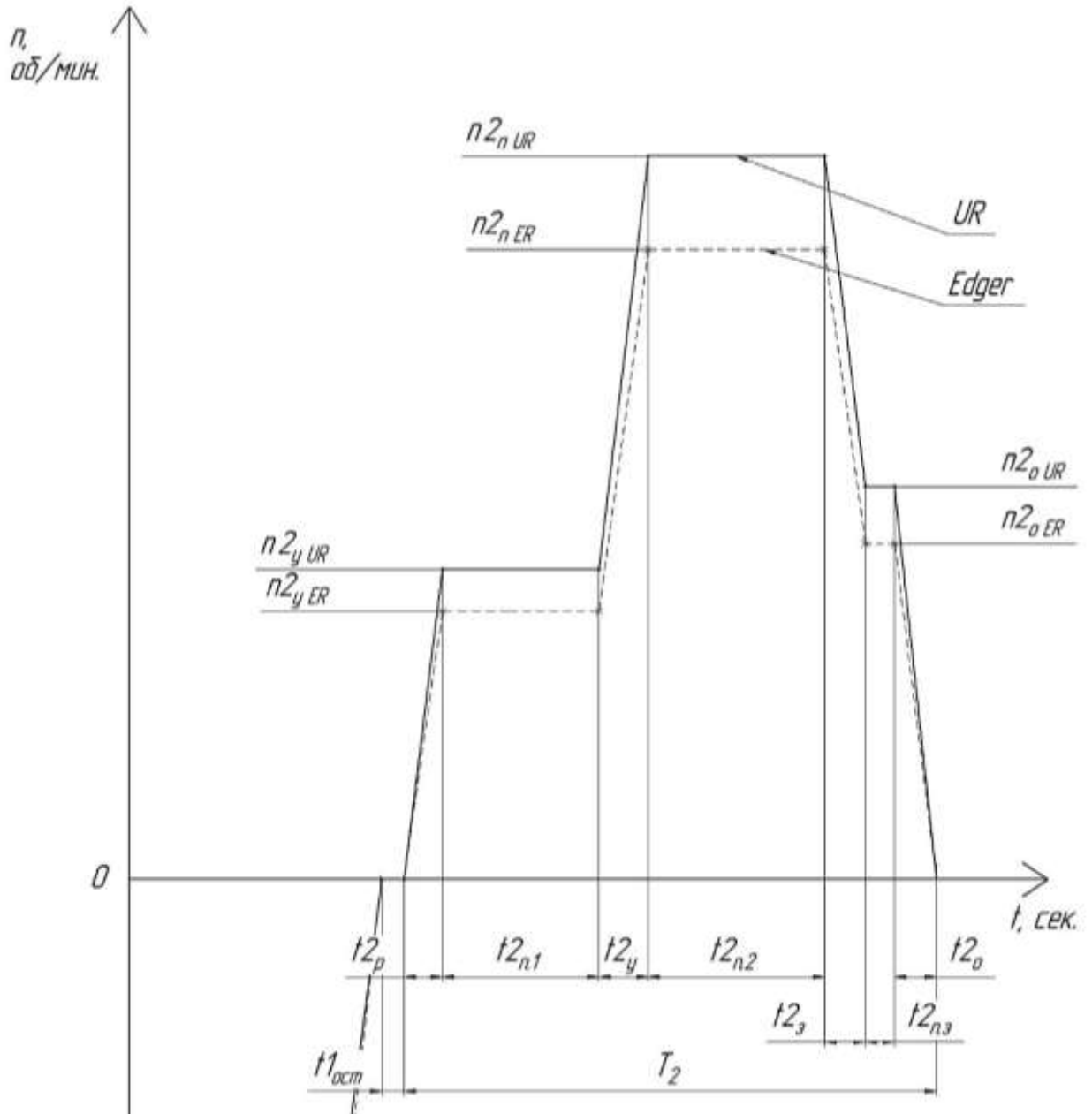


Рисунок 2.48 – Диаграмма скоростей второго прохода (сплошная линия – клеть UR, пунктирная линия – клеть ER)

Раскат вначале задается в клеть ER, а затем в клеть UR. Одновременно в автоматическом режиме в двух клетях начинается разгон валков. В клетях ER вал двигателя разгоняется от 0 до 114,97 об/мин с ускорением 69,68 об/мин·с. Разгон вала двигателя клетки UR происходит от 0 до 132,82 об/мин с ускорением 80,5 об/мин·с. После чего клетки ER и UR автоматически переводятся на вращение валков с постоянной частотой. Захват металла производится на постоянной частоте вращения валков, при этом для клетки ER при 114,28 об/мин, для клетки UR при 132,82 об/мин. После захвата раската в двух клетях ER и UR металл прокатывают с постоянной скоростью, после чего одновременно в двух клетях происходит ускорение вращения валков с металлом. Ускорение продолжается до максимальной скорости прокатки, которая обеспечивается вращением вала двигателя в клетях ER 269,67 об/мин, и в клетях UR – 309,92 об/мин. Далее в течение некоторого времени происходит прокатка металла при максимальной скорости одновременно в двух клетях (таблица 2.7).

Таблица 2.7 – Работа группы тандем во втором проходе

Операция	Клетки ER и UR, с
Время ускорения валков без раската, t_{2p}	1,65
Время вращения валков с постоянной скоростью, t_{2n1}	1,0
Время ускорения металла с раскатом, t_{2y}	2,1
Время прокатки металла при постоянной максимальной скорости, t_{2n2}	7,55
Время торможения на первой ступени, $t_{2з}$	1,75
Время вращения валков с постоянной скоростью, t_{2n3}	1,25
Время торможения на второй ступени, t_{2o}	1,8

После выхода раската из клетки ER продолжается торможение клетки UR с раскатом, и затем происходит выход раската из клетки UR. Далее валки клетки UR вращаются без раската. Дальнейшее торможение прокатных валков клетей ER и

UR осуществляются за два этапа. На первой ступени торможения для клетки ER происходит снижение оборотов вала двигателя от 269,67 об/мин до 144,11 об/мин, а для клетки UR снижением оборотов от 309,92 об/мин до 168,22 об/мин. После чего валки некоторое время вращаются с постоянной частотой вращения. Далее происходит вторая ступень торможения прокатных валков, при этом изменяются обороты вала двигателя у клетки ER от 144,11 об/мин до 0 об/мин и у клетки UR от 168,22 об/мин до 0 об/мин.

Третий проход. После остановки валков, для третьего прохода, клеть ER перемещается в осевом направлении для выставки калибра ER-3 в линию прокатки чистового прохода. Устанавливаются размеры калибров клетей UR и UF, начинается третий чистовой проход, который является завершающим. В третьем проходе прокатка осуществляется в непрерывном режиме в трех клетях UR-ER-UF (рисунок 2.49).

Главными приводами клетей валки во всех трех клетях автоматически одновременно начинают разгоняться. В клетях UR разгон валков происходит при изменении вращения вала главного двигателя от 0 до 183,44 об/мин с ускорением 73,38 об/мин·с. В клетях ER разгон вала двигателя происходит от 0 до 204,02 об/мин с ускорением 82,14 об/мин·с. В клетях UF разгон вала двигателя происходит от 0 до 216,77 об/мин с ускорением 86,71 об/мин·с. Затем валки всех трех клетей вращаются с постоянной частотой вращения.

Захват металла производится при постоянной частоте вращения валков. В клетях UR захват раската происходит при постоянной частоте вращения вала двигателя 183,44 об/мин·с. В клетях ER захват раската происходит при частоте вращения вала двигателя 204,02 об/мин, и в клетях UF при частоте вращения вала двигателя 216,77 об/мин. Далее валки клетей UR-ER-UF в течение некоторого времени прокатывают металл с постоянной скоростью.

Выход раската производится при постоянной скорости вращения валков всех клетей: из клетки UR на постоянной частоте вращения вала двигателя равной 183,44 об/мин, ER при частоте вращения вала двигателя 204,02 об/мин и UF при частоте вращения вала двигателя 216,77 об/мин. После выхода раската валки

клетей UR, ER и UF вращаются некоторое время с постоянной частотой. Затем происходит одновременное торможение валков во всех трех клетях, при этом обороты вала двигателя снижаются от 183,44 об/мин до 0 для UR; от 204,02 об/мин до 0 для ER и от 216,77 об/мин до 0 для UF (таблица 2.8).

После остановки валков во всех трех клетях валки клетей устанавливаются в исходное положение для первого прохода, т.е. в калибр UR-1, клеть ER смещается на исходную позицию калибра ER-1, а валки клетки UF разводятся, после чего непрерывная реверсивная группа клетей готова к прокатке следующего раската.

Таблица 2.8 – Работа группы тандем в третьем проходе

Операция	Клеть UR, с	Клеть ER, с	Клеть UF, с
Время ускорения валков без раската, t_{3p}	2,5	2,5	2,5
Время до захвата металла валками при постоянной скорости	1,6	3,3	4,95
Время прокатки металла при постоянной максимальной скорости	18,44	18,44	18,44
Время постоянной скорости вращения валков после выхода раската	5,95	4,25	2,6
Время торможения стана без раската, t_{3o}	2,5	2,5	2,5

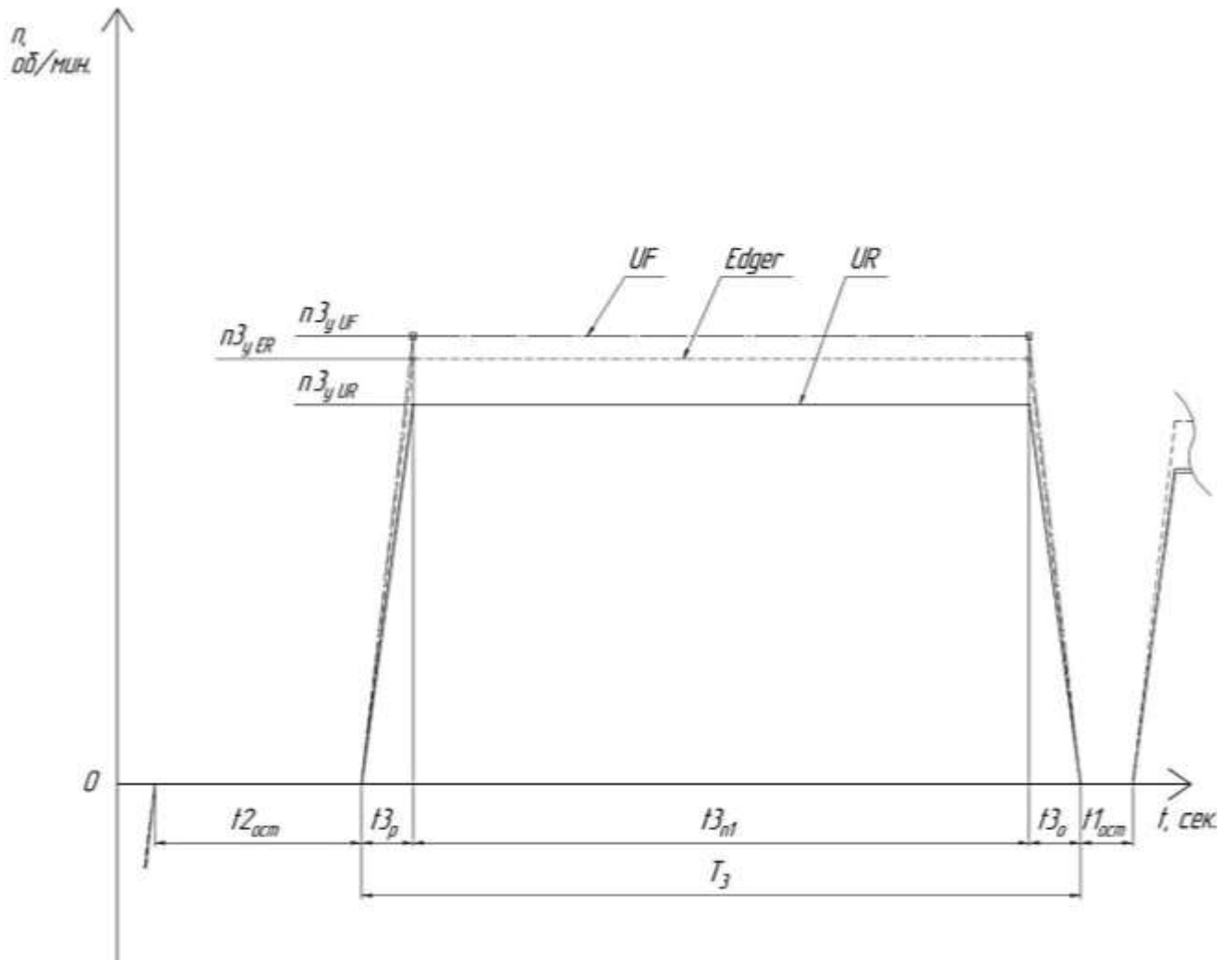


Рисунок 2.49 – Диаграмма скоростей третьего прохода

По итогам проведенных исследований скоростных режимов прокатки в чистовой непрерывной группе клетей тандем разработаны следующие рекомендации:

1) во всех проходах и во всех клетях захват раската необходимо осуществлять при постоянной частоте вращения горизонтальных валков;

2) при прокатке раската в первом и втором проходах диаграммы скоростей должны иметь две ступени с постоянной частотой вращения валков – пониженную и максимальную рабочую скорость n_n . На пониженной постоянной скорости $(0,42-0,51)n_n$ происходит устойчивый захват раската валками первой клетки, далее раскат проходит межклетьево расстояние и происходит захват раската валками следующей клетки. Затем происходит ускорение валков с

раскатом в двух клетях одновременно до максимальной рабочей скорости n_n , и далее прокатка при максимальной рабочей скорости $n_n = n_{\max}$;

3) при третьем проходе захват раската валками, прокатку и выход раската следует осуществлять при постоянной рабочей скорости равной $n_n = (0,6-0,7)n_{\max}$, где n_{\max} – максимальное количество оборотов двигателя главного привода стана;

4) торможение валков клетей UR и ER после первого и второго прохода без металла производить в два этапа. В первом проходе: для клетки UR на первой ступени торможения осуществлять снижение оборотов вала двигателя от 297,55 до 161,49 об/мин, на второй ступени торможения обеспечить снижение оборотов вала двигателя от 161,49 до 0 об/мин; для клетки ER на первой ступени торможения число оборотов вала двигателя снижать с 338,65 об/мин до 181,52 об/мин, после чего валкам клетки ER обеспечить вращение с постоянной частотой. На второй ступени торможения выполнить снижение оборотов вала двигателя клетки ER от 181,52 до 0 об/мин. Во втором проходе: на первой ступени торможения для клетки ER выполнить снижение оборотов вала двигателя от 269,67 об/мин до 144,11 об/мин, а для клетки UR снижение оборотов от 309,92 об/мин до 168,22 об/мин. После чего валкам обеспечить вращение с постоянной частотой вращения. Далее происходит вторая ступень торможения прокатных валков у клетки ER от 144,11 об/мин до 0 об/мин и у клетки UR от 168,22 об/мин до 0 об/мин.

Ожидаемый результат от предложенных эффективных скоростных режимов прокатки:

- предложен способ прокатки, в котором захват металла осуществляется при постоянной частоте вращения прокатных валков, что позволяет, в момент захвата металла, исключить влияние динамического момента вращающихся частей прокатного стана ($M_{\text{дин. стана}}$), т.е. обеспечить отсутствие динамических ударов при захвате полосы и повысить надежность оборудования главной линии прокатного стана (рисунок 2.50);

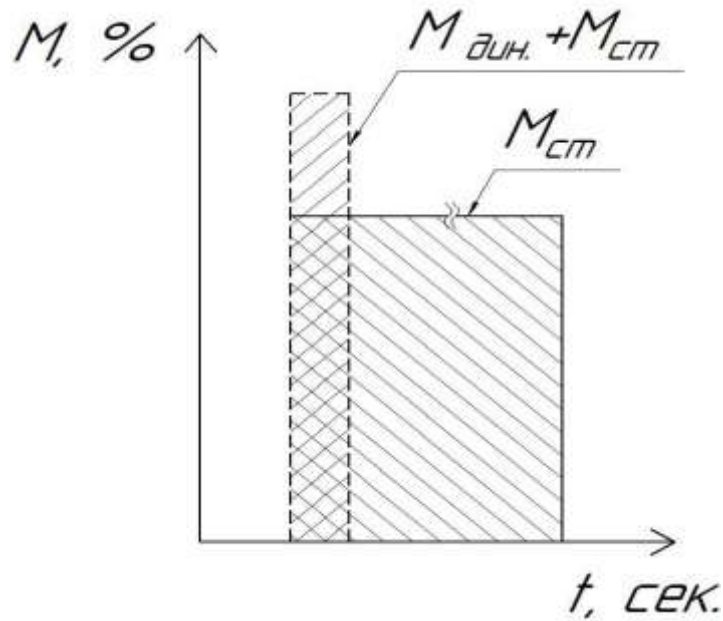


Рисунок 2.50 – График эффективности крутящего момента:

$M_{дин.} + M_{ст}$ – захват металла на этапе разгона прокатных валков;

$M_{ст}$ – захват металла при постоянной частоте вращения валков

- повысить производительность прокатного стана за счет повышения стойкости прокатных валков и увеличения межремонтного цикла оборудования прокатных клетей стана с группой тандем.

Выводы по главе 2

1. С помощью моделирования методом конечного элемента, реализованного в специализированном программном комплексе для обработки металлов давлением Deform-3D, проведено исследование распределения полей интенсивности деформаций при прокатке металла в четырехвалковых предчистовых и чистовых калибрах. При прокатке в чистовой группе клетей 55% обжатия от глубины образования желоба приходится на первый четырехвалковый калибр. Установлено, что для первого четырехвалкового калибра значения интенсивности деформаций в поверхностных слоях металла по всему периметру желоба больше единицы $\epsilon_s > 1$, что указывает на значительные деформации. Зона с максимальным

распределением полей интенсивности деформаций располагается по оси разрезного гребня у вершины разрезаемого желоба и соответствует наибольшим перемещениям объемов металла, при этом значения интенсивности деформаций в поперечном сечении составляют $\varepsilon_e = 3,5$. Зона с распределением полей, соответствующих минимальным значениям интенсивности деформаций, соответствует внутренним слоям металла, располагающимся по оси желоба и составляющим $\varepsilon_e = 1,17-1,55$. Установлено, что для калибра UF поля интенсивности деформаций в поперечном сечении раската при прокатке в чистовом калибре имеют распределение значений близкое к равномерному, при этом значения интенсивности деформаций находятся в диапазоне $\varepsilon_e = 0,05 - 0,8$, что говорит о незначительных деформациях по периметру раската.

2. По итогам проведенного моделирования получены результаты исследований по распределению полей интенсивности напряжений в поперечном сечении раската, при прокатке в первом четырехвалковом калибре. Распределение полей интенсивности напряжений имеет неравномерную картину – это обусловлено геометрическими факторами калибра, вызываемыми особенностями профиля желобчатого рельса. Наибольшие значения интенсивности напряжений составляют порядка $\sigma_e = 160$ МПа и расположены в двух местах: в головке профиля (возникают из-за деформаций металла разрезным гребнем) и в месте сопряжения шейки с подошвой профиля, т.е. в тех элементах профиля, где металл находится в стесненных условиях. С удалением от поверхностных слоев, в зоне контакта разрезного вала, значения интенсивности напряжений уменьшаются, такая же закономерность наблюдалась при распределении полей интенсивности деформаций. Исследовано распределение полей ресурса пластичности металла в первом четырехвалковом калибре, значения которого находятся в интервале $D = 0,06 - 0,25$. Установлено, что максимальные значения $D \leq 0,25$ соответствуют поверхностным слоям металла в местах контакта с разрезным гребнем. Установлено, что характер распределения полей коэффициента ресурса

пластичности, в поперечном сечении профиля, зависит от распределения полей интенсивности деформаций и интенсивности напряжений.

3. При проведении моделирования методом конечных элементов проведено исследование трансформации и выработки осевой пористости в непрерывнолитой заготовке при ее прокатке в черновых клетях ВД-1 и ВД-2. Суммарное абсолютное обжатие вдоль оси шейки рельса составляет 150 мм и в перпендикулярном направлении 112 мм. Проведено исследование значений интенсивности деформаций, интенсивности напряжений и ресурса пластичности металла для второго, седьмого, девятого и двенадцатого проходов с оценкой трансформации осевой пористости, которая изначально имеет площадь поперечного сечения до 1256,6 мм². Для второго прохода в ящичном калибре максимальные значения интенсивности деформаций составляют $\varepsilon_e = 1,46$, интенсивности напряжений $\sigma_e = 167$ МПа, ресурс пластичности $D = 0,2$. При этом площадь поперечного сечения осевой пористости после второго прохода составляет $S = 998,24$ мм². Для седьмого прохода в ящичном калибре наибольшие значения интенсивности деформаций имеет металл, находящийся по радиусам сопряжения бочки вала с выпусками калибра, максимальные значения интенсивности деформаций составляют $\varepsilon_e = 0,87$, интенсивности напряжений $\sigma_e = 162$ МПа, ресурса пластичности $D = 0,122 - 0,162$, а площадь поперечного сечения осевой пористости уменьшилась до $S = 364,5$ мм². Для девятого прохода в рельсовом разрезном калибре закрытой формы с односторонним расположением разъемов значения интенсивности деформаций распределяются неравномерно, что обусловлено геометрическими факторами калибра. При этом в девятом калибре наибольшие значения интенсивности деформаций соответствуют разрезному гребню по закрытому ручью $\varepsilon_e = 2,25$ при угле гребня 77° с радиусом притупления $R = 16$ мм, при этом интенсивность напряжений $\sigma_e = 125 - 167$ МПа, коэффициент ресурса пластичности составляет $D = 0,2 - 0,3$, а площадь поперечного сечения осевой пористости уменьшилась до $S = 40,13$ мм². В двенадцатом проходе, который является последним в клетях ВД-2, осевая

пористость полностью отсутствует, максимальные значения интенсивности деформаций составляют $\varepsilon_e = 1,25 - 1,67$, интенсивности напряжений составляют $\sigma_e = 166$ МПа, ресурса пластичности $D = 0,125 - 0,168$. При прокатке осевая пористость локализуется в шейке профиля. Заваривание осевой пористости и полная выработка происходит в десятом проходе, при этом суммарный коэффициент вытяжки составляет $\Sigma\lambda_{1+10} = 4,13$. В последующих проходах раскрытие осевой пористости не происходит.

4. С применением методики планирования многофакторного эксперимента и моделирования методом конечных элементов проведено исследование процесса изменения размеров фланцев профиля при прокатке с целью получения профиля с регламентированной геометрией. Установлено, что у подошвы максимальная склонность к утяжке с коэффициентом $\overline{\beta}_{n1} = 0,96$, а $\overline{\beta}_{n2} = 1,01$ имеет максимальную склонность к приращению, при этом для головки максимальное приращение соответствует $\overline{\beta}_{z3} = 1,11$, а максимальная склонность к утяжке $\overline{\beta}_{z1} = 0,9$. По итогам исследования получены уравнения регрессии по нахождению абсолютного и относительного коэффициента изменения размеров фланцев профиля при прокатке в четырехвалковых калибрах.

5. Предложен эффективный способ прокатки в четырехвалковых калибрах, заключающийся в обеспечении равенства сил (минимальное различие сил) прокатки в горизонтальной плоскости от обжатия вертикальными валками. При проведении моделирования процесса прокатки трамвайных рельсов установлена закономерность для четырехвалковых калибров, заключающаяся в том, что равенство сил прокатки между вертикальными валками $P_r/P_n = 0,85 \div 1,19$ возможно обеспечить при выполнении условия отношения смещаемых объемов металла от обжатия вертикальными валками, при котором $V_p/V_n = 3,22 \div 4,44$, тогда коэффициенты изменения размеров головки и подошвы профиля составляют $\beta_n = \beta_z = 0,99 \div 1,01$. Проведено компьютерное моделирование по исследованию формы и объемов геометрического очага деформации с оценкой коэффициента эффективности калибров. Предложен метод расчёта проекции

контактной площади металла с валком и смещаемого объема металла в геометрическом очаге деформации при прокатке сложных профилей с использованием системы трехмерного твердотельного моделирования.

б. Разработаны эффективные скоростные режимы прокатки в чистовой реверсивной группе клетей. Предлагается способ прокатки, в котором во всех проходах и во всех клетях захват раската осуществляется при постоянной частоте вращения валков. При прокатке раската в первом и втором проходах диаграммы скоростей имеют две ступени с постоянной скоростью вращения валков: пониженную и максимальную рабочую скорость n_n . На пониженной постоянной скорости $(0,42-0,51)n_n$ происходит устойчивый захват раската валками первой клетки, далее раскат проходит межклетьевое расстояние, и происходит захват раската валками следующей клетки. Затем происходит ускорение валков с раскатом в двух клетях одновременно до максимальной рабочей скорости n_n , и далее осуществляется прокатка при максимальной рабочей скорости n_n . При третьем проходе захват раската валками, прокатка и выход раската осуществляется при постоянной рабочей скорости равной $n_n = (0,6 \div 0,7)n_n$. Предложенные эффективные скоростные режимы, в которых захват металла осуществляется при постоянной частоте вращения прокатных валков, позволяет, в момент захвата металла, исключить влияние динамического момента вращающихся частей прокатного стана, а за счет того, что полоса движется с линейной скоростью равной окружной скорости вращения валков, это позволяет обеспечить отсутствие динамических ударов при захвате полосы и повысить надежность оборудования главной линии прокатного стана. Применение разработанных эффективных скоростных режимов позволяет увеличить производительность прокатного стана с группой тандем, повысить стойкость прокатных валков и увеличить межремонтный цикл оборудования прокатных клетей.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ АСИММЕТРИЧНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ПРОФИЛЕЙ НА СТАНЕ С ГРУППОЙ ТАНДЕМ ПРИМЕНЕНИЯ НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Технология производства трамвайных рельсов на стане с группой тандем в рельсобалочном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Рельсобалочный стан с группой тандем АО «ЕВРАЗ ЗСМК» предназначен для производства крупносортового проката, в том числе рельсовых профилей. Техническая характеристика прокатного стана с группой тандем:

- тип стана – с последовательным расположением клетей включающий непрерывную чистовую группу;
- количество групп клетей – три;
- число клетей – шесть, в том числе:
- черновая группа – две клетки BD-1, BD-2;
- чистовая непрерывно-реверсивная группа (группа тандем) – три клетки (UR, E, UF);
- отдельно стоящая клеть U0.

Система клетей:

- обжимные клетки BD-1 и BD-2 – дуо реверсивные; изготовитель фирма «SMS Meer»;
- универсальная клеть UR реверсивная; изготовитель «SMS Meer»;
- эджерная клеть ER дуо реверсивная; изготовитель «SMS Meer»;
- универсальная клеть UF реверсивная; изготовитель «SMS Meer»;
- универсальная отдельно стоящая клеть U0 реверсивная; изготовитель «SMS Meer».

Схема расположения оборудования рельсобалочного стана с группой тандем показана на рисунке 3.1. При прокатке асимметричных рельсовых профилей участвуют две обжимные реверсивные клетки дуо BD-1 и BD-2, а также

непрерывная реверсивная группа клеток тандем, которая состоит из двух универсальных клеток UR и UF, между которыми установлена эджерная клетка дуо ER. На рельсобалочном стане с группой тандем ЕВРАЗ ЗСМК есть отдельно стоящая чистовая универсальная клетка U0, но разработанная в диссертации технология позволяет не применять данную клетку при прокатке асимметричных рельсовых профилей.

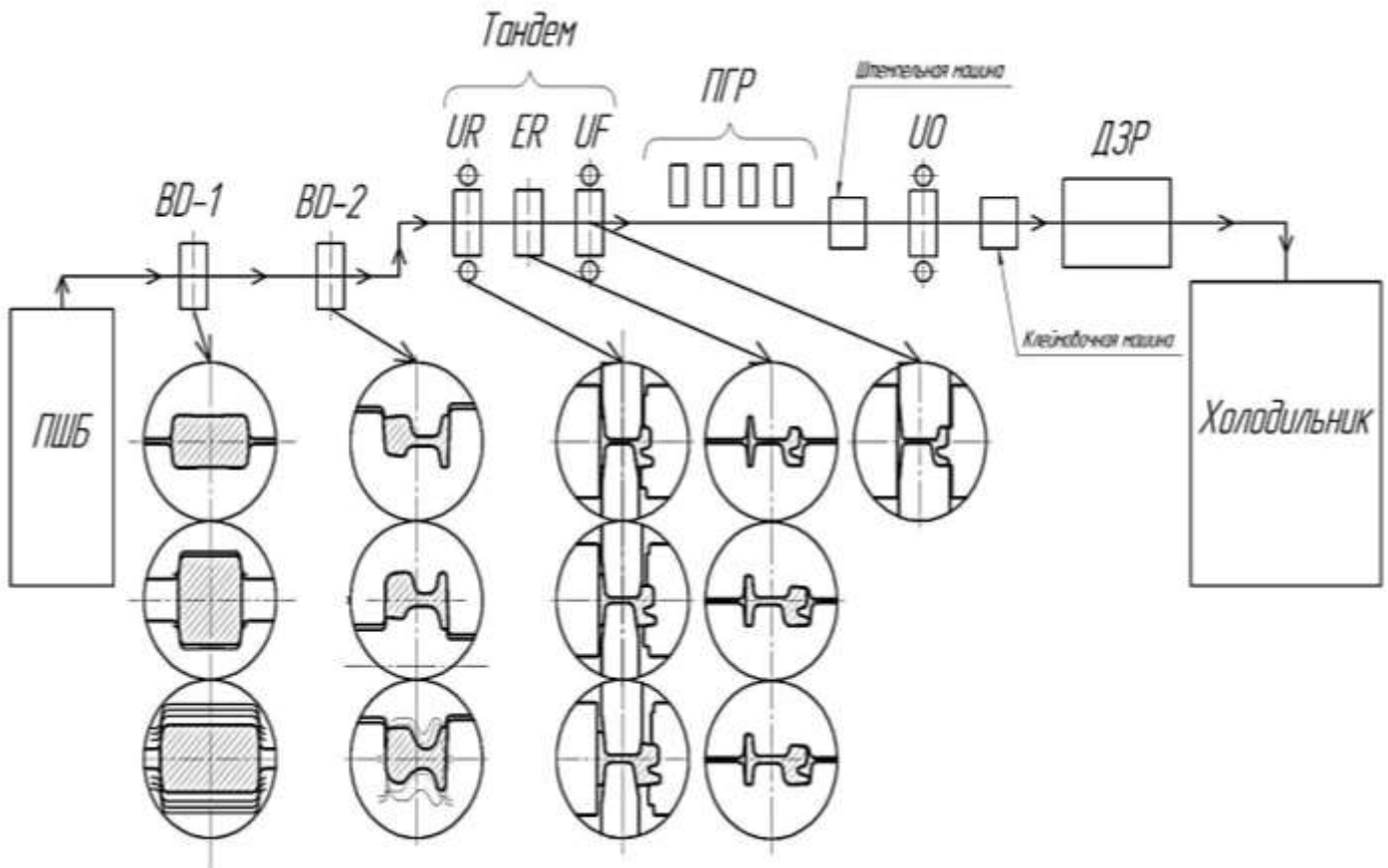


Рисунок 3.1 – Схема расположения основного оборудования на участке нагревательная печь – холодильник

Общая схема технологического процесса производства трамвайных рельсов, следующая: металл для заготовки выплавляют в дуговой электросталеплавильной печи (ДСП), который после ДСП поступает на агрегат комплексной обработки стали (АКП) для доведения химического состава стали до требований ГОСТ. Затем, с целью снижения количества содержания водорода в жидкой стали,

металл обрабатывают на вакууматоре (VD-130). Далее металл разливают на машине непрерывного литья (МНЛЗ) в заготовку 365 x 300 мм и после порезки на мерные длины, из расчета длины готового рельса с учетом технологических припусков на обрезь, заготовка поступает на участок замедленного охлаждения. Допускаемые отклонения от геометрических размеров заготовки: по толщине ± 9 мм; по ширине ± 11 мм; по длине (0 + 20) мм; разность диагоналей по сечению не более 0,7 суммы предельных отклонений по толщине; косина торцов не более 15 мм; кривизна не более 0,5 % длины; выпуклость (вогнутость) граней не более 5 мм на сторону.

Нагрев заготовок перед прокаткой, осуществляется в нагревательной методической печи с шагающими балками (ПШБ), с верхним и нижним отоплением. Посадка и нагрев НЛЗ в печи с шагающими балками для последующей прокатки производится до температур, установленных в таблице 3.1. Минимальное время нагрева заготовок любых марок стали в печи с шагающими балками должно составлять не менее 3,5 ч [345, 346].

Таблица 3.1 – Режимы нагрева заготовок в ПШБ перед прокаткой

Темпе- ратура нагрева металла, °С	Установленная температура, °С									
	Зона 1–2		Зона 3–4		Зона 5–6		Зона 7–8		Зона 9–10	
	верх	низ	верх	низ	верх	низ	верх	низ	верх	низ
1200	1050	1050	1200	1200	1275	1275	1270	1270	1270	1270
–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1240	1150	1150	1240	1240	1290	1290	1285	1285	1285	1285

Для оценки качества нагрева заготовок измеряется температура полос стационарным пирометром, установленным перед клетью VD-1. Данная температура для всех профилей должна быть не выше 1220 °С. Контроль температуры поверхности металла в конце прокатки для рельсовых профилей

производится с помощью аналогичного прибора, установленного после клетки U0. Эта температура должна быть не более 1000 °С.

Все необходимые заданные значения для прокатки, например, номер калибра, кантовка, позиция линеек перемещения, позиция установки верхнего валка, скорость первого прохода, скорость прокатки, скорость на выходе, схемы проходов и т.д., принимаются от ЭВМ или задаются оператором.

В зонах рабочих рольгангов до и после клетки ВD-1 (рисунок 3.2) установлены кантователи и устройство перемещения и центровки для направления раската к калибрам валков в соответствии со схемой (программой) прокатки. Для контроля процесса прокатки на стороне выхода предусмотрена видеокамера с дисплеем на посту управления.



Рисунок 3.2 – Прокатка в клетки ВD-1

Прокатка заготовок в клетях ВД-2 (рисунок 3.3) производится в соответствии с разработанными схемами прокатки в калиброванных валках за несколько проходов в реверсивном режиме.

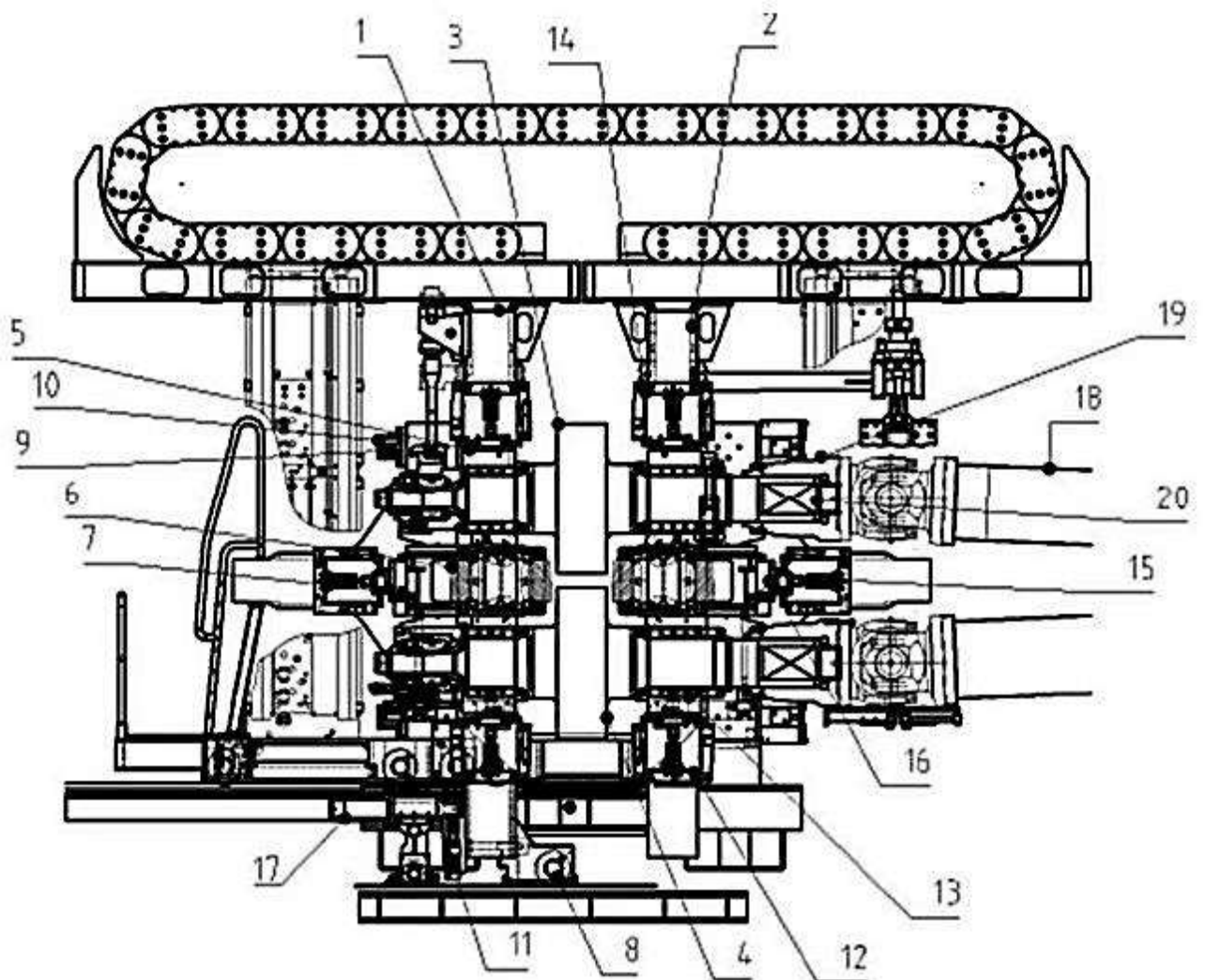


Рисунок 3.3 – Прокатка трамвайных рельсов в клетях ВД-2

В конце удлиненного рольганга за клетью ВД-2 расположена маятниковая пила с транспортом отвода концевой обрезки, которая используется для удаления искривленных передних концов раскатов перед прокаткой в чистовой группе клетей тандем. С удлиненного рольганга, расположенного за клетью ВД-2, раскат с помощью устройства поперечной транспортировки перекладывается на удлиненный рольганг перед группой тандем. Принцип работы устройства поперечной транспортировки заключается в поднятии раската и переносе его при помощи цепной транспортной системы на рольганг перед группой тандем.

Прокатка в непрерывной группе клетей тандем (ТДМ). Прокатные клетки UR, ER и UF (рисунок 3.4) установлены в одну группу клетей в виде линии тандем. На линии тандем прокатка ведется несколькими проходами в реверсивном режиме.

Процесс прокатки трамвайных рельсов в группе тандем выполняется за 3 прохода в соответствии со схемой прокатки.



1 – половина станины со стороны обслуживания; 2 – половина станины со стороны привода; 3 – верхний валок; 4 – нижний валок; 5 – подушка горизонтального валка; 6 – вертикальный валок; 7 – подушка вертикального валка; 8 – роликовая стойка; 9 – стяжной болт; 10 – блокировка стяжного блока; 11 – цилиндр перевалки / зажимное приспособление; 12 – нижнее гидравлическое устройство установки; 13 – вкладыши; 14 – верхнее гидравлическое устройство установки; 15 – вертикальное гидравлическое устройство установки; 16 – вкладыши; 17 – перевалочные цилиндры; 18 – приводные шпинделя; 19 – трещ; 20 – цапфа вала

Рисунок 3.4 – Схема универсальной клетки группы тандем (UR, UF)

Непрерывно-реверсивная чистовая группа клетей (рисунок 3.5) имеет следующие основные возможности:

- автоматическое управление последовательностью проходов;
- моделирование в режиме онлайн управления процессом;
- управление минимальным натяжением:
 - способ сравнения моментов вращения;
 - квоциентный способ (соотношение момента вращения и усилия прокатки);
- выявление неправильного процесса прокатки;
- автоматическая калибровка клетей (предотвращение осевого смещения верхнего вала относительно нижнего, правильная установка вертикальных валков и обеспечение линии прокатки в группе тандем);
- гидравлическое регулирование положения горизонтальных и вертикальных валков, а также положения самих клетей относительно линии прокатки;
- автоматическая обработка данных по каждой клетке в проходе (около 500 параметров, в том числе усилия и моменты прокатки);
- автоматическое управление последовательностью замены валков и привалковой арматуры при перевалках.

Клетки UR и UF изготовлены по принципу CCS (Compact Cardridge Stand, что в переводе с английского – компактные кассетные станины). Отличительным признаком универсальной клетки CCS являются две стальные станины, соединенные между собой стяжками с гидравлическим предварительным натягом. Для настройки калибра и исключения отдачи клетки используется гидравлическая система настройки и уравнивания валков. Система гидравлики имеет высокое давление порядка 200 bar, при этом регулирование позиции валков обеспечивает автоматическая система TCS (Technological Control System).

Клетки рассчитаны на автоматическую перевалку полного комплекта валков, включая привалковую арматуру. Привод верхнего и нижнего горизонтальных валков обеспечивается шпинделями и шестеренной клетью ($i = 5,3$) с приводом от синхронного двигателя.

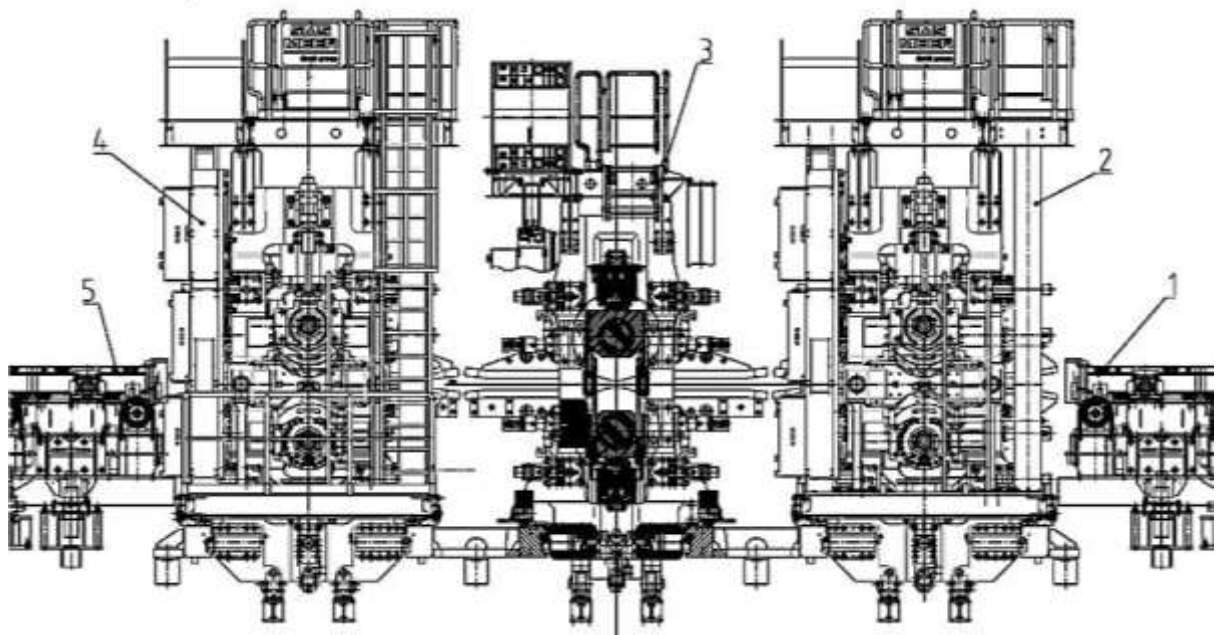


Рисунок 3.5 – Схема расположения клетей в группе тандем: 1 – рабочий рольганг перед клетью UR; 2 – универсальная клеть UR; 3 – эджерная клеть ER; 4 – универсальная клеть UF; 5 – рабочий рольганг за клетью UF

Контроль температуры поверхности металла на этапе прокатки в клетях группы тандем производится с помощью пирометра, установленного перед и за группой тандем (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Контроль температуры раската трамвайного рельса перед первым проходом в чистой реверсивной группе клетей

Фотография общего вида чистовой группы клетей тандем приведена на рисунке 3.7. Клеть UR является черновой, а клеть UF чистой в группе клетей тандем. Прокатные клетки UR и UF при прокатке трамвайных рельсов работают в универсальном режиме с использованием неприводных вертикальных валков. Клеть ER (эджерная) работает только как клеть дуо и применяется для контроля фланцев профиля. При смене калибра между вторым и третьим проходом клеть передвигается для установки калибра в линию прокатки. Прокатные клетки UR и UF имеют одинаковую конструкцию.



Рисунок 3.7 – Непрерывная прокатка трамвайных рельсов в клетях группы тандем в третьем проходе

Для задачи раската в калибр и удержания раската между клетями группы тандем применяется система привалковой арматуры (рисунок 3.8). Прокатные валки охлаждаются с помощью орошения водой (рисунок 3.9). Включение и выключение охлаждающей воды происходит централизованно, через заслонку с электропневматическим приводом. Чтобы предотвратить одностороннее охлаждение валков между проходами, валки вращаются на медленной скорости. На вертикальных валках имеется отдельное охлаждение.

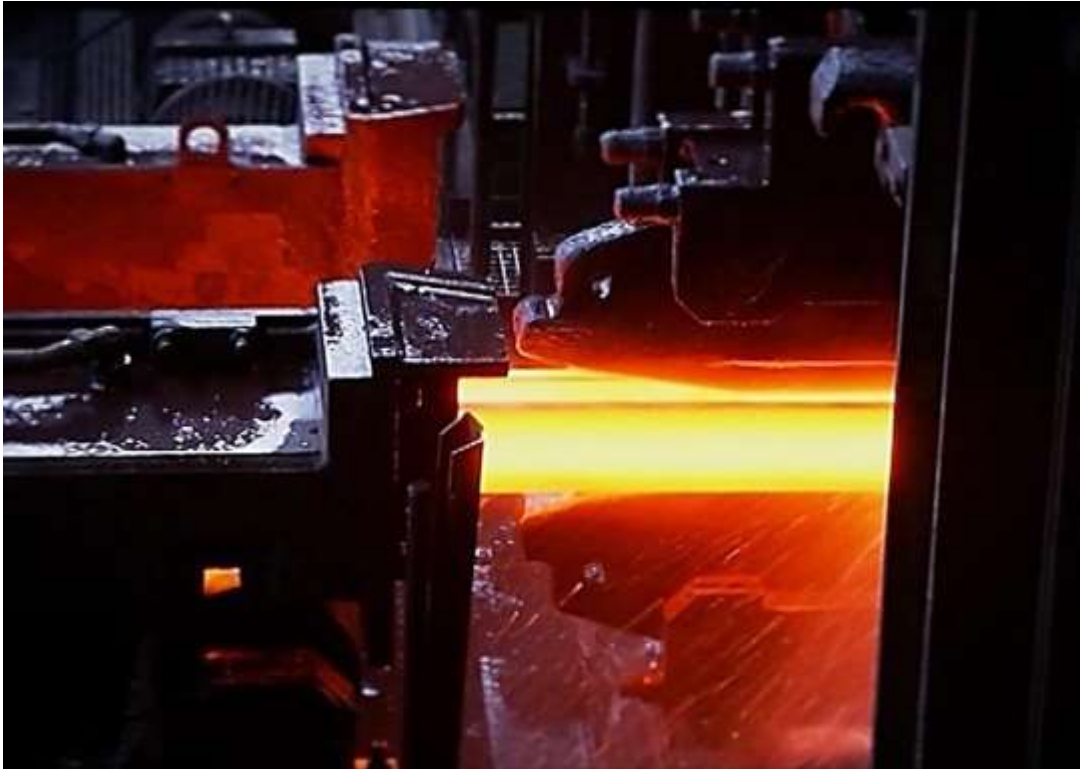


Рисунок 3.8 – Удержание раската трамвайного рельса в клетки UF с помощью привалковой арматуры



Рисунок 3.9 – Система охлаждения валков при прокатке трамвайных рельсов в непрерывной группе клеток тандем на выходе из клетки UF

Чтобы убрать воду, попадающую на раскат во время охлаждения валков, перед клетью UR и за UF, предусмотрены, над прокатной линией, спреерные балки (воздушный спреер), через отверстия которого на профиль подается сжатый воздух в направлении клетки и в обратном направлении.

На поднимающихся рольгангах, расположенных до и после группы тандем, размещены устройства направления и центрирования раската, а для удаления прилипшей к прокату окалины в устройство центрирования перед группой тандем встроены сопла гидросбива окалины. Прокатка на стане с группой тандем производится в соответствии с разработанными схемами прокатки.

После прокатки на стане тандем раскат подается на участок пил горячей резки (ПГР) для дальнейшей порезки на мерные длины. Порезка на пилах горячей резки производится при температуре раската, соответствующей температуре конца прокатки. Пилы устанавливаются с учетом припуска на температурную усадку и допуска на длину готового проката в холодном состоянии с учетом головной и концевой обрезки. После порезки раскаты транспортируются на холодильник участка охлаждения горячего металла.

Геометрические размеры готового профиля трамвайного рельса проверяются:

- постоянно в течение прокатки с помощью бесконтактной системы непрерывного измерения, которая показывает форму поперечного сечения по всей длине раската;
- периодически на пробах, отбираемых от раскатов. Отбор проб для контроля геометрии профиля от проката производится на пилах горячей резки.

После клеймения прокат транспортируется на холодильник участка отделки горячего металла (УОГМ) [347]. По достижении температуры правки трамвайные рельсы с участка холодильника транспортируются для последующей правки на роликоправильной машине. Правка должна обеспечивать получение прямолинейности полос в соответствии с требованиями ГОСТ. После правки трамвайные рельсы обрабатывают в размер, при необходимости, сверлят болтовые отверстия и проводят контроль ОТК.

3.2 Разработка эффективной технологии прокатки трамвайных рельсов в четырехвалковых калибрах методом планирования эксперимента

Для разработки новой ресурсосберегающей технологии прокатки трамвайных рельсов с регламентированной геометрией, проведено планирование многофакторного эксперимента в калибрах, оказывающих основное влияние на получение требуемой геометрии профиля – это четырехвалковые калибры чистовой группы клетей тандем. В качестве критерия эффективности выбрано равенство сил прокатки (минимизация различия усилий прокатки), возникающих от обжатия вертикальными валками в четырехвалковом калибре. Данное положение предлагается применять в дополнении к известному способу расчета калибровок с учетом равенства коэффициентов вытяжек по фланцам профиля [165].

Выбор факторов и уровней их варьирования осуществлялся, исходя из накопленного опыта прокатки трамвайных рельсов и ранее проводимых автором научно-исследовательских работ, а также сведений в литературе [60, 61]. Расчеты по планированию эксперимента выполнены в соответствии с методиками, изложенными в работах [270, 271].

Факторы, с помощью которых проведено планирование эксперимента:

- 1) глубина внедрения разрезного валка (калибры UR-UF) – X_1 ;
- 2) диаметр разрезного валка – X_2 ;
- 3) обжатие гладкого валка по подошве (калибры UR-UF) – X_3 ;
- 4) температура прокатки – X_4 ;
- 5) диаметр гладкого ролика – X_5 ;
- 6) диаметр горизонтальных валков – X_6 .

Уровни факторов в натуральном масштабе, а также поставленные им в соответствие уровни F_i приведены в таблице 3.2.

Полный факторный эксперимент для данного случая: $4 \times 3^2 \times 2^3 = 288$ экспериментов. Для уменьшения объемов экспериментов построена модель только для главных эффектов [270, 271].

Таблица 3.2 – Факторы и уровни их варьирования

i	Фактор	X _i	F _i
1	Глубина внедрения разрезного валка, мм	20	0
		40	1
		60	2
		80	3
2	Диаметр разрезного валка, мм	840	0
		515	1
		325	2
3	Обжатие гладкого валка по подошве, мм	1,52	0
		6,52	1
		11,91	2
4	Температура прокатки, °С	1000	0
		950	1
5	Диаметр гладкого валка, мм	800	0
		650	1
6	Диаметр горизонтальных валков, мм	1200	0
		1000	1

С учетом числа уровней варьирования факторов модель для главных эффектов будет иметь следующий вид [270]:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^6 b_i X_i + \sum_{i=1}^3 b_{ii} X_i^2 + b_{111} X_1^3 \quad (3.1)$$

Поскольку в модели (3.1) число экспериментов плана не может быть меньше 11, также требуется иметь степени свободы для проверки адекватности модели, поэтому принимаем составление плана $4 \times 3^2 \times 2^3 // 16$, преобразовав его из плана $4^5 // 16$, по каталогу Бродского В.З. [271].

Варианты преобразований плана $4^5//16$ в план $4 \times 3^2 \times 2^3//16$ представлены в таблице 3.3. Как видно из таблицы, варианты А и Г лучше остальных и позволяют получить практически Q – оптимальный план ($\Psi=0,94$) [270, 271].

Таблица 3.3 – Варианты преобразований плана $4^5//16$ в план $4 \times 3^2 \times 2^3//16$ [270]

Факторы исход- ного плана $4^5//16$	А			Б			В			Г		
	Вид преоб- ржава- ния	S r	Ψ r	Вид преобра- зования	S r	Ψ r	Вид преобра- зования	S r	Ψ r	Вид преобра- зования	S r	Ψ r
F ₁	4→4 3б	3	1, 0	4→4 3а	3	1, 0	4→4 3а	3	1, 0	4→4 3б	3	1, 0
F ₂	4→3 3б	2	0, 9	4→3x2 3а	3	0, 6	4→3x2 3б	3	0, 6	4→3 3б	2	0, 9
F ₃	4→3 2а	2	0, 9	4→3x2 2в	3	0, 6	4→3 2в	2	0, 9	4→3 2б	2	0, 9
F ₄	4→2 ³	3	1, 0	4→2	1	1, 0	4→2 2в	1	1, 0	4→2 ² 2в	2	1, 0
F ₅	-	-	-	-	-	-	4→2	1	1, 0	4→2	1	1, 0
k'	11			11			11			11		
n	4			4			5			5		
Ψ	0,94			0,72			0,79			0,94		

где k' - число оставленных коэффициентов уравнения (включая b_0);

Ψ - коэффициент эффективности;

$$\Psi = \frac{k'}{1-n+\sum_{r=1}^n \frac{1+S_r}{\Psi_r}}; \quad (3.2)$$

n – число преобразований (включая тождественные преобразования);

r – номер преобразования;

$$S_r = (S_1 - 1) + (S_2 - 1) + \dots; \quad (3.3)$$

S – число уровней нового фактора, вводимого с помощью r-го преобразования;

Ψ_r – коэффициент эффективности r-го преобразования (указан в каталоге [270, 271]), при тождественном преобразовании $\Psi_r = 1$.

Для плана А необходимы преобразования [270, 271]:

- первый четырехуровневый план $4^5//16$ без изменения;

- второй и третий заменены на трехуровневые с помощью преобразования 3 б;
- четвертый – на три двухуровневых с помощью преобразования 2 а;
- пятый вычеркнут.

Матрица с вышеизложенными преобразованиями в план $4 \times 3^2 \times 2^3 // 16$ в кодах F_i представлена в таблице 3.4

Таблица 3.4 – Матрица с преобразованиями в план $4 \times 3^2 \times 2^3 // 16$ в кодах F_i [270]

Номер эксперимента	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6
1	0	0	0	0	1	1
2	2	0	1	1	0	1
3	3	0	2	0	0	0
4	1	0	0	1	1	0
5	0	1	1	0	0	0
6	2	1	0	1	1	0
7	3	1	0	0	1	1
8	1	1	2	1	0	1
9	0	2	2	1	1	0
10	2	2	0	0	0	0
11	3	2	0	1	0	1
12	1	2	1	0	1	1
13	0	0	0	1	0	1
14	2	0	2	0	1	1
15	3	0	1	1	1	0
16	1	0	0	0	0	0

Запишем теперь этот план в натуральном масштабе, оставив при этом уравнениям качественных факторов X_1 и X_4 [270, 271] обозначение уровней соответственно F_1 и F_4 (таблица 3.5).

Таблица 3.5 – Матрица плана $4 \times 3^3 \times 2^3 // 16$ в натуральном масштабе

Номер эксперимента	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	Порядок реализации
1	0	840	1,52	0	650	1000	3
2	2	840	6,52	1	800	1000	4
3	3	840	11,91	0	800	1200	13
4	1	840	1,52	1	650	1200	2
5	0	515	6,52	0	800	1200	11
6	2	515	1,52	1	650	1200	1
7	3	515	1,52	0	650	1000	9
8	1	515	11,91	1	800	1000	10
9	0	325	11,91	1	650	1200	5
10	2	325	1,52	0	800	1200	12
11	3	325	1,52	1	800	1000	8
12	1	325	6,52	0	650	1000	7
13	0	840	1,52	1	800	1000	16
14	2	840	11,91	0	650	1000	14
15	3	840	6,52	1	650	1200	6
16	1	840	1,52	0	800	1200	15

В последнем столбце таблицы приведен порядок реализации экспериментов, выбранный по таблице случайных чисел [270, 271].

Для обработки данных такого эксперимента необходимо перейти к следующему кодовому масштабу. Построим модель [270, 271]:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^6 b_i x_i + \sum_{i=1}^3 b_{ii} z_i + b_{111} q_1, \quad (3.4)$$

где x_i – линейная функция от X_i ;

z_i – квадратичная функция от X_i ;

q_1 – кубическая функция от X_i

Составленный план позволяет оценить коэффициенты модели «у» ортогонально друг другу. Как известно, в случае ортогональности равны нулю сумма элементов любого столбца матрицы планирования, а также сумма произведений элементов любых двух столбцов этой матрицы [270]. Будем использовать эти условия при выборе соответствующих функций в уравнении (3.4).

Запишем x_i как линейную функцию от X_i [270, 271]:

$$x_i = k_i(X_i + A_i), \quad (3.5)$$

где k_i, A_i – константы.

$$\text{Необходимо выполнение условия: } \sum_{u=1}^N x_{i_u} = 0 \quad (3.6)$$

После подстановки (3.5) в (3.6) получим:

$$\sum_{u=1}^N x_{i_u} = k_i \sum_{u=1}^N (X_{i_u} + A_i) = 0 \quad (3.7)$$

или

$$\sum_{u=1}^N X_{i_u} + NA_i = 0 \quad (3.8)$$

Отсюда

$$A_i = -\frac{1}{N} \sum_{u=1}^N X_{i_u}. \quad (3.9)$$

Подсчитаем A_i (суммируя значения столбцов X_i из таблицы 3.5)

$$A_1 = -1,5; A_2 = -630; A_3 = -5,37; A_4 = -0,5; A_5 = -725; A_6 = -1100.$$

Выбор уровней x_i приведен в таблице 3.6.

Коэффициент k_i выбирается из условия, приведенного в работе Бродского В.З. [271]:

$$k_i = \frac{2}{X_{i \max} - X_{i \min}}. \quad (3.10)$$

Соответственно коэффициент k_i для факторов составит:

$$k_1 = \frac{1}{30}; k_2 = \frac{2}{515}; k_3 = \frac{2}{10,39}; k_4 = \frac{1}{25}; k_5 = \frac{1}{75}; k_6 = \frac{1}{100}.$$

Формулы перехода от натуральных значений X_i к кодированным x_i и обратно получаем следующие:

$$x_1 = \frac{1}{30} (X_i - 1,5);$$

$$x_2 = \frac{2}{515}(X_2 - 630);$$

$$x_3 = \frac{2}{10,39}(X_3 - 5,37);$$

$$x_4 = \frac{1}{25}(X_4 - 0,5);$$

$$x_5 = \frac{1}{75}(X_5 - 725);$$

$$x_6 = \frac{1}{100}(X_6 - 1100).$$

Таблица 3.6 – Выбор уровней x_i

i	X_i	$X_i + A_i$	k_i	x_i
1	20	18,5	$\frac{1}{30}$	0,62
	40	38,5		1,28
	60	58,5		1,95
	80	78,5		2,62
2	840	210	$\frac{2}{515}$	0,82
	515	-115		-0,45
	325	-305		-1,18
3	1,52	-3,85	$\frac{2}{10,39}$	-0,74
	6,52	0,88		0,17
	11,91	6,54		2,29
4	1000	999,5	$\frac{1}{25}$	39,98
	950	949,5		37,98
5	800	75	$\frac{1}{75}$	1
	650	-75		-1
6	1200	100	$\frac{1}{100}$	1
	1000	-100		-1

Запишем уровни x_i в план эксперимента в кодовом масштабе представленные в таблице 3.7. Столбец x_0 , как и во всех аналогичных случаях, состоит из одних +1 [270, 271].

Таблица 3.7 – Матрица плана $4 \times 3^2 \times 2^3 // 16$ в кодовом масштабе

Номер эксперимента	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	z_1	z_2	z_3	z_4	q_1
1	1	0,62	0,82	-0,74	39,98	-1	-1	-24,48	-2,88	0,55	-24889,55	1,5
2	1	1,95	0,82	0,17	37,98	1	-1	-67,58	-2,88	-4,08	-24796,47	16,53
3	1	2,62	0,82	2,29	39,98	1	1	-87,96	-2,88	-37,8	-24889,55	34,15
4	1	1,28	0,82	-0,74	37,98	-1	1	-46,3	-2,88	0,55	-24796,47	6,25
5	1	0,62	-0,45	0,17	39,98	1	1	-24,48	1,02	-4,08	-24889,55	1,5
6	1	1,95	-0,45	-0,74	37,98	-1	1	-67,58	1,02	0,55	-24796,47	16,53
7	1	2,62	-0,45	-0,74	39,98	-1	-1	-87,96	1,02	0,55	-24889,55	34,15
8	1	1,28	-0,45	2,29	37,98	1	-1	-46,3	1,02	-37,8	-24796,47	6,25
9	1	0,62	-1,18	2,29	37,98	-1	1	-24,48	4,72	-37,8	-24796,47	1,5
10	1	1,95	-1,18	-0,74	39,98	1	1	-67,58	4,72	0,55	-24889,55	16,53
11	1	2,62	-1,18	-0,74	37,98	1	-1	-87,96	4,72	0,55	-24796,47	34,15
12	1	1,28	-1,18	0,17	39,98	-1	-1	-46,3	4,72	-4,08	-24889,55	6,25
13	1	0,62	0,82	-0,74	37,98	1	-1	-24,48	-2,88	0,55	-24796,47	1,5
14	1	1,95	0,82	2,29	39,98	-1	-1	-67,58	-2,88	-37,8	-24889,55	16,53
15	1	2,62	0,82	0,17	37,98	-1	1	-87,96	-2,88	-4,08	-24796,47	34,15
16	1	1,28	0,82	-0,74	39,98	1	1	-46,3	-2,88	0,55	-24889,55	6,25

Запишем z_i как квадратичную функцию от x_i [270, 271]:

$$z_i = k_i(x_i^2 + a_i x_i + c_i), \quad (3.11)$$

где k_i, a_i, c_i – константы.

Необходимо выполнение условия

$$\sum_{u=1}^N z_{i_u} = 0. \quad (3.12)$$

Тогда после подстановки (3.11) в (3.12) получим:

$$\sum_{u=1}^N z_{i_u} = k'_i (\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 + a_i \sum_{u=1}^N x_{i_u} + Nc_i) = 0 \quad (3.13)$$

и, поскольку по (3.10) $\sum_{u=1}^N x_{i_u} = 0$,

$$\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 + Nc_i = 0. \quad (3.14)$$

Отсюда

$$c_i = -\frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2. \quad (3.15)$$

Далее необходимо выполнение условия

$$\sum_{u=1}^N x_{i_u} z_{i_u} = 0. \quad (3.16)$$

Тогда после подстановки (3.15) и (3.11) в (3.16) получим

$$\sum_{u=1}^N x_{i_u} z_{i_u} = \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 + a_i \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 + c_i \sum_{u=1}^N x_{i_u} = 0. \quad (3.17)$$

И вновь с учетом (3.16)

$$\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 + a_i \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 = 0. \quad (3.18)$$

Отсюда

$$a_i = -\frac{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^3}{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2} \quad (3.19)$$

Посчитаем по формуле (3.15) c_i :

$$c_1 = -3,1713; c_2 = -0,7325; c_3 = -1,6875; c_4 = -1520,44.$$

И по (3.18) a_i :

$$a_1 = -34,98; a_2 = -3,44; a_3 = -26,56; a_4 = -624,5.$$

Выбор уровней z_i приведен в таблице 3.8. Коэффициенты k'_i выбираются из тех же соображений, что и k_i . Формулы перехода от значений z_i к x_i и обратно имеют вид [270, 271]:

$$z_i = k'_i (x_i^2 + a_i x_i + c_i), \quad (3.20)$$

$$z_1 = x_1^2 - 34,98x_1 - 3,1713,$$

$$z_2 = x_2^2 - 3,44x_2 - 0,7325,$$

$$z_3 = 0,66(x_3^2 - 26,56x_3 - 1,6875),$$

$$z_4 = x_4^2 - 624,5x_i - 1520,44.$$

Запишем уровни z_i в план эксперимента таблицы 3.8. Запишем q_i как кубическую функцию от x_i [270, 271]:

$$q_i = k_i'(x_i^3 + d_i x_i^2 + e_i x_i + n_i), \quad (3.21)$$

где k_i', e_i, n_i – константы.

Таблица 3.8 – Выбор уровней z_i

i	x_i	$x_i^2 + a_i x_i + c_i$	k_i'	z_i
1	0,62	-24,48	1	-24,48
	1,28	-46,3		-46,3
	1,95	-67,58		-67,58
	2,62	-87,96		-87,96
2	0,82	-2,88	1	-2,88
	-0,45	1,02		1,02
	-1,18	4,72		4,72
3	-0,74	0,83	0,66	0,55
	0,17	-6,18		-4,08
	2,29	-57,27		-37,8
4	39,98	-24889,55	1	-24889,55
	37,98	-24796,47		-24796,47

Необходимо выполнение условий [270, 271]:

$$\sum_{u=1}^N q_{i_u} = 0, \quad (3.22)$$

$$\sum_{u=1}^N q_{i_u} x_{i_u} = 0, \quad (3.23)$$

$$\sum_{u=1}^N q_{i_u} z_{i_u} = 0. \quad (3.24)$$

После подстановки (3.21) в (3.22); (3.21) и (3.5) в (3.23); (3.21) и (3.11) в (3.24)

получим соответственно:

$$\sum_{u=1}^N q_{i_u} = \sum_{u=1}^N x_{i_u}^3 + d_i \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 + e_i \sum_{u=1}^N x_{i_u} + N n_i = 0; \quad (3.25)$$

$$\sum_{u=1}^N q_{i_u} x_{i_u} = \sum_{u=1}^N x_{i_u}^4 + d_i \sum_{u=1}^N x_{i_u}^3 + e_i \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 + n_i \sum_{u=1}^N x_{i_u} = 0; \quad (3.26)$$

$$\sum_{u=1}^N q_{i_u} z_{i_u} = \sum_{u=1}^N x_{i_u}^3 z_{i_u} + d_i \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 z_{i_u} + e_i \sum_{u=1}^N x_{i_u} z_{i_u} + n_i \sum_{u=1}^N z_{i_u} = 0 \quad (3.27)$$

и поскольку по (3.6), (3.16) и (3.12)

$\sum_{u=1}^N x_{i_u} = 0; \sum_{u=1}^N x_{i_u} z_{i_u} = 0$ и $\sum_{u=1}^N z_{i_u} = 0$, то

$$\sum_{u=1}^N x_{i_u}^3 + d_i \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 + N n_i = 0; \quad (3.28)$$

$$\sum_{u=1}^N x_{i_u}^4 + d_i \sum_{u=1}^N x_{i_u}^3 + e_i \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 = 0; \quad (3.29)$$

$$\sum_{u=1}^N x_{i_u}^3 z_{i_u} + d_i \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 z_{i_u} = 0; \quad (3.30)$$

$$d_i = -\frac{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^3 z_{i_u}}{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 z_{i_u}}; \quad (3.31)$$

$$e_i = -\frac{1}{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2} \left(\sum_{u=1}^N x_{i_u}^4 - \frac{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^3 \sum_{u=1}^N x_{i_u}^3 z_{i_u}}{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 z_{i_u}} \right); \quad (3.32)$$

$$n_i = -\frac{1}{N} \left(\sum_{u=1}^N x_{i_u}^3 - \frac{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 \sum_{u=1}^N x_{i_u}^3 z_{i_u}}{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 z_{i_u}} \right). \quad (3.33)$$

Произведем расчет по полученным формулам:

$$d_1 = 2,31; e_1 = -0,028; n_1 = 0,4$$

Выбор уровней q_1 приведен в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Выбор уровней q_1

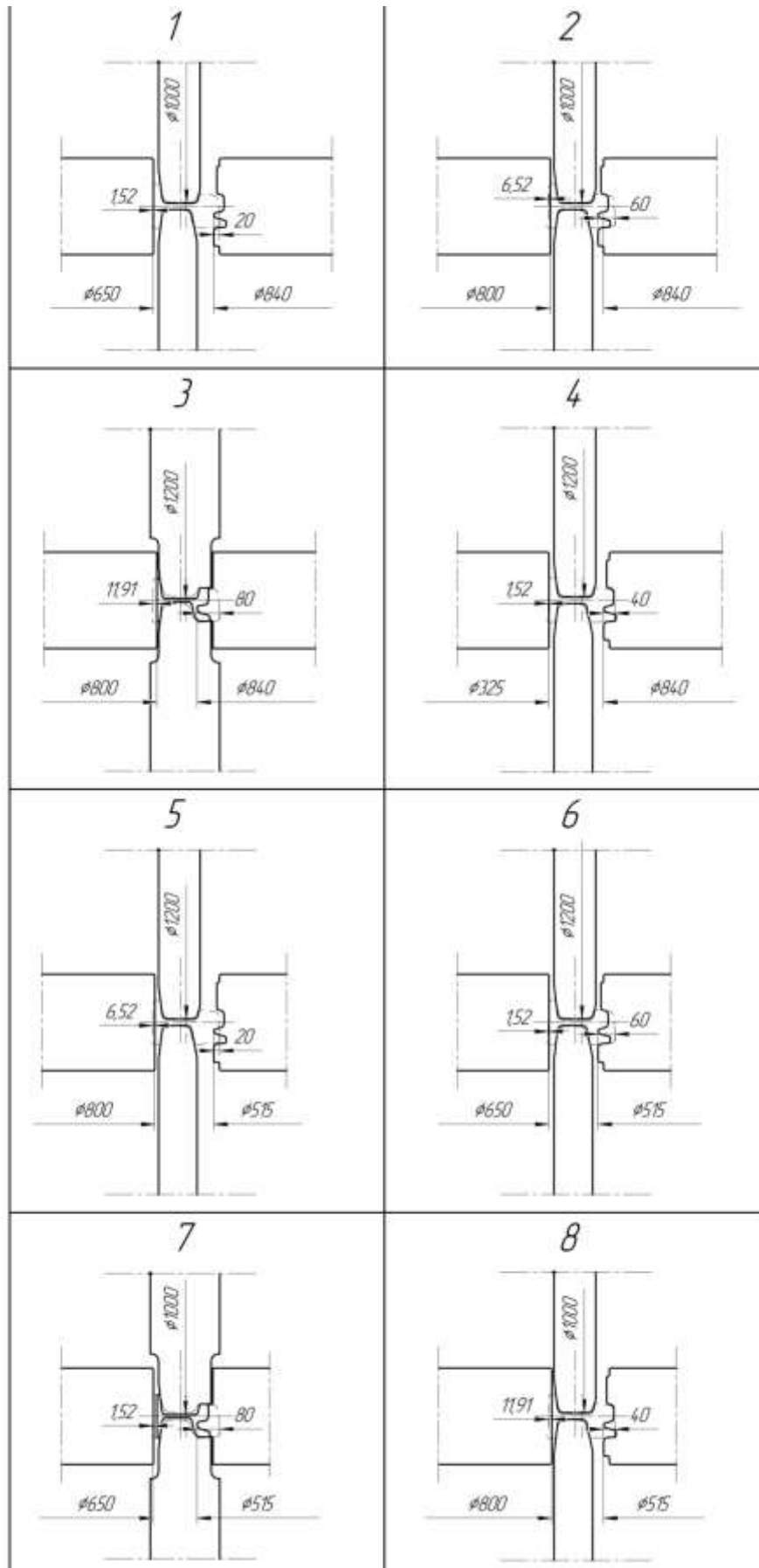
x_1	$x_1^3 + d_1 x_1^2 + e_1 x_1 + n_1$	k_1''	q_1
0,62	1,5	1	1,5
1,28	6,25		6,25
1,95	16,53		16,53
2,62	34,15		34,15

Формула перехода от значений q_1 к x_1 и обратно:

$$q_1 = k_1''(x_1^3 + d_1 x_1^2 + e_1 x_1 + n_1) = x_1^3 + 2,31 x_1^2 - 0,028 x_1 + 0,4. \quad (3.34)$$

Запишем уровни q_1 в план эксперимента таблицы 3.9. Теперь данная таблица представляет матрицу плана $4 \times 3^3 \times 2^3 // 16$, с помощью которой определяются все коэффициенты модели (3.4) [270, 271].

По выбранному плану эксперимента были выполнены эксперименты согласно расчетным схемам (рисунок 3.10).



(продолжение рисунка 3.10 на следующей странице)

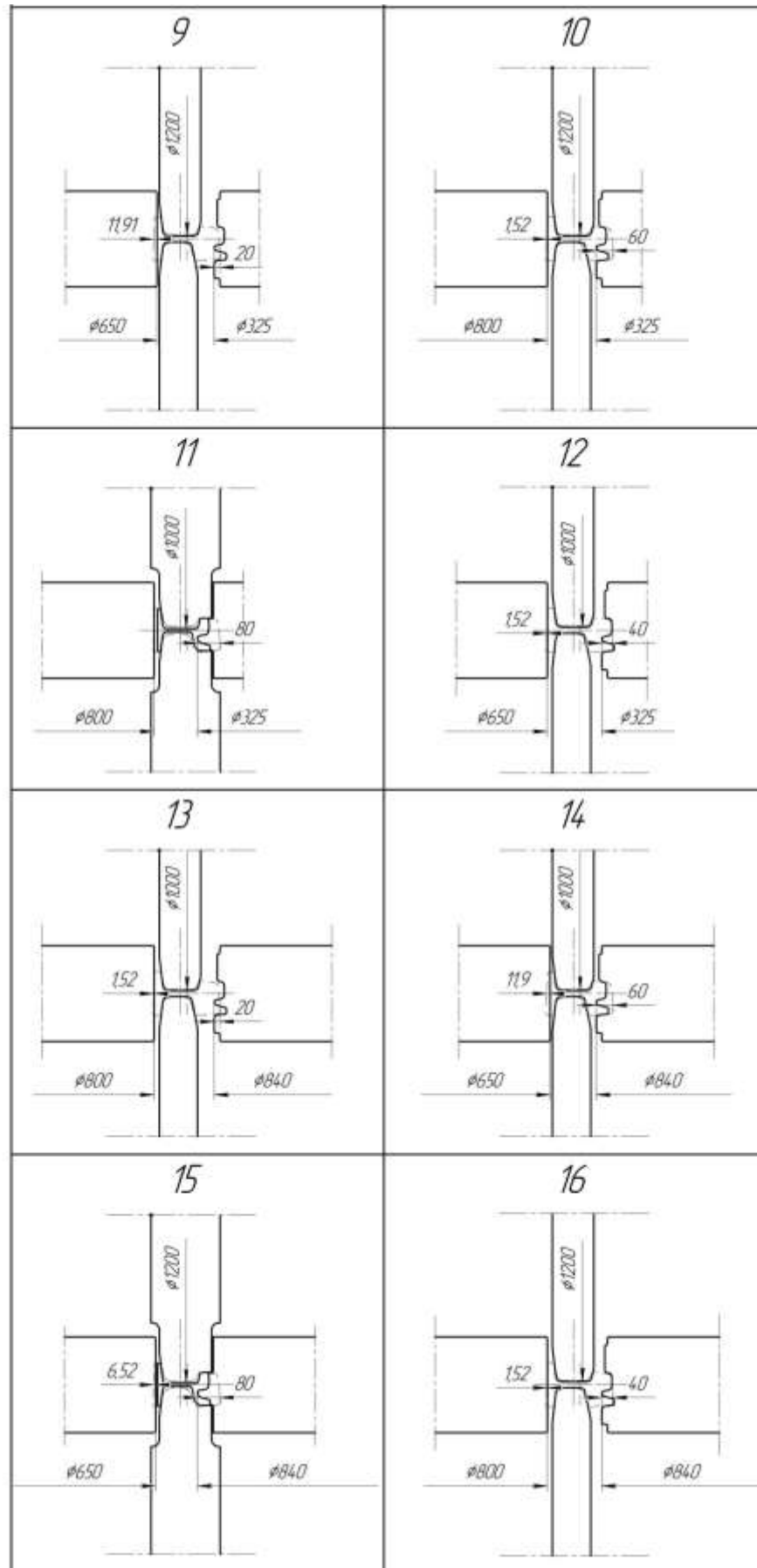


Рисунок 3.10 – Схемы калибров с номерами экспериментов согласно плана эксперимента

Имеется значительное количество литературы по определению силы прокатки, однако данные по силам, возникающим при прокатке сложных асимметричных профилей в четырехвалковых калибрах, таких как трамвайные рельсы, отсутствуют.

По заданному плану эксперимента получены результаты, представленные в сравнительной таблице 3.10 смещаемых объемов металла вертикальными валками в очаге деформации. Полученные данные соотнесены с полученным отношением сил прокатки от обжатия вертикальными валками P_p/P_r .

Таблица 3.10 – Зависимости смещаемых объемов металла от сил прокатки со стороны вертикальных валков в четырехвалковом калибре

Номер эксперимента	Смещаемый объем металла со стороны вертикального разрезного валка (V_p), мм ³	Смещаемый объем металла со стороны вертикального гладкого валка (V_r), мм ³	V_p/V_r	P_p/P_r
1	29 724,27	6 770,05	4,39	1,18
2	347 926,2	48 645,74	7,15	1,83
3	708 319,6	159 650,92	4,44	1,19
4	109 039,45	6 770,05	16,1	1,88
5	23 146,2	48 645,74	0,48	0,26
6	265 538,73	6 770,05	39,2	7,73
7	536 485,62	6 770,05	79,24	9,8
8	84 261,27	120 120,25	0,7	0,17
9	18 211,26	108 165,49	0,17	0,18
10	202 265,88	7 517,3	26,9	5,28
11	403 164,05	7 472,34	53,95	7,32
12	65 569,35	6 770,05	9,69	1,59
13	29 724,27	7 472,35	3,98	1,05
14	347 926,2	108 026,18	3,22	0,85
15	707 285, 27	43 739,63	16,17	0,34
16	109 039,45	7 517,3	14,5	1,95

Заданные планом эксперимента по таблица 3.7 были выполнены. По результатам экспериментов получили значения сил прокатки со стороны головки P_p и со стороны подошвы P_r , которые записали отношением $y = P_p/P_r$ в таблицу 3.10. В качестве оценки дисперсии воспроизводимости использовали $S_y^2 = 0,0016$ при числе степеней свободы $f_1 = 10$.

Поскольку матрица в таблице 3.7 ортогональна, коэффициенты модели (3.4), находим по формулам [270, 271]:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N x_{0u} y_u}{\sum x_{0u}^2}; b_1 = \frac{\sum_{u=1}^N x_{1u} y_u}{\sum x_{1u}^2}; b_2 = \frac{\sum_{u=1}^N x_{2u} y_u}{\sum x_{2u}^2} \quad (3.35)$$

Или в общем виде

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} y_u}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}, i = 0, 1, 2, \dots, k, \quad (3.36)$$

где i - номер фактора.

По вышеизложенным формулам к нашему плану эксперимента суммирование от $u = 1$ до $N = 16$

$$\sum x_0 y = 40,33; \sum x_0^2 = 16;$$

$$\sum x_1 y = 88,1; \sum x_1^2 = 50,72;$$

$$\sum x_2 y = -16,94; \sum x_2^2 = 11,76;$$

$$\sum x_3 y = -20,35; \sum x_3^2 = 25,48;$$

$$\sum x_4 y = 1646,26; \sum x_4^2 = 24327,04;$$

$$\sum x_5 y = -3,94; \sum x_5^2 = 16;$$

$$\sum x_6 y = -4,61; \sum x_6^2 = 16;$$

$$\sum z_1 y = -3014,78; \sum z_1^2 = 60187,92;$$

$$\sum z_2 y = 57,68; \sum z_2^2 = 159,63;$$

$$\sum z_3 y = -86,69; \sum z_3^2 = 5784,36;$$

$$\sum z_4 y = -1048666,02; \sum z_4^2 = 9874836989,29;$$

$$\sum q_1 y = 934,24; \sum q_1^2 = 5923,08.$$

Оценки коэффициентов получаем следующие:

$$b_0 = 2,521; b_1 = 1,737; b_2 = -1,44; b_3 = -0,799; b_4 = 0,068; b_5 = -0,246; b_6 = -0,288; b_{11} = -0,05; b_{22} = 0,361; b_{33} = -0,015; b_{44} = -0,0001; b_{111} = 0,158.$$

Дисперсии оценок коэффициентов считали по формуле:

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2} \quad (3.37)$$

$$S_{b_0}^2 = S_{b_5}^2 = S_{b_6}^2 = 1 * 10^{-4}; S_{b_0} = S_{b_5} = S_{b_6} = 0,01;$$

$$S_{b_1}^2 = 0,00003; S_{b_1} = 0,0056;$$

$$S_{b_2}^2 = 0,00014; S_{b_2} = 0,012;$$

$$S_{b_3}^2 = 0,00006; S_{b_3} = 0,008;$$

$$S_{b_4}^2 = 0,00000006; S_{b_4} = 0,0003;$$

$$S_{b_{11}}^2 = 0,00000003; S_{b_{11}} = 0,0002;$$

$$S_{b_{22}}^2 = 0,00001; S_{b_{22}} = 0,003;$$

$$S_{b_{33}}^2 = 0,0000003; S_{b_{33}} = 0,0005;$$

$$S_{b_{44}}^2 = 0; S_{b_{44}} = 0;$$

$$S_{b_{111}}^2 = 0,0000003; S_{b_{111}} = 0,0005.$$

Доверительные интервалы оценок коэффициентов определили по формуле:

$$\Delta_{b_i} = t_{\alpha}; f_1 S_{b_i}, \quad (3.38)$$

где t – критерий Стьюдента, берется из таблиц приложения II работы Новика Ф.С. [270] в зависимости от уровня значимости α и числа степеней свободы f_1 при определении дисперсии эксперимента S_y^2 ; S_{b_i} – среднеквадратичная ошибка в определении коэффициента регрессии [348]. Получаем при $\alpha = 0,05$ и $f_1 = 10$ табличное значение критерия $t_{0,05;10} = 2,23$ поэтому:

$$\Delta_{b_0} = \Delta_{b_5} = \Delta_{b_6} = 0,022; \Delta_{b_1} = 0,012; \Delta_{b_2} = 0,027; \Delta_{b_3} = 0,018; \Delta_{b_4} = 0,0007; \Delta_{b_{11}} = 0,0004; \Delta_{b_{22}} = 0,007; \Delta_{b_{33}} = \Delta_{b_{111}} = 0,001; \Delta_{b_{44}} = 0.$$

Поскольку коэффициенты $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{44}, b_{111}$ по абсолютной величине больше своих доверительных интервалов, их следует признать статистически значимыми при 5%-ном уровне значимости. Статистически незначимых коэффициентов не оказалось [270].

Таким образом, получено следующее уравнение регрессии:

$$y = \frac{P_p}{P_r} = 2,521 + 1,737x_1 - 1,44x_2 - 0,799x_3 + 0,068x_4 - 0,246x_5 - 0,288x_6 - 0,05z_1 + 0,361z_2 - 0,015z_3 - 0,0001z_4 + 0,158q_1 \quad (3.39)$$

Если произвести анализ полученной модели, то можно сказать, что все выбранные факторы оказывают влияние на величину усилия прокатки со стороны вертикальных валков. С точки зрения теории прокатки, в каждом из выбранных калибров и вариантов температур возможно производить прокатку. Наиболее значимо усилие прокатки на разрезном валке зависит от глубины внедрения и его диаметра, а меньше всего от выбранной температуры прокатки: 1000 °С или 950 °С. Если рассматривать калибр в целом, то возможно подобрать технологию прокатки, обеспечивая равенство усилий в горизонтальной плоскости, варьируя пятью факторами – это диаметр разрезного валка, диаметр валка со стороны подошвы, глубина внедрения разрезного валка, величина обжатия со стороны валка подошвы и величина соотношения смещаемых объемов металла от вертикальных валков.

Для четырехвалковых калибров группы клетей тандем установлена закономерность, что диапазон отношений сил прокатки между вертикальными валками $P_p/P_r = 0,85 \div 1,19$ гарантирующий стабильность получения профиля обеспечивается при выполнении условия отношений смещаемых объемов металла вертикальными валками, при котором $V_p/V_{II} = 3,22 \div 4,44$.

$$\begin{cases} \frac{P_p}{P_r} = 0,85 \div 1,19 \\ \frac{V_p}{V_{II}} = 3,22 \div 4,44 \end{cases} \quad (3.40)$$

На основании полученных результатов моделирования методом конечных элементов построен график зависимости отношений смещаемых объемов металла и силы прокатки на вертикальных валках четырехвалковых калибров (рисунок 3.11).

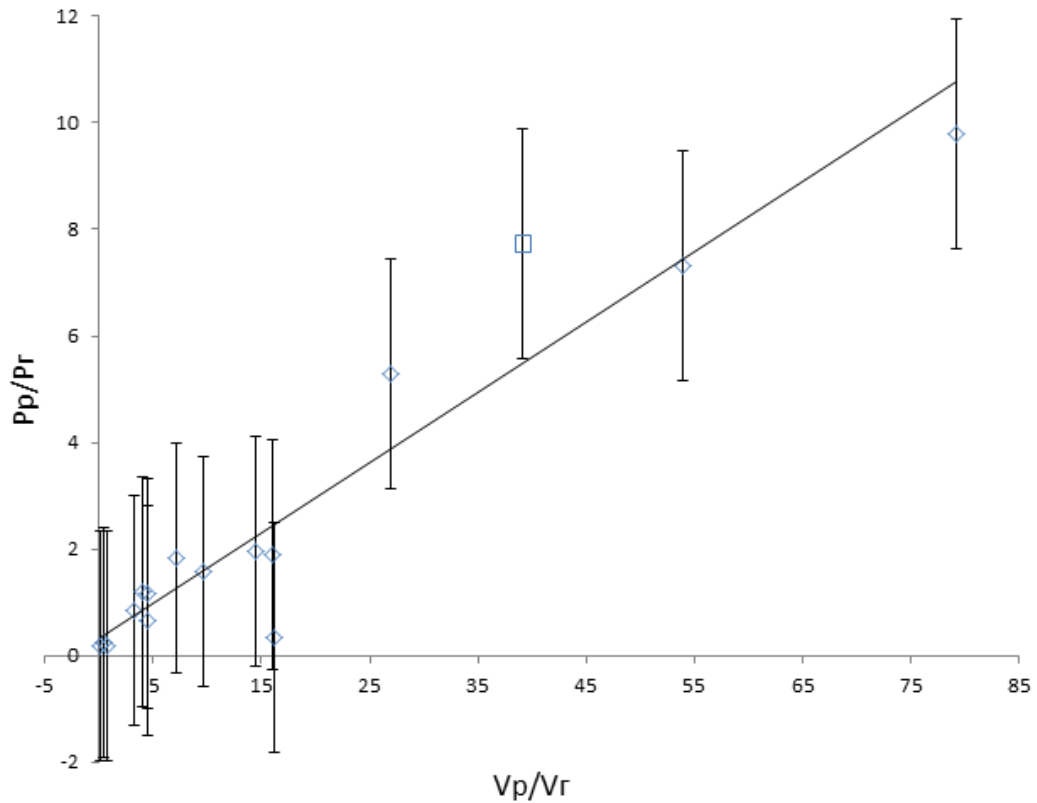


Рисунок 3.11 – График зависимости $\frac{V_p}{V_n}$ от $\frac{P_p}{P_e}$

Полученные данные на рисунке 3.11 описываются уравнением регрессии:

$$\frac{P_p}{P_e} = 0,1317 \frac{V_p}{V_e} + 0,4565, \quad (3.41)$$

при величине достоверности аппроксимации $R^2 = 0,91$;

где P_p, V_p – сила прокатки и смещаемый объем металла разрезным валком;

P_e, V_e – сила прокатки и смещаемый объем металла гладким валком.

Для определения эффективной технологии прокатки по эксперименту №3 подставляем значения $x_5 = 1$ и $x_6 = 1$ в полученное уравнение регрессии:

$$\begin{aligned} P_p/P_r = & 1,987 + 1,737x_1 - 1,44x_2 - 0,799x_3 + 0,068x_4 - 0,05z_1 + 0,361z_2 - \\ & - 0,015z_3 - 0,0001z_4 + 0,158q_1. \end{aligned} \quad (3.42)$$

Переведем z_1 в x_1 , z_2 в x_2 , z_3 в x_3 , z_4 в x_4 , q_1 в x_1 .

$$z_1 = x_1^2 - 34,98x_1 - 3,1713,$$

$$z_2 = x_2^2 - 3,44x_2 - 0,7325,$$

$$z_3 = 0,66(x_3^2 - 26,56x_3 - 1,6875),$$

$$z_4 = x_4^2 - 624,5x_4 - 1520,44,$$

$$q_1 = x_1^3 + 2,31x_1^2 - 0,028x_1 + 0,4.$$

$$\frac{P_p}{P_r} = 1,393 - 0,012x_1 - 0,198x_2 - 0,539x_3 + 0,068x_4 - 0,423x_1^2 + 0,361x_2^2 - 0,01x_3^2 + 0,158x_1^3 \quad . \quad (3.43)$$

В изученной области определения факторов на величину отношения сил прокатки между разрезным валком и гладким валком со стороны подошвы наиболее эффективными оказались варианты экспериментов №3 ($D_p=840$; $D_n=800$; $h_p=80$; $h_n=11,91$), №13 ($D_p=840$; $D_n=800$ $h_p=20$; $h_n=1,52$) и №14 ($D_p=840$; $D_n=650$; $h_p=60$; $h_n=11,91$). При этом соотношение усилий прокатки в данных экспериментах составляет $\frac{P_p}{P_r}$: 1,18; 1,19 и 0,85 соответственно.

Как видно, возможно рассчитать различные режимы деформации, при которых величина разрезки в первом разрезном калибре может варьироваться от 20 до 80 мм, но наиболее эффективным является вариант, при котором разрезка головки трамвайного рельса осуществляется за три прохода в четырех калибрах, при этом разрезка в первом проходе является максимальной.

3.3 Исследование зависимости сил прокатки от смещаемых объемов металла вертикальными валками при прокатке в четырехвалковых калибрах

Для проверки адекватности полученных экспериментальных данных при компьютерном моделировании и установленных положений по результатам планирования эксперимента, проведены промышленные эксперименты по прокатке трамвайных рельсов с замером сил прокатки в четырехвалковых калибрах UR-1 и UR-3 непрерывной чистовой группы клетей тандем в

соответствии с разработанной технологией. Результаты исследования приведены ниже (таблица 3.11).

Таблица 3.11 – Усилия прокатки на вертикальных валках при промышленном эксперименте в калибре UR-1

№ рельса	V_p/V_r	P_p , МН	P_r , МН	P_p/P_r
1	10,12	1,65	1,15	1,43
2		1,48	1,09	1,36
3		1,5	1,1	1,36
4		1,5	1,15	1,3
5		1,7	1,1	1,55
6		1,7	1,15	1,48
7		1,68	1,1	1,53
8		2,1	1,3	1,62
9		2,05	1,35	1,52
10		1,95	1,3	1,5
11		1,9	1,25	1,52
12		1,85	1,3	1,42
13		1,8	1,25	1,44
14		2	1,35	1,48
15		1,55	1,05	1,48
16		1,55	1,03	1,5
17		1,56	1,05	1,48
18		1,54	1,1	1,4
19		1,45	1,1	1,31
20		1,4	1,04	1,35
21		1,4	1,1	1,27
22		1,35	1,1	1,23

Смещаемые объемы металла в очаге деформации в калибре UR-1 распределились следующим образом (таблица 3.11): от нижнего валка $V_H = 47377,16 \text{ мм}^3$, от верхнего валка $V_B = 56310,44 \text{ мм}^3$, со стороны разрезного валка $V_p = 52135,67 \text{ мм}^3$, со стороны гладкого валка $V_r = 5153,77 \text{ мм}^3$. Коэффициент вытяжки составил $\lambda = 1,21$. Коэффициент эффективности деформации в данном калибре равен 1.

По полученным данным построен график зависимостей силы прокатки на вертикальных валках в калибре UR-1 при отношении смещаемых объемов $V_p/V_r=10,12$ (рисунок 3.12).

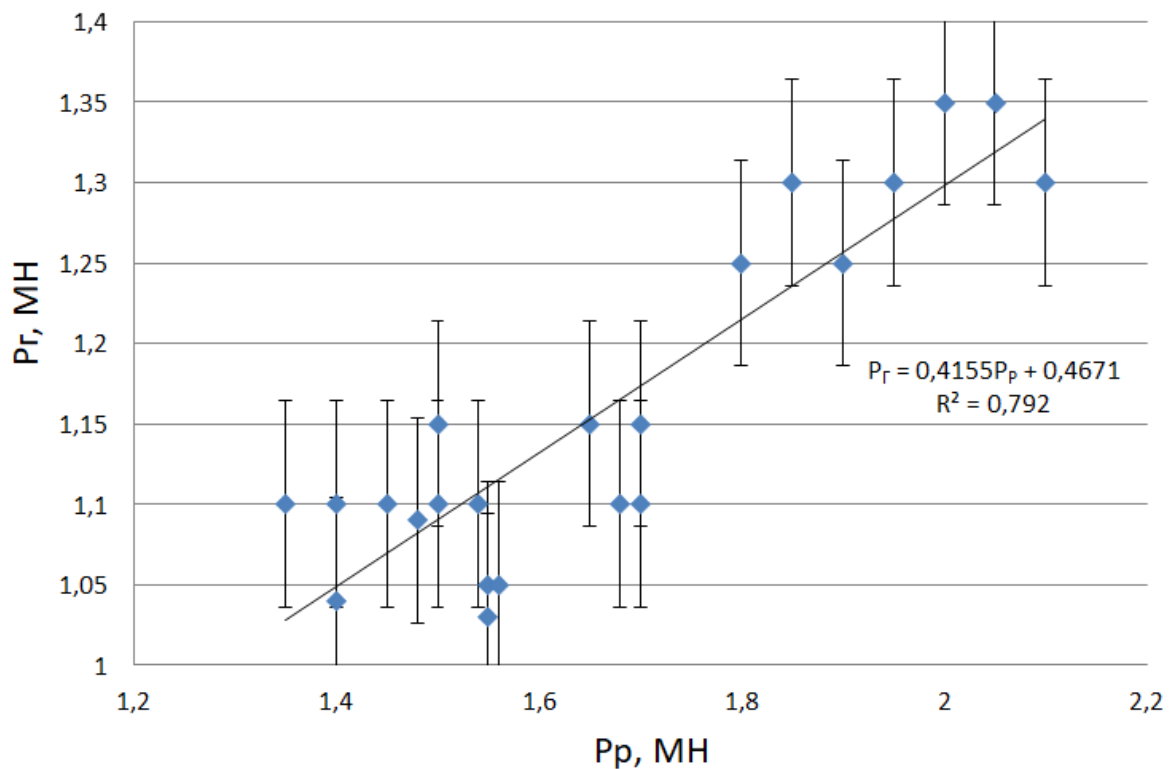


Рисунок 3.12 – График зависимости сил прокатки на вертикальных валках в калибре UR-1 при отношении смещаемых объемов $V_p/V_r = 10,12$

Далее приведены результаты исследования сил прокатки на вертикальных валках в калибре UR-3. При рассмотрении промышленных результатов в калибре UR-3 смещаемые объемы металла со стороны разрезного валка составляют $V_p=162957,34 \text{ мм}^3$, со стороны гладкого валка, обжимающего подошву $V_r=37420,88 \text{ мм}^3$, соотношение смещаемых объемов составляет $V_p/V_r = 4,35$. Ниже

приведены результаты промышленного замера сил прокатки на стане с группой тандем (таблица 3.12).

Таблица 3.12 – Усилия прокатки на вертикальных валках при промышленном эксперименте в калибре UR-3

№ рельса	V_p/V_r	P_p , МН	P_r , МН	P_p/P_r
1	4,35	1,38	1,35	1,02
2		1,3	1,35	0,96
3		1,36	1,38	0,99
4		1,34	1,38	0,97
5		1,4	1,37	1,02
6		1,4	1,35	1,04
7		1,43	1,4	1,02
8		1,65	1,6	1,03
9		1,68	1,61	1,04
10		2,2	1,48	1,49
11		2,18	1,4	1,56
12		2,17	1,48	1,47
13		2,1	1,5	1,4
14		2,18	1,58	1,38
15		1,35	1,38	0,98
16		1,35	1,3	1,04
17		1,3	1,29	1,01
18		1,34	1,31	1,02
19		1,37	1,35	1,01
20		1,32	1,38	0,96
21		1,39	1,41	0,99
22		1,28	1,35	0,95

По полученным данным построен график зависимостей сил прокатки на вертикальных валках в калибре UR-3 при отношении смещаемых объемов $V_p/V_r=4,35$ (рисунок 3.13).

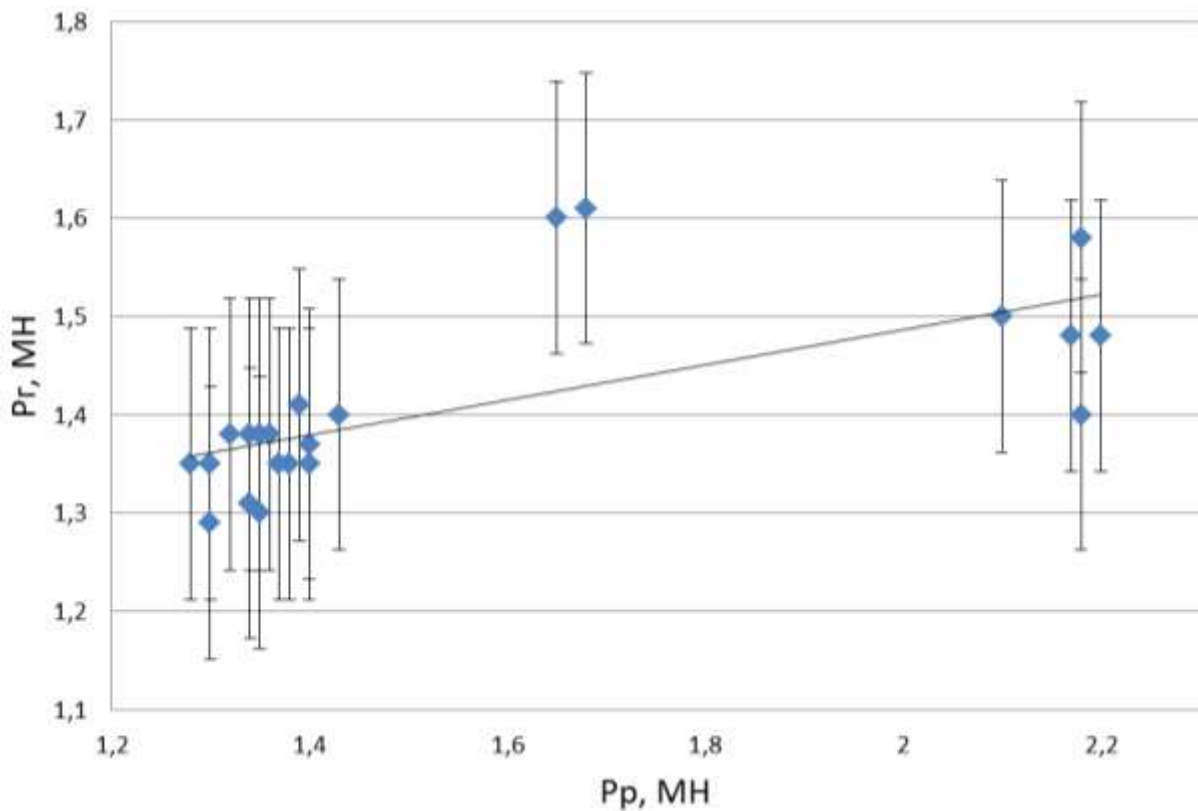


Рисунок 3.13 – График зависимости сил прокатки на вертикальных валках в калибре UR-3 при отношении смещаемых объемов $V_p/V_r=4,35$

Подтверждена промышленным экспериментом закономерность, полученная при моделировании методом конечных элементов, что диапазон отношений сил прокатки между вертикальными валками $P_p/P_r = 0,85 \div 1,19$ обеспечивается при выполнении условия отношений смещаемых объемов металла вертикальными валками, при котором $V_p/V_r = 3,22 \div 4,44$ – это подтверждено вышеприведенными результатами промышленных экспериментов.

Выявленную закономерность возможно объяснить тем, что характер течения металла в зоны отставания и опережения сильно зависит от геометрических факторов калибра. Полученные результаты исследования свидетельствуют о том, что при прокатке в четырехвалковых калибрах, в которых имеются вертикальные

валки различной конфигурации, необходимо определять поправочный коэффициент формы калибра, определяющий эффективное соотношение смещаемых объемов, который позволит получить равенство сил прокатки в горизонтальном направлении (таблица 3.13).

Таблица 3.13 – Результаты теоретического и промышленного экспериментов

Теоретический эксперимент		Промышленный эксперимент			
		UR-1		UR-3	
V_p/V_r	P_p/P_r	V_p/V_r	P_p/P_r	V_p/V_r	P_p/P_r
3,22-4,44	0,85-1,19	10,12	1,43	4,35	1,1

По итогам проведенных исследований установлено, что в наибольшей степени сила прокатки на разрезном валке зависит от глубины его внедрения и его диаметра. Если рассматривать калибр в целом, то возможно рассчитать технологию прокатки обеспечивая равенство сил прокатки в горизонтальной плоскости, варьируя пятью факторами – это диаметр разрезного валка, диаметр валка со стороны подошвы, глубина внедрения разрезного валка, величина обжатия со стороны валка подошвы и величина соотношения смещаемых объемов металла от вертикальных валков.

Установлено, что возможно подобрать различные режимы прокатки, при которых величина разрезки в первом разрезном калибре может варьироваться от 20 до 80 мм, но наиболее эффективным является вариант, при котором разрезка головки трамвайного рельса осуществляется за три прохода в четырех калибрах, при этом разрезка в первом проходе является максимальной.

По итогам проведенного компьютерного моделирования и промышленных экспериментов с разработкой эффективного процесса прокатки в четырехвалковых калибрах методом планирования многофакторного эксперимента установлено:

- все выбранные факторы при проведении планирования эксперимента оказывают влияние на величину силы прокатки;
- в каждом из выбранных эффективных калибров и вариантов температур возможно производить прокатку с получением требуемой геометрии профиля;

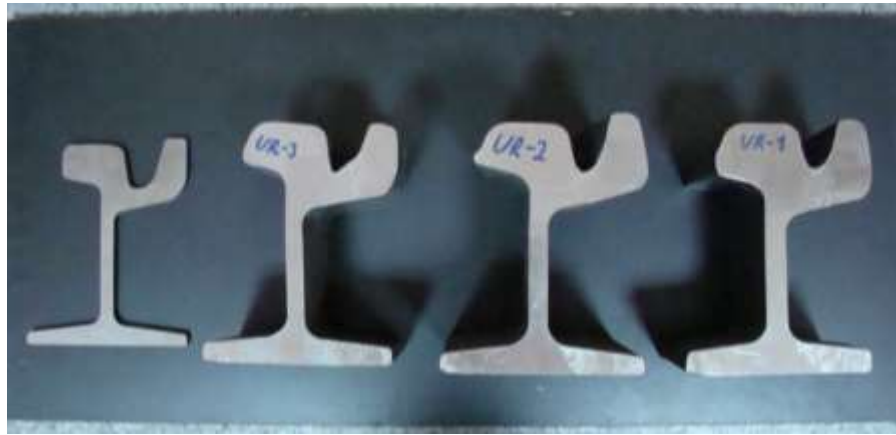
- в наибольшей степени сила прокатки на разрезном валке зависит от глубины внедрения и его диаметра;
- величины обжатий со стороны разрезного и гладкого вертикальных валков, а также их диаметры, являются одним из основных факторов, определяющих соотношение смещаемых объемов металла от вертикальных валков;
- впервые установлена закономерность по равенству сил прокатки между вертикальными валками в зависимости от смещаемых ими объемов металла в очаге деформации при прокатке трамвайных рельсов в четырехвалковых калибрах.

3.4 Нахождение требуемых размеров фланцев трамвайных рельсов при прокатке в группе тандем

Приведены результаты промышленных экспериментов по нахождению требуемых размеров фланцев профиля при прокатке в чистой реверсивной группе клетей (группа тандем). Для проверки адекватности полученных результатов планирования эксперимента, проведены промышленные эксперименты по прокатке трамвайных рельсов на стане с группой тандем ЕВРАЗ ЗСМК по режимам обжатия соответствующим расчетным значениям, которые показали наилучшие результаты – это эксперименты №3, №13, №14 (таблица 3.10). По каждой из экспериментальных прокаток вырезаны темплеты из очага деформации каждого из четырехвалковых калибров чистой группы клетей – это UR-1, UR-2, UR-3 и UF (рисунок 3.14).

По результатам обмеров готового профиля все рельсы признаны годными. Проводилось сравнение профиля поперечного сечения раската при промышленном эксперименте и результатов, полученных при моделировании методом конечных элементов (рисунок 3.15). Темплеты вырезались из очагов деформации калибров UR-1, UR-2, UR-3 и UF, которые сравнили с полученными результатами моделирования методом конечных элементов в программном

комплексе Deform-3D. Полученные результаты промышленного эксперимента и компьютерного моделирования между собой имеют высокую сходимость (таблицы 3.14, 3.15, 3.16).



а



б



в

Рисунок 3.14 – Темплеты очага деформации калибров клеток группы тандем: а – темплеты из раската, прокатанного по эксперименту №3; б – темплеты из раската, прокатанного по эксперименту №13; в – темплеты из раската, прокатанного по эксперименту №14

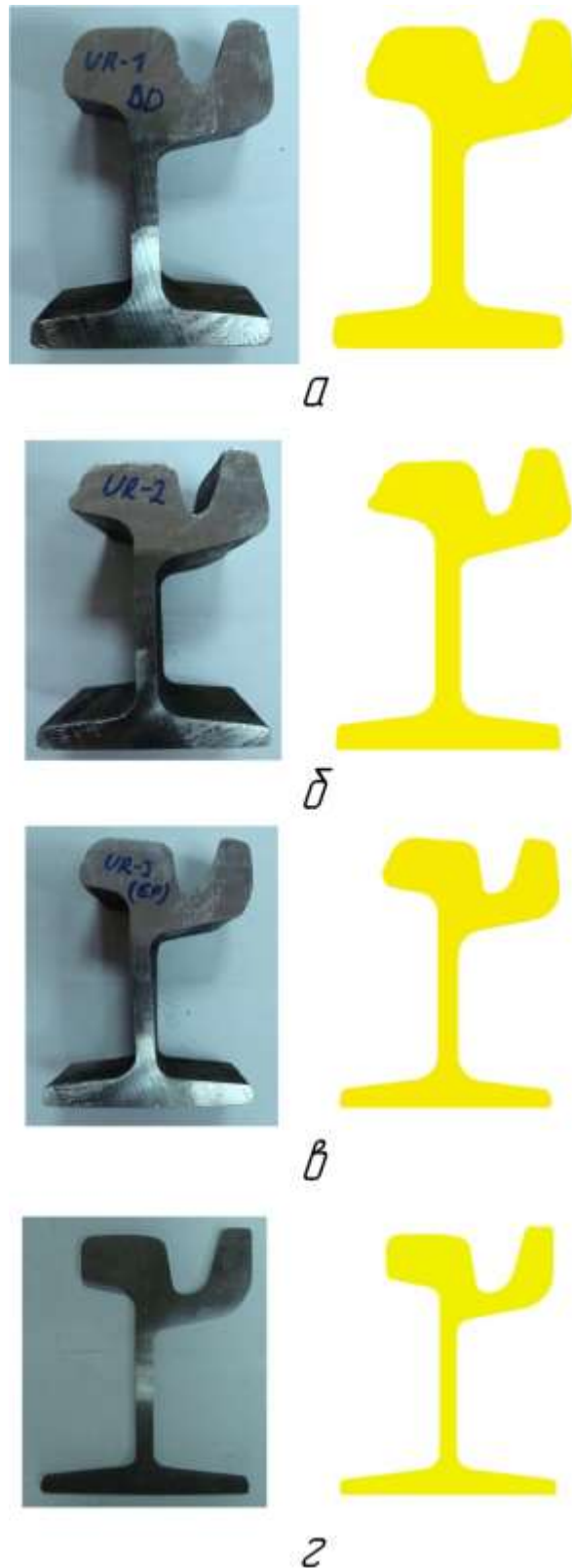


Рисунок 3.15 – Сравнение поперечного сечения профиля, полученного промышленным экспериментом (левый столбец) и компьютерным моделированием (правый столбец): а – после калибра UR-1; б – после калибра UR-2; в – после калибра UR-3; г – после чистового калибра

Таблица 3.14 – Результаты компьютерного моделирования по размерам фланцев головки и подошвы в отслеживаемых точках

№	П1	П2	П3	Г1	Г2	Г3	$\beta_{П1}$	$\beta_{П2}$	$\beta_{П3}$	$\beta_{Г1}$	$\beta_{Г2}$	$\beta_{Г3}$
1	142,93	148,25	144,47	106,5	116,22	91,25	0,98	0,98	1,01	0,98	0,99	0,99
2	155,19	168,67	153,62	94,35	125,62	130,76	1,06	1,11	1,07	0,87	1,07	1,42
3	142,93	148,25	143,04	107,59	115,05	90,33	0,98	0,98	1,00	0,99	0,98	0,98
4	132,48	154,92	139,35	93,59	120,69	105,97	0,91	1,02	0,97	0,86	1,03	1,15
5	155,67	169,89	164,57	90,65	113,61	90,29	1,06	1,12	1,15	0,83	0,97	0,98
6	124,2	142,27	121,07	95,9	121,39	120,82	0,85	0,94	0,85	0,88	1,03	1,31
7	109,32	128,52	111,7	109,25	114,16	91,08	0,75	0,85	0,78	1,01	0,97	0,99
8	172,42	174,1	170,32	89,71	117,69	100,74	1,18	1,15	1,19	0,83	1,00	1,09
9	163,45	171,06	167,18	94,29	115,15	96,62	1,12	1,13	1,17	0,87	0,98	1,05
10	134,65	148,59	133,22	91,6	117,15	128	0,92	0,98	0,93	0,84	1,00	1,39
11	104,76	129,86	116,13	106,72	111,9	92,5	0,72	0,86	0,81	0,98	0,95	1,00
12	140,28	156,63	134,71	95,16	123,4	111,01	0,96	1,03	0,94	0,88	1,05	1,20
13	146,36	150,28	145,9	107,59	117,4	96,78	1,00	0,99	1,02	0,99	1,00	1,05
14	150,75	153,3	143,04	105,42	120,92	92,17	1,03	1,01	1,00	0,97	1,03	1,00
15	140,88	150,5	139,35	106,77	111,57	87,37	0,96	0,99	0,97	0,98	0,95	0,95
16	136,98	155,69	133,54	93,24	121	106,03	0,94	1,03	0,93	0,86	1,03	1,15

С целью подтверждения правильности разработанных рекомендаций по эффективным скоростным режимам, предложенным в главе 2, экспериментальные прокатки трамвайных рельсов проводились по разработанным скоростным режимам. По итогам промышленных экспериментов все трамвайные рельсы признаны годными и были отгружены по прямому назначению (рисунок 3.16).

Таблица 3.15 – Результаты компьютерного моделирования по замерам коэффициента изменения размеров фланцев

№	β_{Π}	β_{Γ}	Общая средняя вытяжка
1	0,99	0,99	0,99
2	1,08	1,12	1,10
3	0,99	0,99	0,99
4	0,97	1,01	0,99
5	1,11	0,93	1,02
6	0,88	1,08	0,98
7	0,79	0,99	0,89
8	1,17	0,97	1,07
9	1,14	0,97	1,05
10	0,94	1,08	1,01
11	0,79	0,98	0,89
12	0,98	1,04	1,01
13	1,00	1,01	1,01
14	1,01	1,00	1,01
15	0,98	0,96	0,97
16	0,97	1,01	0,99

Таблица 3.16 – Сравнение результатов компьютерного и промышленного экспериментов по изменению размеров фланцев профиля

Компьютерное моделирование		Промышленный эксперимент							
		UR-1		UR-2		UR-3		UF	
β_{Π}	β_{Γ}	β_{Π}	β_{Γ}	β_{Π}	β_{Γ}	β_{Π}	β_{Γ}	β_{Π}	β_{Γ}
0,99-1,01	0,99-1,01	0,98	0,99	0,98	1,1	0,99	1,05	1	1



Рисунок 3.16 – Экспериментальная партия трамвайных рельсов, прокатанных с учетом предложенных рекомендаций

По соотношению приведенных результатов компьютерного моделирования и промышленных экспериментов стоит отметить, что погрешность в расчетах моделирования от фактических данных не превышает допустимой, что говорит о высокой сходимости результатов. По полученным результатам можно сделать вывод о том, что проведенное моделирование является адекватным, а полученные данные достоверными, которые возможно использовать в дальнейшем для разработки промышленных процессов прокатки сложных асимметричных рельсовых профилей.

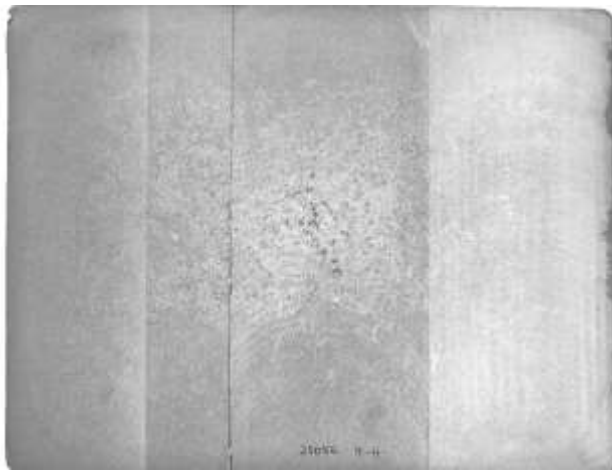
3.5 Разработка технологии прокатки трамвайных рельсов с учетом выработки осевой пористости исходной непрерывнолитой заготовки

Одним из основных параметров качества произведенной продукции является структура поперечного сечения готового профиля. В соответствии с требованиями ГОСТ на трамвайные рельсы допускается наличие тонкой ликвационной полосы исключительно в шейке профиля и не допускается ее распространение в головку и подошву.

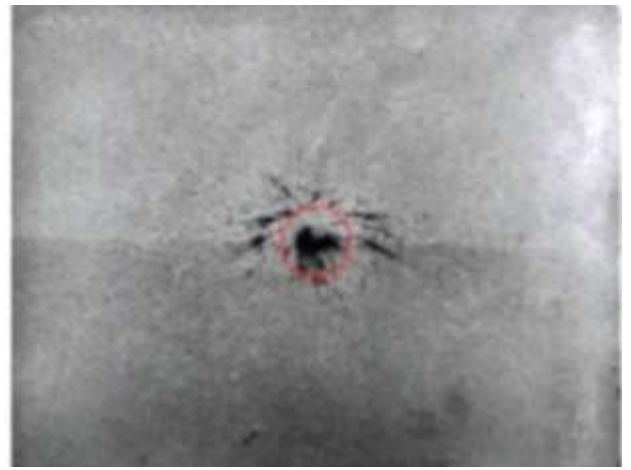
По результатам проведенного моделирования методом конечных элементов проведены промышленные исследования по распределению осевой пористости при прокатке в черновых ящичных калибрах клетки VD-1 и разрезных рельсовых калибрах в клетях VD-2. Все промышленные эксперименты выполнены на действующем рельсобалочном прокатном стане с группой тандем ЕВРАЗ ЗСМК. Для этого были подготовлены заготовки для прокатки трамвайных рельсов с целью изучения распределения осевой пористости.

Изучение макроструктуры НЛЗ проводили на темплетах, отобранных от трех плавок стали Э76Ф, отлитых на МНЛЗ-1. Для проведения промышленных экспериментов выбирались НЛЗ с максимальной осевой пористостью. На рисунке 3.17 представлены поперечные сечения НЛЗ с различной величиной осевой пористости.

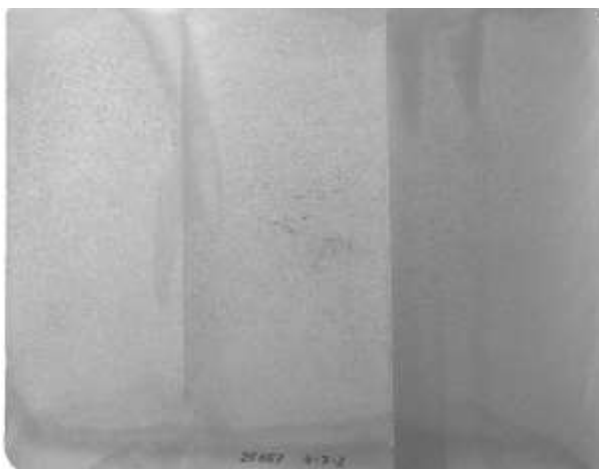
После каждого прохода в калибре в клетях VD-1 и VD-2 отбирали недокат для последующего изготовления темплета. На рисунке 3.18 приведены недокаты после калибров клетей VD-1 и VD-2, из которых изготавливались темплеты с целью определения трансформации осевой пористости в зависимости от формы калибра и коэффициента вытяжки.



а



б



в



г

Рисунок 3.17 – Темплеты непрерывнолитых заготовок с различными формами осевой пористости: а – имеется незначительная рыхлость в осевой части НЛЗ; б – заготовка со значительной выраженной осевой пористостью; в – заготовка без осевой пористости; г – заготовка с незначительной осевой пористостью

Макроструктуру поперечного сечения исходной НЛЗ (рисунок 3.19 а) выявляли глубоким травлением в 50% водном растворе соляной кислоты поверхности отрезанных темплетов после второго (рисунок 3.19 б), после седьмого (рисунок 3.19 в) и после девятого (рисунок 3.19 г) проходов в клетях ВД-1, ВД-2, полученных из отобранных проб методами холодной механической обработки (фрезеровки, шлифовки).



(продолжение рисунка 3.18 на следующей странице)



(продолжение рисунка 3.18 на следующей странице)



Рисунок 3.18 – Недокаты из клеток BD-1 и BD-2 для исследования осевой пористости при прокатке трамвайных рельсов

На photographиях (рисунок 3.19) полученных темплетов околнурена зона с наиболее опасной зоной осевой пористости, соотнесенная с результатами моделирования методом конечных элементов. Прокатка в разрезных рельсовых калибрах характеризуется неравномерной высотной деформацией, за счет чего происходит вынужденное уширение металла, а также происходит интенсивная высотная деформация шейки рельсового профиля, что приводит к уменьшению

площади поперечного сечения осевой пористости по оси симметрии рельсового профиля. В процессе проведения промышленного эксперимента подтвержден вывод, сделанный при проведении компьютерного моделирования, о том, что большие напряжения в процессе пластической деформации зоны осевой пористости способствуют интенсивной проработке несплошности раската.

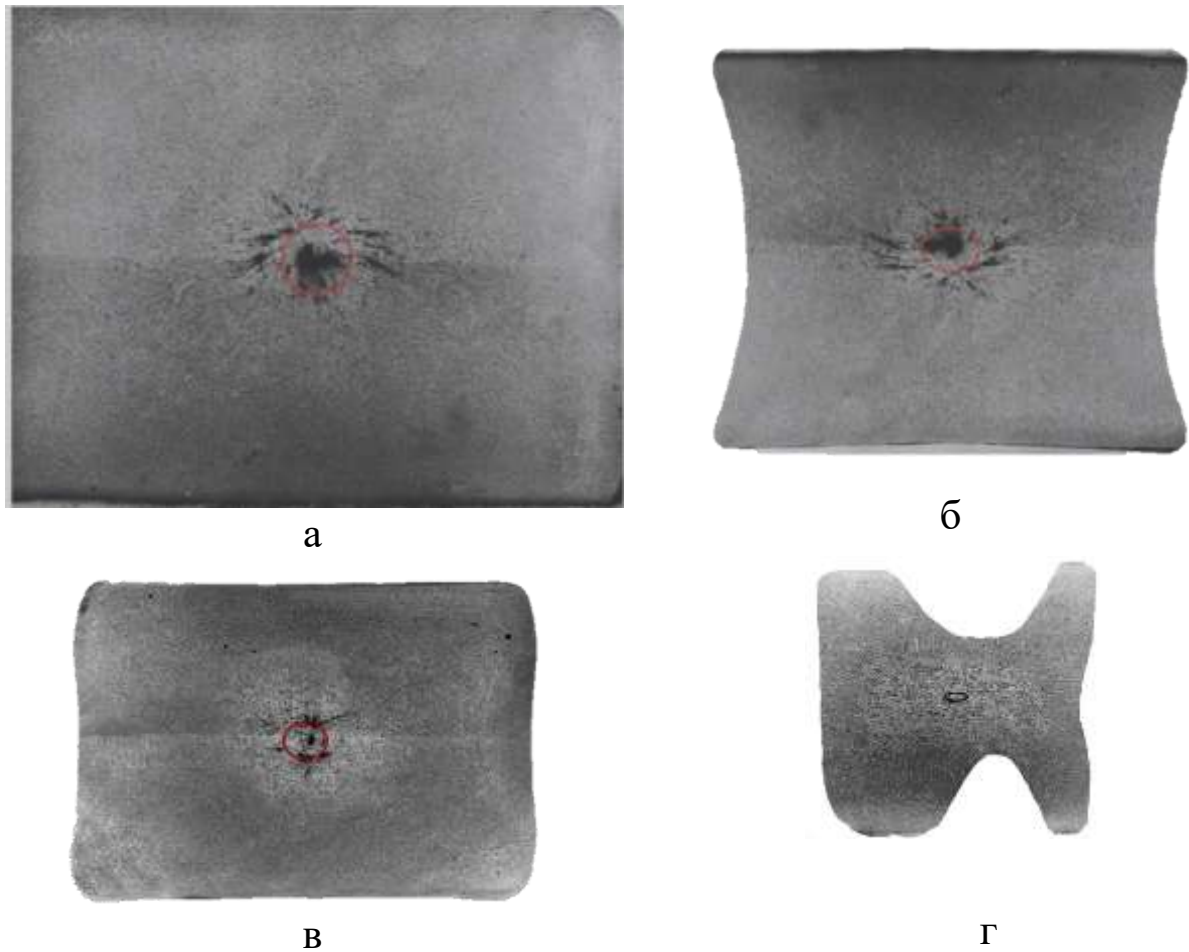


Рисунок 3.19 – Распределение осевой пористости по сечению раската:
 а – исходная НЛЗ с максимальной осевой пористостью; б – поперечное сечение раската после 2-го прохода; в – поперечное сечение раската после 7-го прохода; г – поперечное сечение раската после 9-го прохода

По результатам компьютерного моделирования выработки осевой несплошности происходит после десятого прохода, что подтверждается результатами промышленного эксперимента, а именно на заготовке с

максимальной начальной осевой пористостью после девятого прохода на темплете видно, что происходит ее полное заваривание.

Проведен анализ темплетов после прокатки в чистовом калибре UF. Установлено, что металл профиля имеет удовлетворительную макроструктуру, требуемую геометрию, а зона с осевой пористостью отсутствует (рисунок 3.20).



Рисунок 3.20 – Темплет поперечного сечения трамвайного рельса после прокатки в чистовом калибре UF из НЛЗ с максимальной осевой пористостью

По итогам экспериментальной прокатки трамвайных рельсов (рисунок 3.21) отбирались рельсовые пробы. Установлено, что полученная геометрия профиля, механические и прочностные характеристики полученных трамвайных рельсов с применением чистовой непрерывной реверсивной группы клетей тандем соответствуют требованиям ГОСТ, предъявляемым к трамвайным рельсам, при этом зона с осевой пористостью в готовом профиле отсутствует.



Рисунок 3.21 – Партия трамвайных рельсов произведенная по разработанной технологии

По итогам исследований выработки осевой пористости подтверждены результаты компьютерного моделирования. Распределение ресурса пластичности напрямую зависит от распределения интенсивности напряжений по сечению металла. После десятого прохода при суммарном коэффициенте вытяжки 4,13 в металле происходит полное заваривание внутреннего дефекта НЛЗ, имеющей максимальную осевую пористость. На заваривание осевой несплошности в процессе прокатки влияет, главным образом, величина сжимающих напряжений на поверхности раската. Результаты промышленного эксперимента на заготовке с максимальной осевой пористостью показали высокую сходимость с результатами компьютерного моделирования.

Выводы по главе 3

1. Проведена разработка эффективной технологии прокатки трамвайных рельсов в четырехвалковых калибрах с помощью метода планирования эксперимента в четырехвалковых калибрах чистовой непрерывной реверсивной группе клетей тандем. В качестве критерия эффективности выбрано равенство сил прокатки (минимизация различия усилий прокатки), возникающих от обжатия вертикальными валками. По итогам моделирования методом конечных элементов проведены промышленные эксперименты, по результатам которых установлено, что такие факторы, как диаметр и величина обжатия вертикальных валков, температура прокатки и диаметр горизонтальных валков, оказывают влияние на величину силы прокатки. Наиболее значимо сила прокатки на вертикальном разрезном валке зависит от глубины внедрения и его диаметра. Величины обжатий со стороны разрезного и гладкого вертикальных валков, а также их диаметры, являются основными факторами, определяющими соотношение смещаемых объемов металла от вертикальных валков. Установлено, что при прокатке трамвайных рельсов в четырехвалковых калибрах, при обеспечении отношения смещаемых объемов металла вертикальными валками $V_p/V_r = 3,22 \div 4,44$, обеспечивается равенство сил прокатки $P_p/P_r = 0,85 \div 1,19$.

2. Для проверки адекватности моделирования методом конечных элементов процесса прокатки трамвайных рельсов в уравновешенных четырехвалковых калибрах проведены промышленные прокатки на стане с группой тандем, при проведении которых экспериментально подтверждено эффективное соотношение сил прокатки между вертикальными валками в зависимости от смещаемых ими объемов металла в очаге деформации четырехвалковых калибров. По итогам промышленного эксперимента подтверждена установленная закономерность сил прокатки, смещаемых объемов металла и коэффициента изменения размеров фланцев. При проведении промышленного эксперимента выполнялось заданное условие отношений смещаемых объемов металла между вертикальными валками, при этом фактические значения деформированных объемов металла со стороны

прокатного валка для разрезки головки составили $V_p = 162957,34 \text{ мм}^3$, со стороны вертикального прокатного валка, обжимающего подошву $V_r = 37420,88 \text{ мм}^3$, соотношение смещаемых объемов составляет $V_p/V_r = 4,35$ (при теоретических $V_p/V_r = 3,22 \div 4,44$). Подтверждено равенство сил прокатки между вертикальными валками, при этом фактические средние значения составили $P_p/P_r = 1,1$ (при теоретическом соотношении $P_p/P_r = 0,85 \div 1,19$), фактический коэффициент изменения размеров фланцев $\beta_n = \beta_2 = 0,98 \div 1,1$ (при теоретическом $\beta_n = \beta_2 = 0,99 \div 1,01$). Выявленную закономерность возможно объяснить тем, что характер течения металла в зоны отставания и опережения сильно зависит от геометрических факторов калибра, что позволяет получить равенство сил прокатки в горизонтальном направлении. Полученные результаты промышленного эксперимента с высокой схожимостью совпадают с данными моделирования методом конечных элементов, что позволяет сделать вывод об адекватности проведенного исследования.

3. С целью подтверждения достоверности результатов моделирования методом конечных элементов по напряженно-деформированному состоянию металла в четырехвалковых калибрах проведены промышленные прокатки на действующем прокатном стане с группой тандем. Отбирались пробы в калибрах UR-1, UR-2, UR-3 и UF по режимам обжатия, соответствующим расчетным значениям, которые показали наилучшие результаты при моделировании методом конечных элементов. После каждого прохода в вышеуказанных калибрах отбирали недокаты, из которых изготавливали темплеты для проведения их замеров и оконтуривания. Темплеты промышленного эксперимента сравнили с результатами моделирования методом конечных элементов. Установлено, что геометрические размеры поперечного сечения темплетов, полученных в промышленном эксперименте, с высокой точностью соответствуют поперечному сечению 3-D моделей, полученных при проведении компьютерного моделирования процесса прокатки в соответствующих калибрах. По результатам

обмеров готового профиля экспериментальных прокаток трамвайных рельсов на стане с группой тандем все рельсы признаны годными.

4. По итогам моделирования методом конечных элементов проведены промышленные исследования по выработке осевой пористости и ее трансформации при прокатке в зависимости от формы калибра и коэффициента вытяжки. Изучение макроструктуры НЛЗ проводили на темплетях, отобранных от трех плавков. Для проведения промышленных экспериментов выбирались НЛЗ с максимальной осевой пористостью $\varnothing 40$ мм. Макроструктуру поперечного сечения раската выявляли глубоким травлением поверхности отрезанных темплетов после второго, седьмого и девятого проходов в клетях VD-1 и VD-2, полученных из отобранных проб методами холодной механической обработки. Полученные темплеты замерены, оконтурены и соотнесены с результатами моделирования методом конечных элементов. По итогам промышленных экспериментов подтверждены данные компьютерного моделирования, указывающие, что на заваривание осевой несплошности в процессе прокатки влияет, главным образом, величина сжимающих напряжений на поверхности раската. Большие напряжения в процессе пластической деформации зоны осевой пористости способствуют интенсивной проработке несплошности раската. По результатам моделирования методом конечных элементов, заваривание максимально возможной осевой несплошности происходит в десятом проходе, что подтверждается результатами промышленного эксперимента на заготовке с максимальной начальной осевой пористостью. Уменьшение площади осевой пористости пропорционально суммарному коэффициенту вытяжки. Проведен анализ темплетов после прокатки НЛЗ с максимальной осевой пористостью в чистовом калибре UF. Установлено, что металл профиля имеет удовлетворительную макроструктуру, требуемую геометрию, а зона с осевой пористостью отсутствует, что подтверждает адекватность полученных результатов моделирования методом конечных элементов. Результаты

промышленного эксперимента на заготовке с максимальной осевой пористостью показали высокую сходимость с результатами компьютерного моделирования.

5. По итогам всех проведенных промышленных экспериментов по разработанной технологии прокатки трамвайных рельсов отобраны рельсовые пробы. Установлено, что полученная геометрия профиля и механические характеристики полученных трамвайных рельсов с применением чистовой непрерывной реверсивной группы клетей тандем соответствуют требованиям ГОСТ, при этом зона с осевой пористостью в готовом профиле отсутствует. Результаты компьютерного моделирования и промышленного эксперимента имеют высокую сходимость, что говорит об адекватности проведенного исследования.

4 ВНЕДРЕНИЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ АСИММЕТРИЧНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ПРОФИЛЕЙ НА СТАНАХ С ГРУППОЙ ТАНДЕМ

4.1 Прокатка трамвайных рельсов на стане с группой тандем АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

При прокатке по проектной технологии получены неудовлетворительные результаты по выработке осевой пористости НЛЗ. Профиль поперечного сечения имел нестабильную геометрию и неудовлетворительную макроструктуру (рисунок 4.1). Недостатки проектной калибровки: осевая пористость исходной НЛЗ не вырабатывалась в готовом профиле; скоростные режимы не обеспечивали эффективную технологию прокатки; значительное различие сил прокатки от обжатия вертикальными валками в четырехвалковых калибрах вызывало дополнительную неравномерность НДС и интенсивный износ горизонтальных валков.

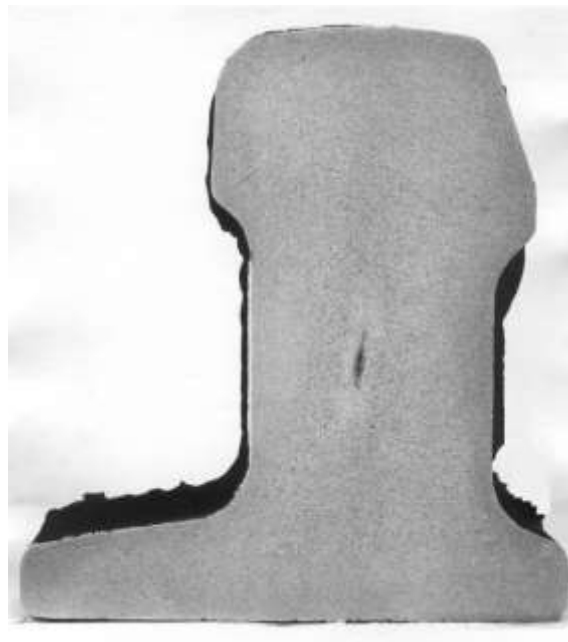
Разработана новая технология прокатки трамвайных рельсов на рельсобалочном прокатном стане в состав которого входят дуо реверсивные клетки (рисунок 4.2) и непрерывно-реверсивная группа клеток тандем (рисунок 4.5), состоящая из двух универсальных клеток, между которыми установлена вспомогательная двухвалковая клетка, применяемая для контроля высоты фланцев. По разработанной технологии предчистовой раскат прокатывают за три прохода в реверсивной группе клеток с поджатием горизонтальных и вертикальных валков после каждого прохода с возможностью осевого перемещения вспомогательной клетки для обеспечения сохранения постоянства линии прокатки, при этом работа прокатного стана осуществляется в автоматическом режиме по разработанной программе.

Четырехвалковые калибры универсальных клеток состоят из двух горизонтальных приводных валков и двух вертикальных не приводных валков

меньшего диаметра. Вращение неприводных валков во время прокатки осуществляется за счет сил трения, поэтому, чтобы минимизировать влияние инерционных сил неприводных вертикальных валков, они имеют гораздо меньшие габаритные размеры и, соответственно, меньшую маховую массу по сравнению с горизонтальными приводными валками.



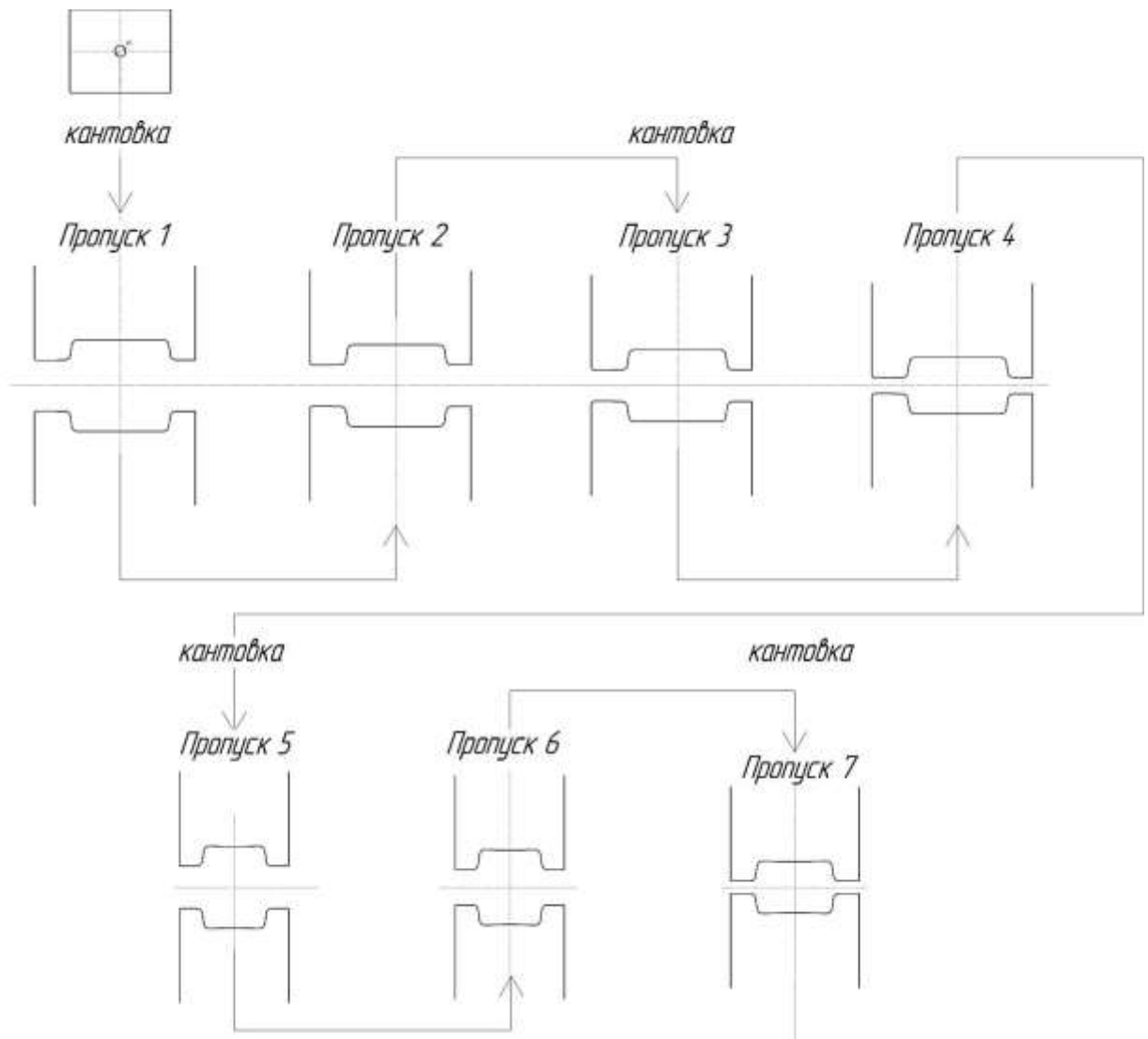
а



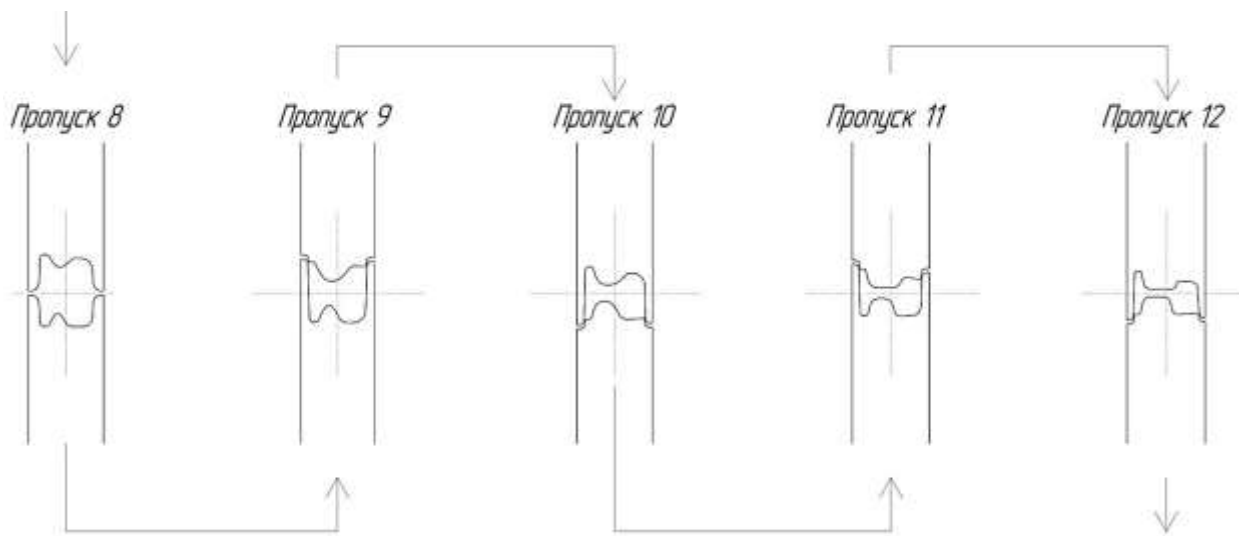
б

Рисунок 4.1 – Недопустимый дефект осевой несплошности в готовых асимметричных рельсах прокатанных по проектной технологии:

а – трамвайный рельс Т62; б – остряковый рельс ОР65



а



б

Рисунок 4.2 – Схема прокатки в клетях ВД-1 (а) и ВД-2 (б) по разработанной технологии

В предлагаемой технологии после каждого прохода в чистовой непрерывной группе клетей происходит поджатие валков задействованных клетей, а в чистовом проходе, дополнительно, осевое перемещение рабочей клетки дуо, для того чтобы совместить ее чистовой калибр с постоянной осью прокатки (рисунок 4.3).

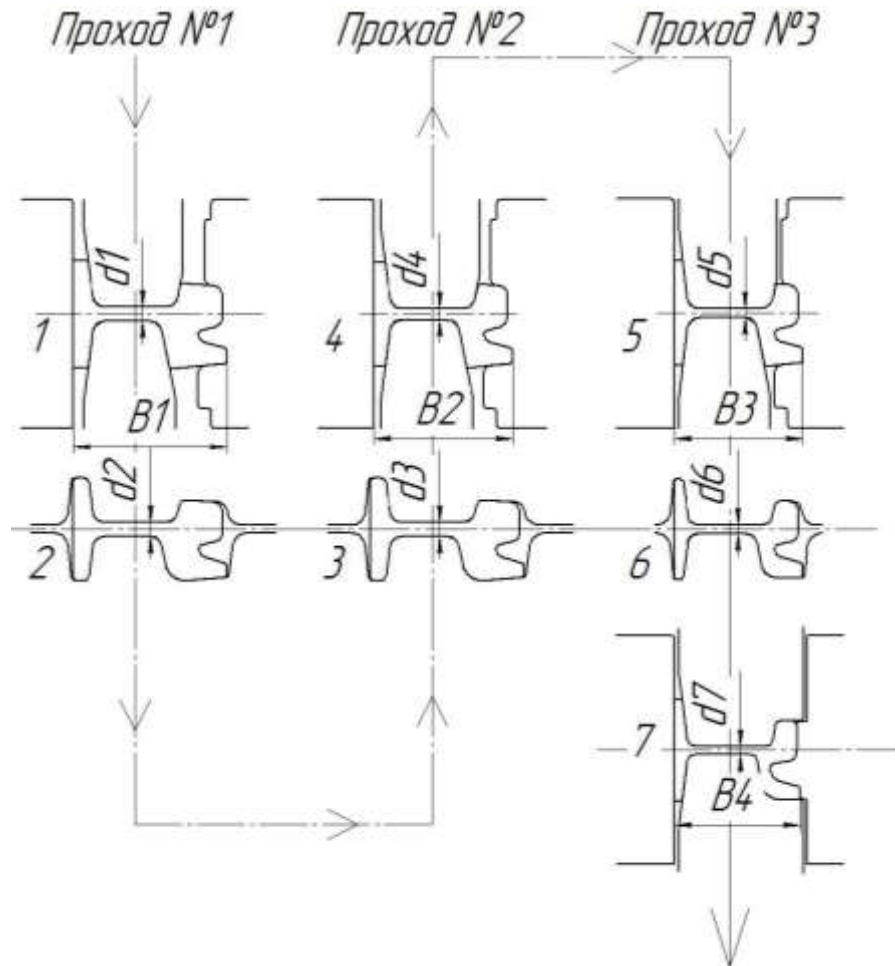


Рисунок 4.3 – Схема прокатки трамвайного рельса в непрерывной реверсивной группе клетей тандем (цифра рядом с калибром обозначает его порядковый номер в чистовой группе клетей)

При прокатке в четырехвалковых калибрах обжатие шейки и внутренних боковых поверхностей фланцев профиля осуществляется горизонтальными валками. Разделение головки на саму головку и губу, а также обжатие подошвы осуществляется неприводными вертикальными валками. Вертикальные валки, при таком способе прокатки, вращаются с окружной скоростью, обеспечивающей минимизацию проскальзывания металла по поверхности валка, что является более

благоприятным, по сравнению с прокаткой в двухвалковых калибрах, и позволяет получить более качественную обрабатываемую поверхность.

В связи с тем что при обжатии головки и подошвы профиля вертикальными валками под прямым давлением получается изменение размеров фланцев, для возможности получения их требуемой высоты применяется двухвалковая эджерная клеть. Она имеет два горизонтальных приводных валка и применяется исключительно для контроля высоты фланцев профиля. Вспомогательная клеть дуо установлена в непосредственной близости от универсальных клеток, обеспечивающих размещение привалковой арматуры.

Компактное расположение клеток, чередование в них четырехвалковых и двухвалковых калибров, а также возможность реверса прокатных валков позволяет работать в непрерывном режиме и, за один проход, но в разных калибрах, чередовать обжатие фланцев и их контроль высоты. Указанные преимущества стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК» с непрерывной реверсивной группой клеток тандем позволяют внедрить разработанную ресурсосберегающую технологию прокатки трамвайных рельсов.

Предлагаемая технология прокатки трамвайных рельсов в непрерывной реверсивной группе клеток тандем осуществляется следующим образом: после прокатки в черновых клетях и получения черногового рельсового профиля раскат задается в чистовую непрерывную реверсивную группу клеток.

Первый проход при прокатке трамвайного рельса является наиболее сложным, с точки зрения пластической деформации, и включает в себя непрерывную прокатку в двух калибрах: четырехвалковом и двухвалковом. Чистовая клеть находится в линии прокатки, но ее валки разведены. В первом четырехвалковом калибре осуществляется интенсивная деформация головки профиля. Головка профиля обрабатывается вертикальным неприводным валком, который имеет характерный гребень, предназначенный для разделения объема металла на саму головку и губу профиля. При этом происходит обжатие по всем элементам профиля. Затем раскат задается в двухвалковый калибр вспомогательной клетки, и после одновременного ускорения двух клеток с раскатом до максимальных

оборотов горизонтальных валков в непрерывном режиме осуществляется первый проход.

Первый проход заканчивается выходом раската, после чего происходит торможение валков. Для второго прохода горизонтальные и вертикальные валки первой универсальной клетки и горизонтальные валки вспомогательной клетки дуо автоматически, по заданной программе калибровки, поджимаются, образуя при этом новые калибры, без осевого перемещения самих клеток. Во втором проходе раскат задается в двухвалковый калибр вспомогательной клетки, где осуществляется обжатие фланцев по высоте, после чего раскат задается в четырехвалковый калибр, где осуществляется дальнейшая деформация по элементам профиля с оформлением головки трамвайного рельса. После захвата раската в четырехвалковом калибре происходит разгон двух клеток с раскатом до максимальной скорости вращения горизонтальных валков, аналогично первому проходу. Второй проход заканчивается выходом раската и торможением валков клеток.

Для третьего прохода так же, как и для предыдущих проходов, в автоматическом режиме происходит поджатие валков двух универсальных клеток, а эджерная клетка сдвигается в осевом направлении на чистовой калибр, который устанавливается в линию прокатки, образуя при этом систему калибров в трех клетях. Далее происходит разгон горизонтальных валков всех трех клеток до требуемого значения, и раскат поочередно задается в каждый калибр, после чего в непрерывном режиме осуществляется окончательный чистовой проход. В четырехвалковых калибрах происходит окончательное оформление губы, желоба и головки, а в двухвалковом калибре осуществляется контроль фланцев профиля.

После выхода раската из последнего калибра третьего прохода происходит торможение валков во всех трех клетях. Валки первой универсальной клетки разводятся на калибр для первого прохода, эджерная клетка смещается на исходную позицию первого прохода, а валки чистовой клетки разводятся, после чего непрерывная реверсивная группа клеток готова к прокатке следующего раската.

В отличие от ранее используемых технологий прокатки в предчистовых и чистовых прокатных клетях, в которых калибры перед прокаткой всей партии металла настраивались по шаблону (старый прокатный стан), на стане с группой тандем подстройка калибра осуществляется после каждого прохода по расчетным коэффициентам позиционирования валков $\frac{1}{\eta}$ и $\frac{1}{\beta}$ (коэффициентам деформации).

Настройка калибров клеток группы тандем осуществляется по следующим закономерностям:

– коэффициент деформации в горизонтальных валках: $\frac{1}{\eta} = \frac{d_{n+1}}{d_n}$;

– коэффициент деформации в вертикальных валках: $\frac{1}{\beta} = \frac{B_{n+1}}{B_n}$;

где d_{n+1} – расстояние между горизонтальными валками в последующем калибре, мм;

d_n – расстояние между горизонтальными валками в прокатываемом калибре, мм;

B_{n+1} – расстояние между вертикальными валками в последующем калибре, мм;

B_n – расстояние между вертикальными валками в прокатываемом калибре, мм.

По разработанной автором технологии для прокатки трамвайного рельса определены коэффициенты деформации (настройки) в калибрах (таблица 4.1) для каждого прохода в непрерывной чистовой группе клеток тандем.

При рассмотрении зависимостей коэффициентов $\frac{1}{\eta}$ и $\frac{1}{\beta}$ можно отметить, что максимальные деформации происходят в калибрах 1, 4 и 5 (рисунок 4.3). Это четырехвалковые калибры, в которых происходит интенсивная деформация, обусловленная особенностями профиля трамвайного рельса. Также стоит отметить, что с увеличением коэффициента деформации горизонтальных валков $\frac{1}{\eta}$ необходимо повышать пропорционально и коэффициент деформации вертикальных валков $\frac{1}{\beta}$, тем самым обеспечивая повышение коэффициента эффективности калибра и увеличение общего коэффициента эффективности чистовой реверсивной группы клеток.

Таблица 4.1 – Коэффициенты деформации в калибрах непрерывно-реверсивной группы клетей тандем

Коэффициент деформации в калибрах	1-ый проход		2-ой проход		3-ий проход		
	калибр						
	1	2	3	4	5	6	7
$\frac{1}{\eta}$	1	0,97	0,99	0,79	0,79	0,99	0,9
$\frac{1}{\beta}$	1	–	–	0,9	0,93	–	0,97

Применяя программный комплекс Excel [341] с использованием инструмента анализа «регрессия», при помощи метода наименьших квадратов получили математические зависимости по нахождению эффективных коэффициентов деформации (поджатия) горизонтальных и вертикальных валках $\frac{1}{\eta}$ и $\frac{1}{\beta}$ для четырехвалковых калибров группы тандем:

$$\frac{1}{\eta} = -0,0049x^5 + 0,0927x^4 - 0,6362x^3 + 1,9525x^2 - 2,6638x + 2,2586;$$

$$R^2 = 0,9779;$$

$$\frac{1}{\beta} = -0,0016x^5 + 0,0288x^4 - 0,1877x^3 + 0,535x^2 - 0,6669x + 1,2914;$$

$$R^2 = 0,9092;$$

где x – порядковый номер калибра.

Все вышеперечисленные настройки калибров после каждого прохода и перемещение вспомогательной клетки возможны только благодаря автоматизированной системе управления прокатным станом, которая позволяет получить профиль трамвайного рельса в узком диапазоне допусков с высоким качеством геометрии профиля.

Особенности технологии прокатки в чистовой непрерывно-реверсивной группе клетей заключается в следующем:

- линия прокатки во всех проходах остается постоянной;
- между вторым и третьим проходом вспомогательная клеть дуо перемещается в осевом направлении;
- в процессе прокатки универсальные клетки не перемещаются и находятся на одной линии прокатки;
- после каждого прохода осуществляется подстройка калибров прокатных клеток;
- реверсивная прокатка в непрерывной чистовой группе осуществляется сразу в двух или трех клетях;
- из условия постоянства секундных объемов работа клеток строго синхронизирована таким образом, что при заданных скоростных режимах прокатки раскат одновременно ускоряется в двух клетях. Прокатка одновременно в двух или трех клетях осуществляется при постоянной скорости, причем в первом и втором проходах на максимальной скорости;
- врез калибра остается одинаковым, изменяется только обжатие по периметру профиля;
- технология возможна исключительно в автоматическом режиме управления;

Исходя из ранее полученных результатов моделирования методом конечных элементов и натурных исследований, разработанные методы расчета и способы прокатки применялись для разработки новой технологии прокатки трамвайных рельсов (рисунок 4.4).

Профиль трамвайного рельса получают из НЛЗ сечением 300 x 365 мм за 15 проходов в 19 калибрах, которые распределяются по клетям стана с группой тандем следующим образом:

- в клетки VD-1 осуществляется 7 проходов;
- в клетки VD-2 осуществляется 5 проходов;
- в непрерывной реверсивной группе клеток тандем 3 прохода в 7 калибрах. Из них образование желоба осуществляется в четырехвалковых калибрах, которые распределены по клетям UR и UF (UR-1, UR-2, UR-3 и UF). Цифра после обозначения клетки означает номер прохода.

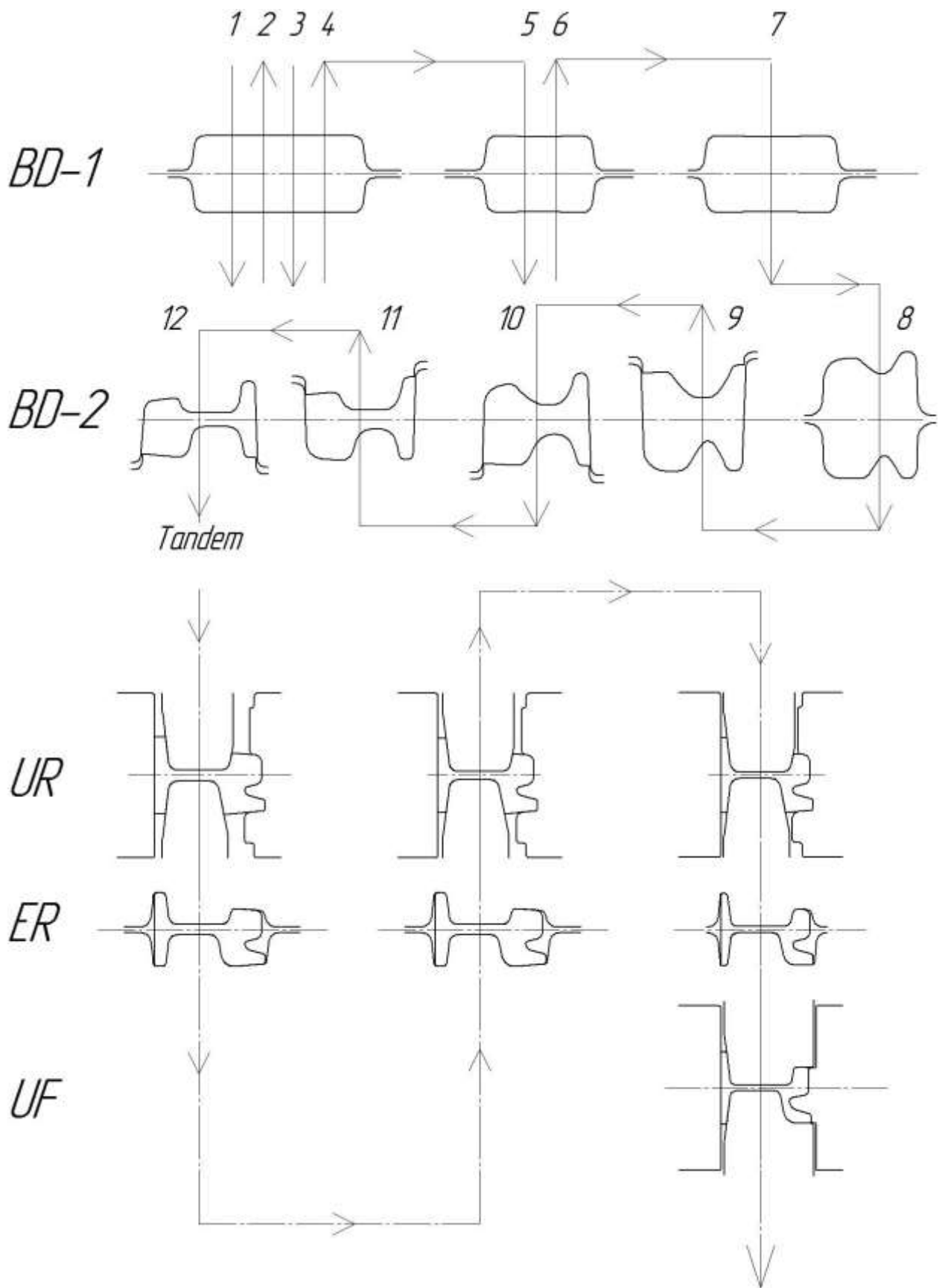


Рисунок 4.4 – Схема прокатки трамвайных рельсов по разработанной технологии

Для разработанной технологии рассчитаны новые режимы, по которым осуществлялась настройка клеток BD-1 и BD-2 (таблица 4.2), а также для чистовой непрерывной реверсивной группы клеток, состоящей из клеток UR, ER, UF (таблица 4.3). В черновых калибрах применена технология, исходя из ранее полученных результатов проведенных экспериментов по выработке осевой пористости и расчетов эффективности калибра (рисунок 4.5).

Таблица 4.2 – Программа калибровки для трамвайных рельсов РТ62 в клетях BD-1 и BD-2 стана с группой тандем

Проход	Клеть	Рабочий зазор между валками, мм	Коэффициент вытяжки	Суммарная вытяжка	Скорость прокатки, м/с	Усилие прокатки, кН	Кантовка
1	BD-1	47	1,062	1,062	3,5	6000	0
2	BD-1	17	1,093	1,16	3,5	6000	0
3	BD-1	118	1,1396	1,32	3,5	6000	1
4	BD-1	63	1,231	1,63	3,5	6000	0
5	BD-1	48	1,071	1,744	3,5	5800	1
6	BD-1	13	1,099	1,96	3,5	5500	1
7	BD-1	11	1,125	2,2	3,5	5500	1
8	BD-2	13	1,153	2,54	3,5	6000	1
9	BD-2	13	1,275	3,24	3,5	5700	0
10	BD-2	13	1,272	4,13	3,5	5500	0
11	BD-2	13	1,239	5,11	3,5	5000	0
12	BD-2	13	1,177	6,02	3,5	4300	0

1- означает кантовка на 90⁰ перед проходом; 0 – отсутствие кантовки

Таблица 4.3 – Программа калибровки для трамвайных рельсов РТ62 в клетях UR, ER, UF стана с группой тандем

Проход	Клеть (калибр)	Рабочий зазор между горизонтальными валками, мм	Рабочий зазор между вертикальными валками, мм		Коэффициент вытяжки	Суммарная вытяжка	Скорость прокатки	Усилие прокатки, кН		
			Гладкий валок	Разрезной валок				Горизонтальные валки	Гладкий валок	Разрезной валок
1	UR (UR-1)	22,5	15,8	34,1	1,198	7,21	3,5	2300	1350	1500
	ER (ER-1)	22	–	–	1,04	7,5	3,5	1600	–	–
2	ER (ER-2)	21,5	–	–	1,04	7,8	3,5	1600	–	–
	UR (UR-2)	17	10,2	16,5	1,268	9,89	3,5	2470	1200	1200
3	UR (UR-3)	13,5	6	6	1,247	12,331	2,5	2400	1100	1100
	ER (ER-3)	12,8	–	–	1,042	12,849	2,5	1640	–	–
	UF	12,1	6	6	1,05	13,49	2,5	1800	1000	1000

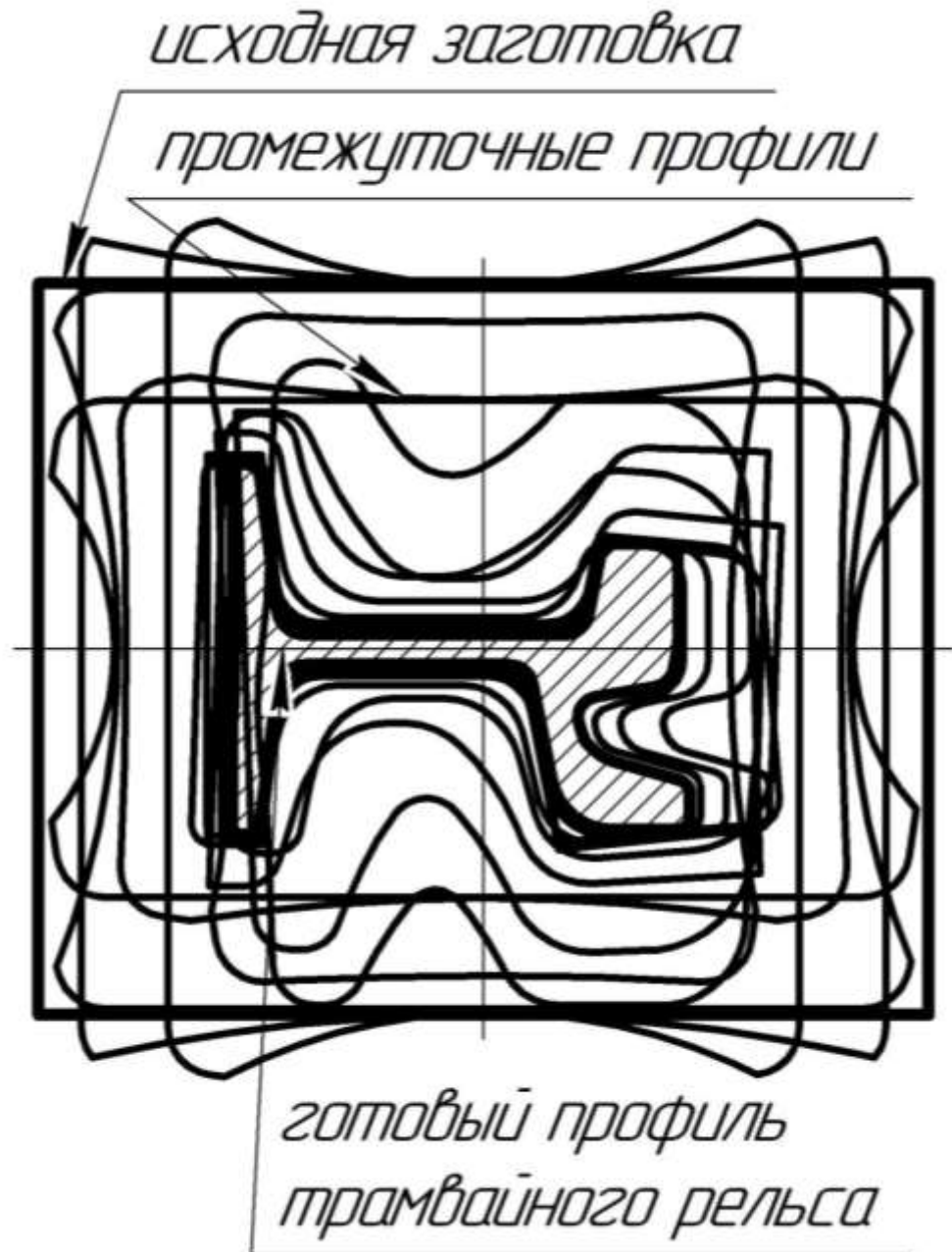


Рисунок 4.5 – Схема деформации заготовки в готовый профиль

В разработанной технологии прокатки применен новый скоростной режим прокатки трамвайных рельсов в чистовой непрерывно-реверсивной группе клеток, который показан на рисунке 4.6.

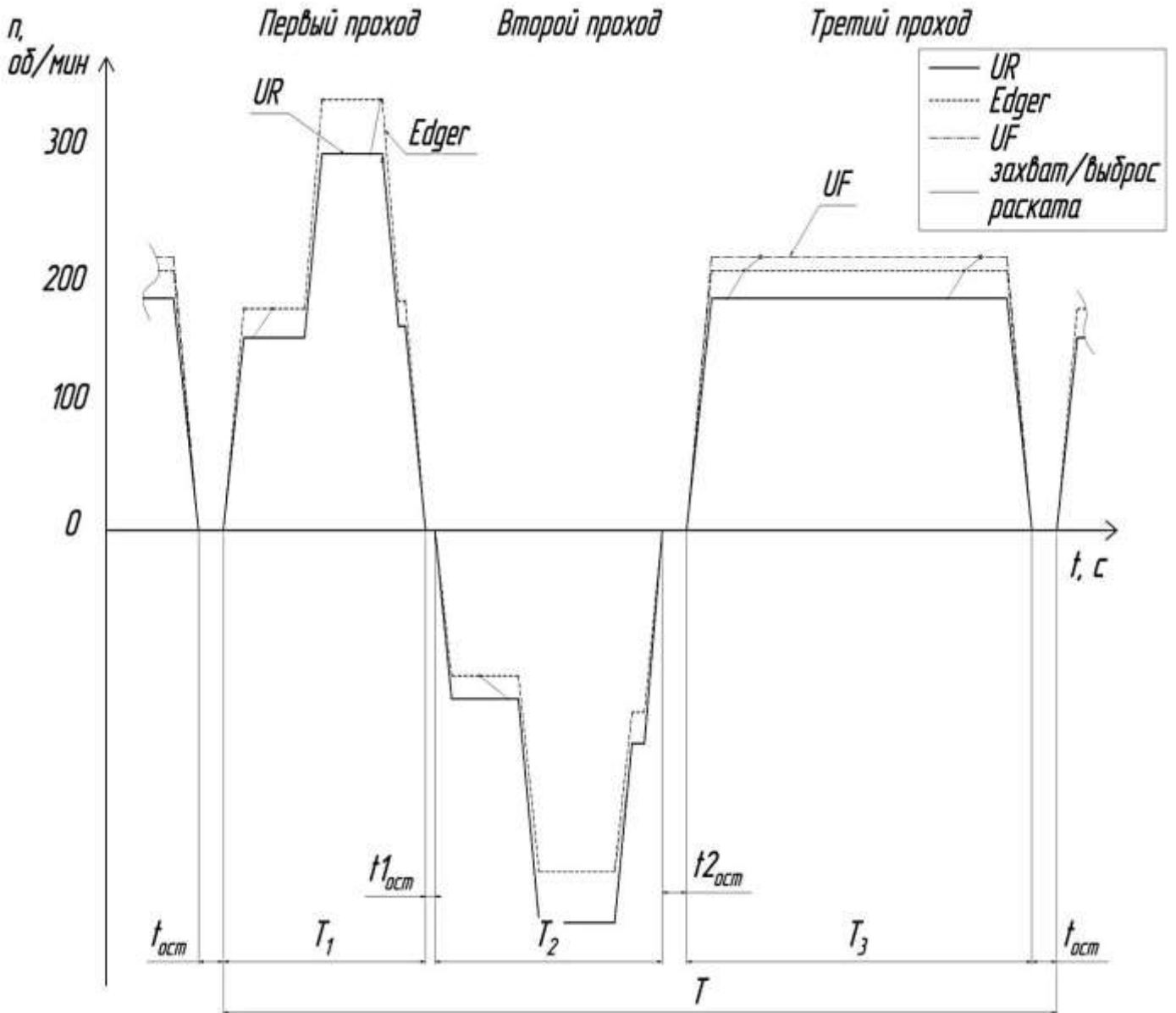


Рисунок 4.6 – Диаграмма скоростей для прокатки в непрерывной чистовой группе клетей тандем

где T_1 – время прокатки в первом проходе;

T_2 – время прокатки во втором проходе;

T_3 – время прокатки в третьем проходе;

T – время прокатки в группе тандем одного раската;

$t_{1\text{ост}}$ – время остановки клетей после первого прохода;

$t_{2\text{ост}}$ – время остановки клетей после второго прохода;

$t_{\text{ост}}$ – время остановки клетей для подготовки к прокатке следующего раската.

4.1.1 Прокатка в уравновешенных четырехвалковых калибрах

При рассмотрении промышленных результатов проектной технологии прокатки трамвайных рельсов на стане с группой тандем в первом проходе средняя действительная сила прокатки в калибре UR-1 на горизонтальных валках находилась в интервале $P = 2 - 2,6$ МН. К концу полосы сила прокатки возрастала, что объясняется разностью температур по длине 50-метрового раската. Сила прокатки от вертикального валка по подошве в среднем составляла $P = 1,05 - 1,25$ МН. Сила прокатки от разрезного валка по головке составляла $P = 1,5 - 1,8$ МН. Из проведенных ранее исследований силы прокатки по проектной технологии, изложенных в главе 2, установлено, что в горизонтальной плоскости от обжатий вертикальными валками существует значительная неравномерность действующих сил прокатки. Различие в значениях силы прокатки между разрезным валком со стороны головки и гладким валком со стороны подошвы достигало 30 – 35%, что объясняется значительной разностью по обжатиям элементов профиля.

В новой разработанной технологии прокатки в чистовой непрерывно-реверсивной группе клетей, при настройке четырехвалковых калибров, применен способ, в котором учитываются смещаемые объемы металла по элементам профиля, при этом величина обжатия металла по головке и подошве профиля рассчитана таким образом, чтобы возникающие силы прокатки от вертикальных валков, со стороны головки $P_{г}$ и подошвы $P_{п}$ профиля были равны между собой (имели минимальное различие) $P_{г} \approx P_{п}$. Причем профиль раската рассчитан таким образом, чтобы из предшествующего калибра в последующий калибр металл обжимался настолько, чтобы раскат из калибра в калибр обеспечивал равенство сил прокатки со стороны головки и подошвы профиля. Данный способ прокатки асимметричных рельсовых профилей позволяет исключить осевые усилия на горизонтальные валки, а четырехвалковый калибр является уравновешенным по усилиям прокатки в горизонтальном направлении (рисунок 4.7) [349, 350].

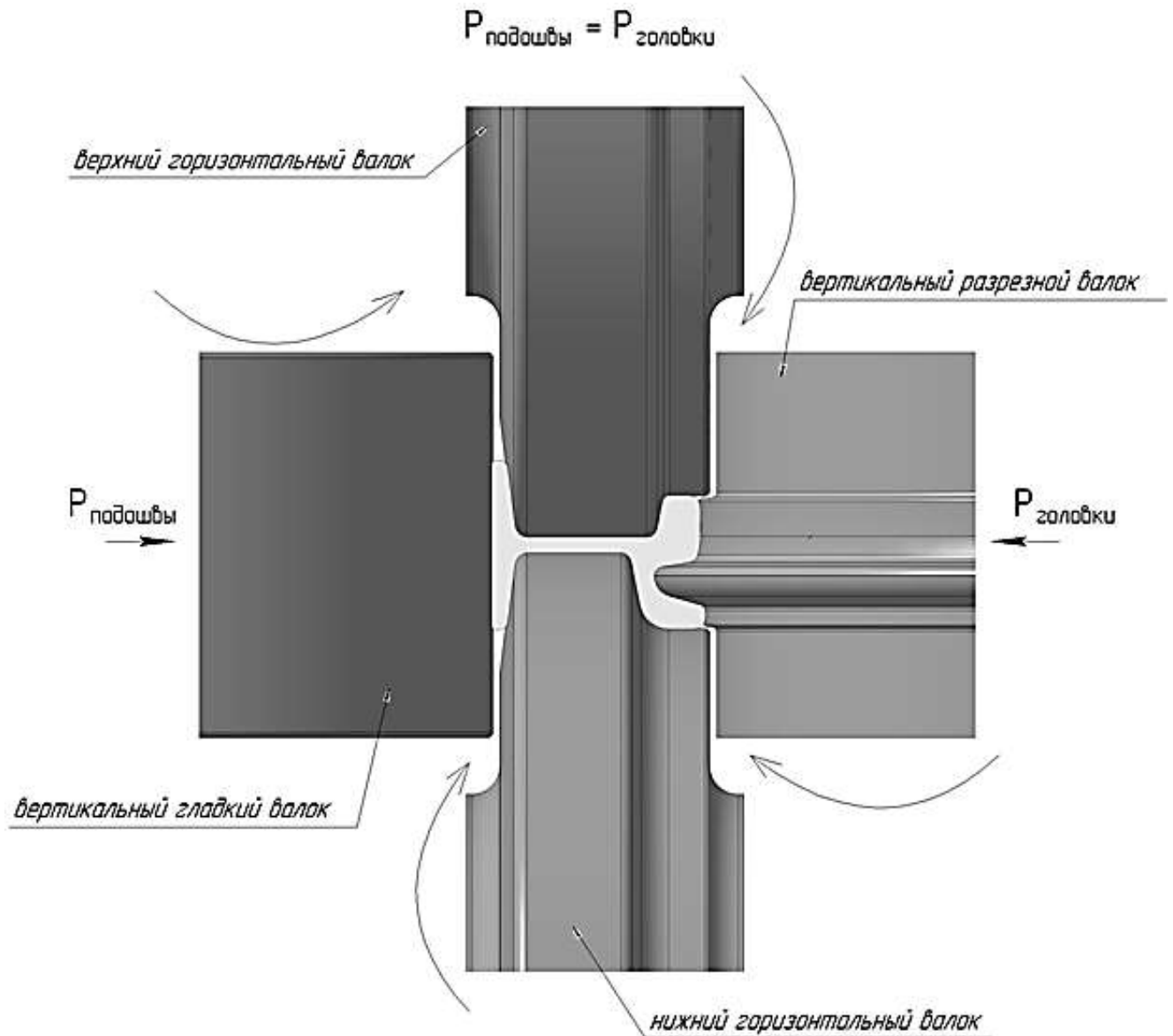


Рисунок 4.7 – 3-D модель уравновешенного по усилиям прокатки четырехвалкового калибра для прокатки трамвайных рельсов

В чистовой группе клетей тандем прокатка осуществляется в непрерывном режиме следующим образом:

- первый проход в двух клетях (калибры UR-1 и ER-1);
- второй проход реверсивный, также в двух клетях (калибры ER-2 и UR-2);
- третий чистовой проход в трех клетях (калибры UR3-ER3-UF).

Как установлено в главе 2, при прокатке трамвайных рельсов в четырехвалковых калибрах со стороны вертикальных валков, формирующих

подошву и головку профиля, действуют различные по величине силы прокатки. Это приводит к осевому смещению валков [60], которое неблагоприятно сказывается на стабильности прокатываемого профиля. Также осевое смещение валков требует дополнительные настройки калибра. При этом неэффективно используется мощность привода клетки, которая расходуется на деформацию опорных узлов горизонтальных валков по направлению, соответствующему большему деформирующему усилию [60].

Как показали многочисленные проведенные промышленные исследования по прокатке трамвайных рельсов в четырехвалковых калибрах стана с группой тандем, по элементам профиля происходит местная деформация, а при разрезке головки трамвайных рельсов металл идет не только на вытяжку, но и на уширение, причем слои металла дают определенное сопротивление, и в связи с этим часть объемов деформируемого металла смещается в зону отставания.

По итогам промышленных прокаток трамвайных рельсов на стане с группой тандем все раскаты с передней и задней части имели одинаковые особенности. На рисунке 4.8 представлены концевые обрезы с переднего и заднего концов одного раската после чистового калибра. Как видно из рисунка, наибольшая часть профиля, испытывающая вытяжку, – это шейка профиля. Она с переднего и с заднего концов максимально выступает, определяя длину раската, причем даже профиль шейки вытянут неравномерно – со смещением «языка» в сторону подошвы. Стоит отметить, что характер вытяжек по всем элементам профиля с переднего и заднего концов различны между собой.

При рассмотрении переднего конца раската (рисунок 4.9) видно, что головка по отношению к шейке и подошве занимает среднее положение. Так, шейка относительно головки вытянута в среднем на 160 мм, а подошва отстает от головки порядка 75 мм. При этом металл головки и подошвы утягивает шейка профиля. Полученные результаты подтверждают адекватность проведенного компьютерного моделирования.



Рисунок 4.8 – Концевые обрезы с переднего и заднего концов одного раската трамвайного рельса

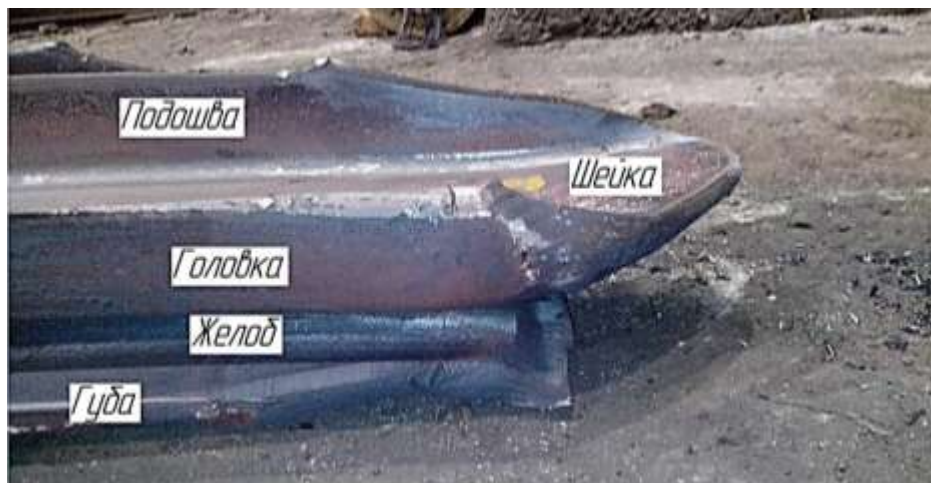


Рисунок 4.9 – Передняя концевая обрезь трамвайного рельса

При рассмотрении заднего конца раската (рисунок 4.10) наблюдается вытяжка элементов, по характеру отличная от переднего конца. Из-за разновременной деформации и различной величины обжатия по элементам профиля, максимальную вытяжку имеет шейка, среднее значение вытяжки по подошве, а минимальную вытяжку имеет головка профиля. Шейка относительно головки отстает порядка 290 мм, а подошва – порядка 125 мм.

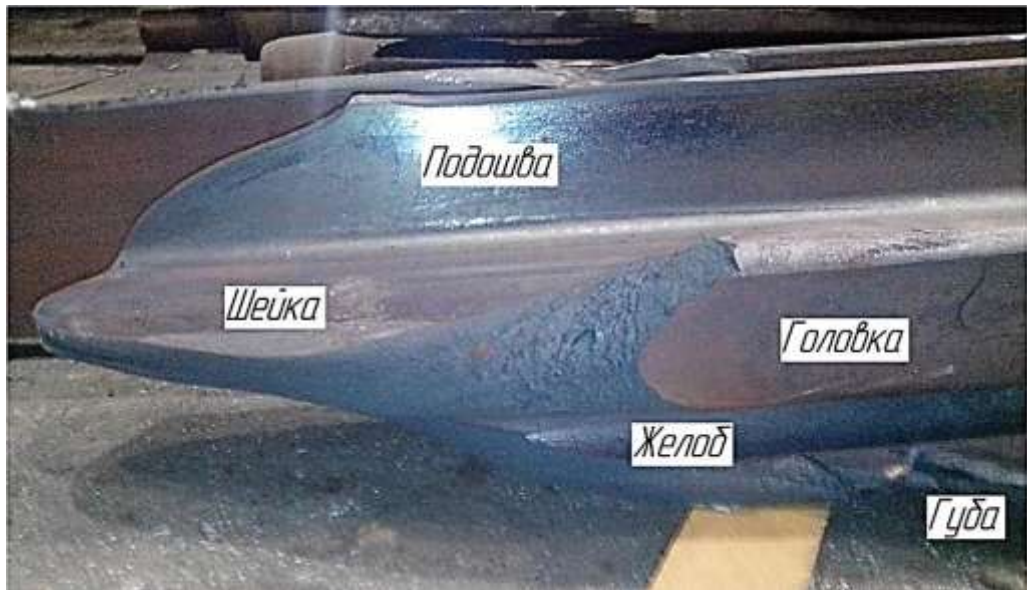


Рисунок 4.10 – Задняя концевая обрезь трамвайного рельса

Исходя из полученных данных по результатам промышленных исследований, выполненных на промышленном стане с группой тандем по вытяжкам элементов профиля, можно сделать вывод о том, что течение металла при прокатке в асимметричных рельсовых калибрах, применяемых для прокатки трамвайных рельсов, достаточно сложное и не подчиняется закону плоских сечений. Это отчетливо подтверждается анализом вытяжек по элементам профиля с переднего и заднего концов раскатов, а именно тем, что характер распределения вытяжки элементов с переднего и заднего конца различен (рисунок 4.11). При разрезке головки трамвайных рельсов металл идет не только на вытяжку, но и на уширение, причем слои металла создают определенное сопротивление, и в связи с этим часть объемов деформируемого металла смещается в зону отставания.

В диссертации предлагается способ прокатки, основанный на равенстве сил прокатки от обжатия вертикальными валками, в котором необходимо учитывать смещаемые объемы металла по элементам профиля, а именно в головке $V_{Г}$ и в подошве $V_{П}$.



Рисунок 4.11 – Задний необрезанный конец проката трамвайного рельса

По предлагаемой технологии прокатки трамвайных рельсов получены патенты на изобретение [349, 350]. Изобретение может быть использовано при прокатке асимметричных рельсовых профилей – желобчатых, остряковых и усовиковых рельсов с применением непрерывной чистовой группы клетей тандем, в которых используются четырехвалковые калибры, состоящие из двух горизонтальных приводных и двух вертикальных неприводных валков.

Технический результат достигается тем, что, согласно разработанному способу прокатки трамвайных рельсов, в предчистовых проходах и чистовых четырехвалковых калибрах заготовка, прокатываемая в непрерывной группе клетей, рассчитана таким образом, чтобы обжатия металла по элементам профиля в горизонтальном направлении, по головке и подошве раската, обеспечивали равенство (минимальное различие) усилий прокатки со стороны головки ($P_{\text{головки}}$) и со стороны подошвы ($P_{\text{подошвы}}$) в каждом калибре. Причем прокатываемый профиль из предшествующего калибра в последующем калибре обжимается настолько, чтобы раскат из калибра в калибр обеспечивал равенство усилий прокатки со стороны головки и подошвы профиля $P_{\text{головки}} \approx P_{\text{подошвы}}$ (рисунок 4.12). На основании равенства усилий прокатки в горизонтальном направлении обеспечиваются наиболее эффективные условия для работы горизонтальных валков в четырехвалковом калибре, т.е. на них отсутствуют осевые силы, сдвигающие валок по направлению действия больших сил прокатки. При этом

прокатные валки, в свою очередь, опираются буртами шеек валков в опорные подшипники, тем самым вызывая преждевременный износ буртов, а также смещение бандажа с оси составных валков (рисунок 4.13), в результате чего нарушается геометрия калибра, а прокатанный профиль не соответствует требованиям. В предчистовых и чистовом проходах калибры выполнены четырехвалковыми, они состоят из двух горизонтальных приводных валков и двух вертикальных валков, формирующих, соответственно, подошву и поверхность катания головки.

На рисунке 4.12 показаны чистовой четырехвалковый калибр непрерывной чистовой группы клетей тандем для трамвайных рельсов. В предлагаемом способе прокатки рельсовых профилей все калибры в непрерывной группе клетей выполнены четырехвалковыми с горизонтальной осью прокатки. Заготовка в каждом калибре рассчитана таким образом, чтобы величины обжатия по головке и подошве профиля обеспечивали силы прокатки, удовлетворяющие условию: $P_{\text{головки}} \approx P_{\text{подошвы}}$, тем самым обеспечивая равенство сил прокатки от вертикальных валков в горизонтальном направлении, что является эффективной схемой распределения сил прокатки в четырехвалковых калибрах. Предложенный способ прокатки асимметричных рельсовых профилей позволяет устранить осевые силы на горизонтальных приводных прокатных валках, исключив преждевременный износ опорной поверхности горизонтальных валков с подшипниками, а также отсутствует вероятность смещения прокатного бандажа с оси составного валка по направлению действия больших сил прокатки. Предложенный способ позволяет получить сбалансированный четырехвалковый калибр по силам прокатки от вертикальных неприводных валков, обеспечивая при этом эффективное использование энергосиловых параметров прокатного стана.

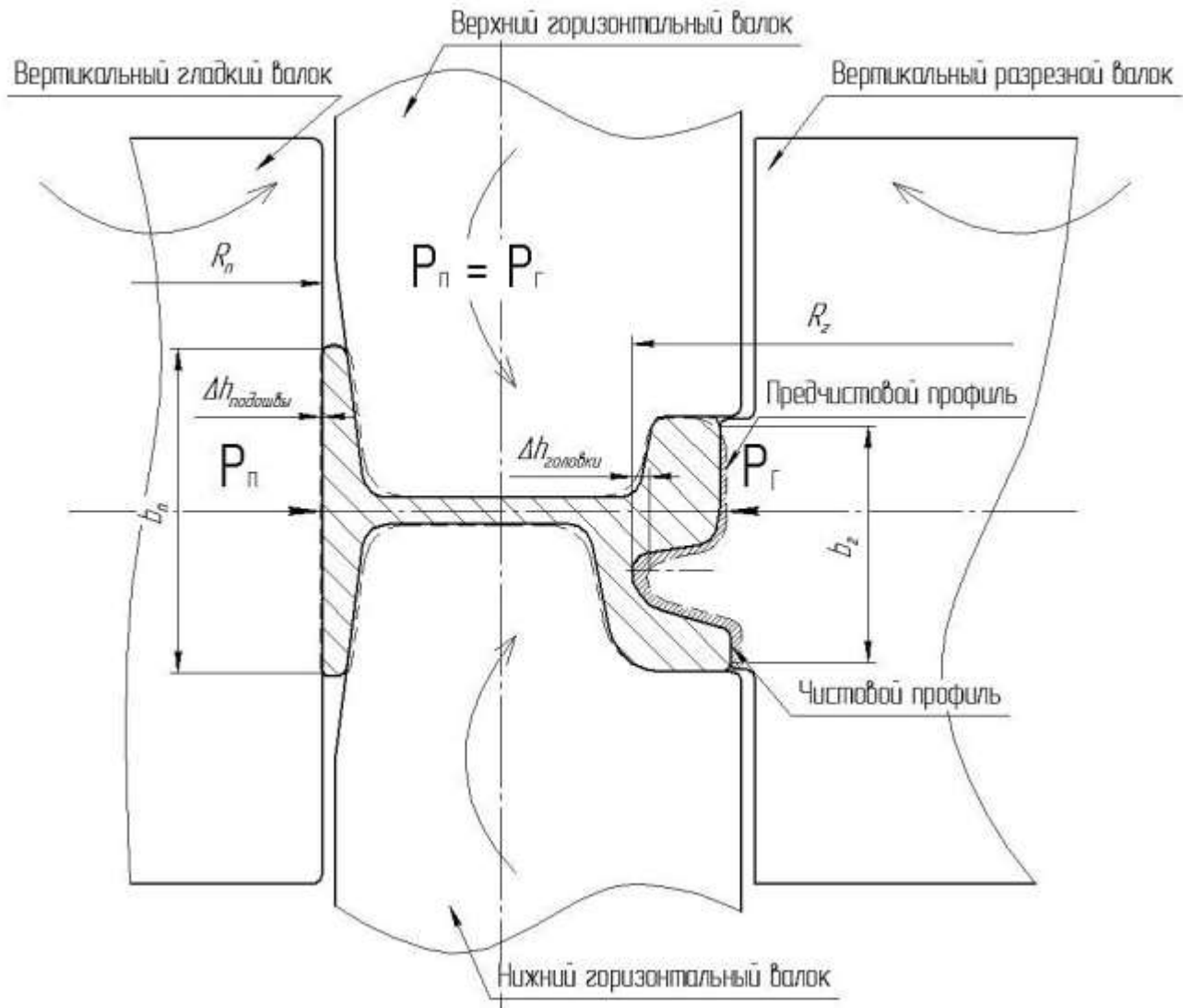


Рисунок 4.12 – Предлагаемый уравновешенный по силам прокатки четырехвалковый калибр для прокатки трамвайных рельсов по предлагаемому способу прокатки (штриховкой показан профиль поперечного сечения прокатываемого профиля) [349]



а



б

Рисунок 4.13 – Горизонтальный прокатный валок универсальной клетки группы тандем по проектной технологии с установленными в проточках ограничителями (секторами) для предотвращения смещения бандажа в сторону подошвы из-за неуравновешенности горизонтальных сил прокатки: а – вид со стороны профиля валка; б – вваренный сектор, предотвращающий смещение бандажа

В рельсобалочном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК» при прокатке трамвайных рельсов по ГОСТ Р 55941-2014 применяется разработанная в диссертации технология прокатки [349]. При этом четырехвалковые калибры непрерывной чистовой группы клетей тандем обеспечивают условие $P_{\text{головки}} \approx P_{\text{подошвы}}$. Температура конца прокатки не более 1000°C , коэффициент линейного расширения $k=1,015$. Исходя из того, что значение среднеконтактного давления в применяемом технологическом процессе существенным образом изменить невозможно, а длина линии соприкосновения вала с прокатываемым металлом зависит от его диаметра, который является постоянной величиной, зависящей от конструктивных особенностей прокатных клетей, соответственно, наиболее значимый показатель, который влияет на усилие прокатки в большей степени, – это значение абсолютного обжатия металла в калибре Δh .

Исходя из общепризнанной методики, изложенной в работе [70] по расчету силы прокатки $P = p_{cp} \cdot F_k$, при этом площадь контактной поверхности металла с валком находится с применением разработанного 3D-метода изложенного во второй главе диссертации.

Предлагаемый способ прокатки асимметричных рельсовых профилей в предчистовых и чистовых четырехвалковых калибрах стана с группой тандем, состоящих из двух горизонтальных приводных валков и двух вертикальных неприводных валков, формирующих подошву и головку рельса, отличается от известных ранее способов тем, что обжатие раската из предшествующего в последующий калибр осуществляют с равенством сил прокатки по головке и подошве со стороны вертикальных валков, обеспечивая равенство $P_{\text{головки}} \approx P_{\text{подошвы}}$, которое можно записать следующим образом:

- для профилей имеющих простую геометрию поперечного сечения профиля:

$$p_{cp} \cdot B_2 \cdot R_2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta h_2}{R_2}} \approx p_{cp} \cdot B_n \cdot R_n \cdot \sqrt{\frac{\Delta h_n}{R_n}},$$

где p_{cp} - среднее контактное давление, МПа;

R - катающий радиус вертикального ролика, мм;

Δh - обжатие, мм;

B – длина линии соприкосновения валка с прокатываемым металлом, мм;

Γ – значение относится к головке профиля;

Π – значение относится к подошве профиля;

- для трамвайных рельсов и других сложных профилей:

$$p_{cp} \cdot F_2 \approx p_{cp} \cdot F_n$$

где F_2 – проекция площади контактной поверхности металла с вертикальным разрезным валком, рассчитанная с помощью разработанного 3D-метода, мм²;

F_n – проекция площади контактной поверхности металла с вертикальным гладким валком, рассчитанная с помощью разработанного 3D-метода, мм².

По предложенной технологии с эффективным распределением сил прокатки в горизонтальной плоскости произведены моделирования методом конечных элементов и промышленные эксперименты, получены графики сил прокатки от обжатия вертикальными валками. На рисунке 4.14 представлен предлагаемый первый четырехвалковый калибр и задаваемый в него раскат по предлагаемой технологии.

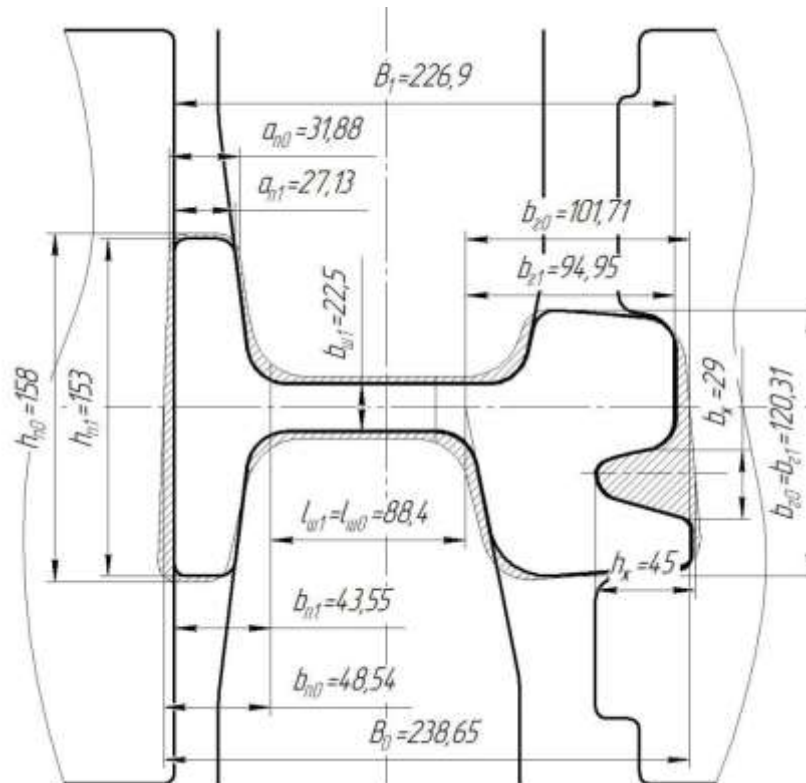


Рисунок 4.14 – Предлагаемый вариант обжатия в калибре UR-1 в уравновешенном четырехвалковом калибре

По предлагаемой технологии проведено компьютерное моделирование в программном комплексе Deform-3D с оценкой действующих сил прокатки от обжатия вертикальными валками. Полученные результаты исследований приведены на рисунке 4.15.

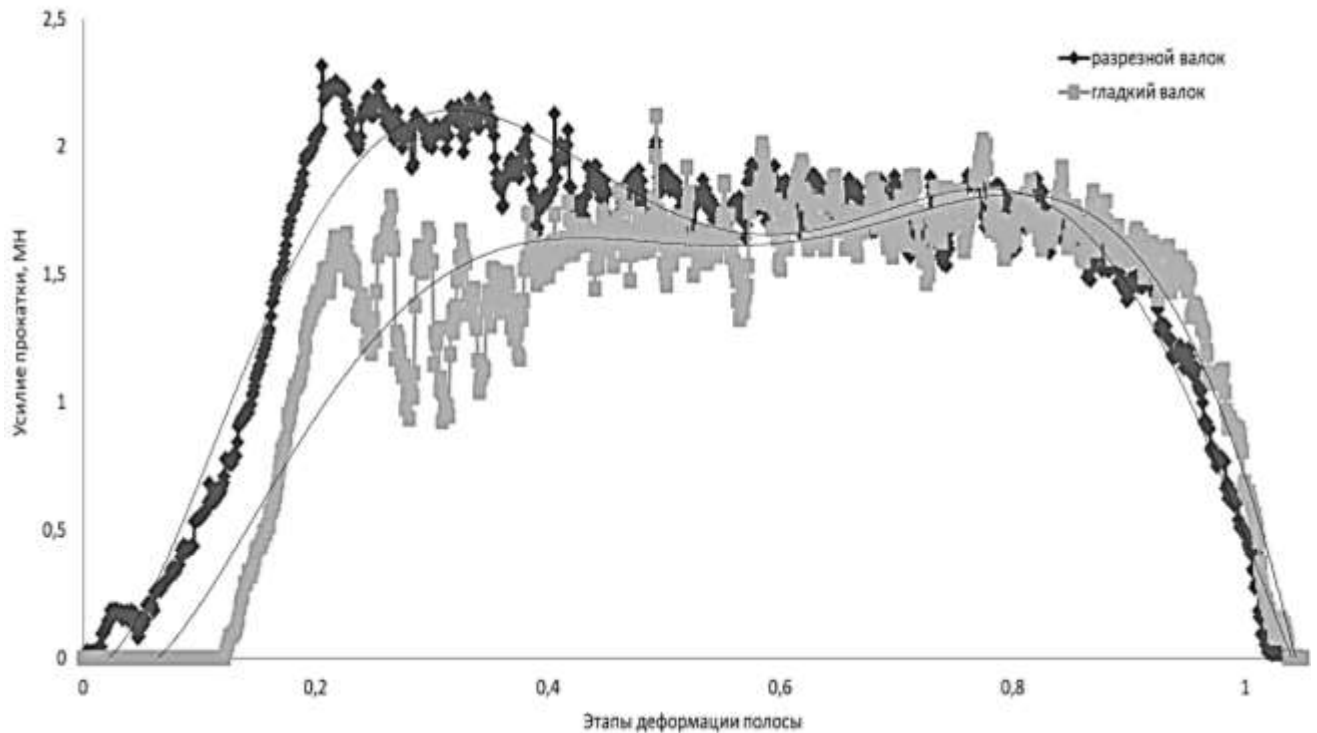


Рисунок 4.15 – График сил прокатки на вертикальных валках, полученный в Deform-3D при деформации полосы в калибре UR-1

По итогам проведенного компьютерного моделирования проведены промышленные эксперименты на стане с группой тандем по прокатке трамвайных рельсов с предлагаемыми режимами обжатий по элементам профиля в чистовой группе клетей. По разработанной новой технологии прокатки трамвайных рельсов с эффективным распределением сил прокатки в горизонтальной плоскости в четырехвалковых калибрах, по результатам прокатки на рельсобалочном стане с группой тандем ЕВРАЗ ЗСМК получены графики действующих сил прокатки от обжатия вертикальными валками. Получены графики действительных сил прокатки в первом проходе в клети UR (рисунок 4.16).

Как видно из рисунка 4.16, при входе раската в калибр, первой начинается деформация по головке со стороны разрезного валка с большой интенсивностью. При установившемся процессе прокатки и при выходе раската из калибра, значения сил прокатки практически равны. Различие в средних значениях сил прокатки от вертикальных валков составляет 13%, что обусловлено динамическими процессами входа раската в калибр. Распределение сил прокатки в предлагаемом четырехвалковом калибре, в сравнении с проектной технологией, показано в таблице 4.4.

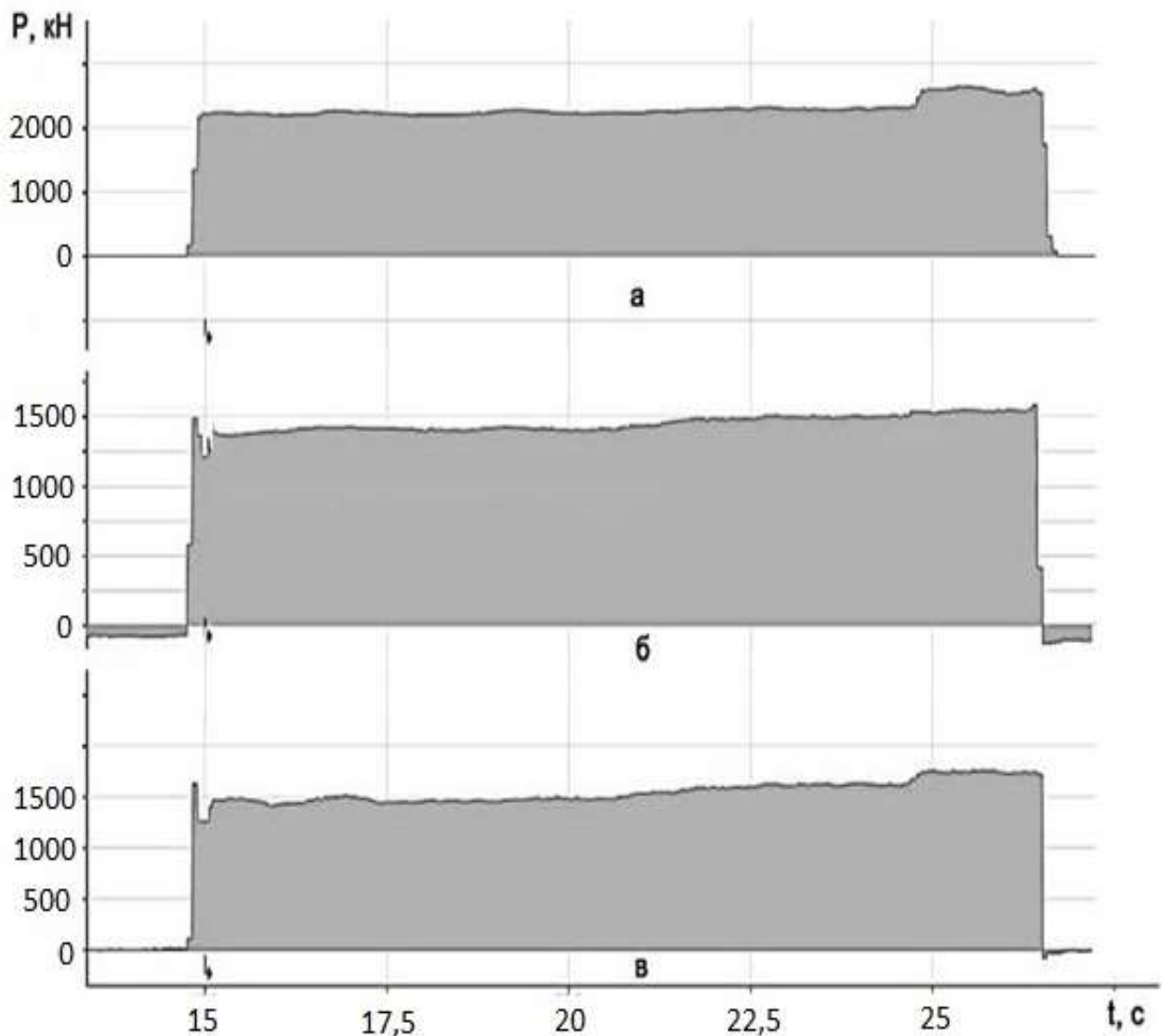


Рисунок 4.16 – Диаграмма фактических сил, действующих при прокатке трамвайных рельсов в калибре UR-1: а – горизонтальные валки; б – вертикальный ролик подошвы; в – вертикальный разрезной ролик головки; t – время прокатки

Произведен анализ вытяжек по головке и подошве профиля по проектной и предлагаемой технологии. По проектной технологии в калибре UR-1 вытяжка по головке составляет $\lambda_{гс} = 10513,7/8519,54 = 1,23$, по подошве $\lambda_{пс} = 5040,84/4442,45 = 1,13$. Коэффициент вытяжки по головке на 8,13% больше, чем по подошве. В разработанной технологии коэффициенты вытяжки распределяются следующим образом: по головке $\lambda_{гн} = 1,23$, по подошве $\lambda_{пн} = 5841,9/4836,5 = 1,21$. Таким образом, разность вытяжек по головке и подошве профиля уменьшилась до 1,6%.

Таблица 4.4 – Расчетные и фактические значения сил прокатки

Валки Различие сил	Сила прокатки по проектной технологии, МН		Сила прокатки по предлагаемой технологии, МН		Различие значений сил прокатки, полученных расчетным путем от фактических значений, %
	расчетные	фактические	расчетные	фактические	
горизонтальные валки	2,4	2,3	2,4	2,3	4,17
вертикальный валок со стороны головки	1,5	1,65	1,5	1,5	0
вертикальный валок со стороны подошвы	1,1	1,15	1,3	1,35	3,8
отклонение усилий на вертикальных валках, %	27	30	13	10	–

По соотношению полученных результатов выявлено, что погрешности в расчетах моделирования от фактических данных не превышают 10%, что говорит о высокой сходимости результатов. В промышленных экспериментальных данных при входе раската наблюдается пик максимальных значений по силам прокатки.

По итогам проведенных компьютерных исследований (рисунок 4.15) и промышленных экспериментов получены математические зависимости по нахождению усилий прокатки по предложенной технологии (Н):

– сила прокатки от обжатия вертикальным валком со стороны головки профиля:

$$P_z = 260\,540\,027,95x^6 - 878\,627\,626,26x^5 + 1\,091\,822\,702,89x^4 - 603\,478\,163,95x^3 + 130\,996\,205,47x^2 - 739\,696,47x - 38\,272,31; R^2 = 0,95.$$

– сила прокатки от обжатия вертикальным валком со стороны подошвы профиля:

$$P_n = 109\,215\,121,27x^6 - 425\,314\,258,13x^5 + 601\,442\,208,05x^4 - 383\,897\,603,63x^3 + 104\,034\,429,32x^2 - 4\,742\,079,29x - 30\,513,19; R^2 = 0,92,$$

где x – этап деформации в соответствии с рисунком 4.15.

Использование предлагаемого способа прокатки рельсов обеспечивает, по сравнению с существующими, следующие преимущества:

- стабильная геометрия профиля по длине раската за счет отсутствия сдвигающих осевых сил при прокатке;
- увеличение стойкости калибра из-за отсутствия выработки поверхности соприкосновения горизонтальных валков и подшипников;
- повышение производительности прокатного стана в связи с уменьшением количества перевалок клетей, связанных с выработками калибров из-за осевых сил на горизонтальные валки.

Данный подход позволяет повысить ресурсосбережение технологии при прокатке асимметричных рельсовых профилей, а новая технология производства трамвайных рельсов с равенством сил прокатки в горизонтальной плоскости, за счет использования резерва по ресурсу пластичности металла, обеспечивает

эффективное распределение действующих сил в горизонтальной плоскости четырехвалкового калибра.

По итогам проведенных компьютерных моделирований и промышленных исследований по распределению сил прокатки в четырехвалковом калибре установлено:

- при разработке технологий прокатки профилей сложной формы, таких как трамвайные рельсы, необходимо учитывать смещаемые объемы металла по элементам профиля;

- при разрезке головки профиля и образовании желоба наблюдается течение металла на уширение, в зону отставания и на вытяжку, которое не подчиняется законам плоских сечений;

- проведенная оценка моделирования методом конечных элементов относительно промышленных результатов показала высокую сходимость данных, что является подтверждением адекватности моделирования. Моделирование методом конечных элементов возможно использовать в дальнейшем для изучения процесса прокатки, а полученные результаты будут являться основанием для выдачи рекомендаций по повышению эффективности промышленных технологий;

- углубленное изучение деформаций металла в четырехвалковых калибрах с эффективным использованием энергосиловых параметров прокатки, с целью увеличения производительности стана и повышения качества выпускаемой продукции за счет эффективного использования резервных сил привода прокатных клетей, является перспективным направлением;

- несмотря на значительную неравномерность деформации, металл обладает значительным ресурсом пластичности, поэтому с целью эффективного распределения сил прокатки, с использованием возможности по увеличению обжатий по элементам профиля без образования дефектов и нарушения сплошности металла, предложена ресурсосберегающая технология прокатки трамвайных рельсов [349, 350].

Предложенная новая ресурсосберегающая технология прокатки асимметричных рельсовых профилей в четырехвалковых разрезных калибрах с эффективным использованием мощности привода клетей основана на равенстве сил прокатки в горизонтальной плоскости от вертикальных валков. Полученные значения сил прокатки по предложенной калибровке удовлетворяют условию $P_n \approx P_r$ [349, 350].

Разработана новая конструкция кассеты (подушки) с вертикальным разрезным валком для четырехвалкового калибра универсальной клетки для прокатки трамвайных рельсов. На разработанную конструкцию вертикального валка получен патент на изобретение [131]. На рисунке 4.17 представлены вертикальные разрезные валки в сборе для четырехвалковых калибров клетей UR и UF непрерывной чистовой группы клетей для прокатки трамвайных рельсов.



а



б

Рисунок 4.17 – Вертикальный валок в сборе для четырехвалкового калибра, применяемого в универсальных клетях стана с группой тандем ЕВРАЗ ЗСМК при прокатке трамвайных рельсов: а – клеть UR; б – клеть UF

4.1.2 Скоростные режимы и крутящие моменты при прокатке в группе тандем

Приведены теоретические и экспериментальные результаты по анализу крутящих моментов, возникающих при прокатке трамвайных рельсов в чистовой непрерывно-реверсивной группе клетей (группа тандем).

В связи с тем что трамвайные рельсы ранее катались на прокатном стане дуо, в состав которого входили клетки трио с 1945 года, а скоростные режимы прокатного стана с группой тандем, построенного в 2013 году, кардинально отличаются от предыдущего, требуется разработка новых скоростных режимов, которые будут являться эффективными с точки зрения загрузки двигателей прокатного стана. Диаграммы скоростей на прокатном стане дуо, в состав которого входили клетки трио, имели классический вид (подробно рассмотрены в работах [316, 317]). Можно отметить, что в данных скоростных диаграммах захват раската осуществлялся на участке разгона, при этом происходили пробуксовки, а на поверхности рельса образовывались плены.

Прокатные клетки SMS Meer оснащены устройством гидравлической установки горизонтальных и вертикальных валков. Гидравлическую установку выполняют гидроцилиндры, установленные на поперечинах станины и напрямую действующие на подушки валков. Каждый гидроцилиндр оснащен линейными энкодерами и регулируется парой сервоклапанов. Системы гидравлической установки позволяют выполнять следующие функции: установку предусмотренной нагрузки очага деформации; предохранение валков и станины от перегрузок; коррекцию настроек под нагрузкой; определение позиционирования валков в клетях после каждой перевалки; измерение силы прокатки путем оценки давления в цилиндрах, выполняющих установку. Со стороны штока каждого гидравлического цилиндра находится измерительный преобразователь давления, предназначенный для определения параметра давления или актуального расчета силы прокатки. Таким образом, прокатные клетки постоянно оснащены системой контроля, позволяющей оценивать в

реальном времени силу прокатки на горизонтальных и вертикальных валках прокатного стана с группой тандем.

Прокатные клетки рельсобалочного стана с группой тандем ЕВРАЗ ЗСМК оснащены контрольно-измерительной системой, которая позволяет отслеживать в реальном времени не только силу прокатки, но и крутящие моменты на валу главных двигателей. Таким образом, прокатные клетки оснащены постоянной системой контроля сил и моментов прокатки. Полученные результаты натурных исследований, проводимых на действующем промышленном прокатном стане с группой тандем, обрабатывали с помощью системы измерительной техники и автоматизации *ibaAnaliser* [351].

На этапе рассмотрения возможности промышленного применения разработанных скоростных режимов прокатки, согласно расчетной калибровке, производился расчет моментов прокатки. Полученные результаты были соотнесены с допустимыми по технической характеристике главных приводов клеток прокатного стана с группой тандем, поэтому расчетные нагрузочные диаграммы необходимы для подтверждения адекватности теоретических расчетов и промышленных экспериментов.

Как известно, « $M_{дин}$ - динамический момент на валу двигателя, необходимый для преодоления инерционных усилий, возникающих при неравномерном вращении валков» [172]. Автором диссертации предлагается способ прокатки, в котором захват металла валками осуществляется при постоянной частоте вращения горизонтальных валков во всех клетях группы тандем. Это позволяет исключить динамический момент стана $M_{дин}$ при захвате металла валками.

Как отмечено ранее, динамическая составляющая определяется силами инерции при разгоне и торможении вращающихся частей стана без металла ($M_{дин. стана}$), силами инерции при разгоне или торможении вертикальных валков ($M_{дин. верт}$) и силами инерции прокатываемой полосы ($M_{дин. полосы}$). Исходя из этого, в диссертации, с целью более плавной загрузки двигателя и уменьшения динамических ударов при захвате металла валками в период разгона прокатного

стана, выполнено исследование по захвату металла валками при постоянной частоте вращения валков. Исходя из вышеизложенного, становится очевиден факт того, что при захвате металла при постоянной частоте вращения валков исключается $M_{\text{дин. стана}}$. В связи с тем что масса вертикальных валков и масса раската в сумме составляют менее 3% от массы вращающихся частей прокатного стана ($M_{\text{дин. стана}}$), приращение динамического момента от вертикальных валков ($M_{\text{дин. верт}}$) и динамического момента полосы ($M_{\text{дин. полосы}}$) незначительно.

Построены теоретические нагрузочные диаграммы, исходя из проведенных расчетов момента прокатки по общепринятым формулам из работы [172]. Расчет момента прокатки производили по величине сил прокатки, действующих на валки.

На рисунке 4.18 а приведена новая разработанная диаграмма скоростного режима прокатки, а на рисунке 4.19 б теоретическая диаграмма моментов для первого прохода по предложенным скоростным режимам прокатки в клети UR. Буквами а – з обозначены различные участки диаграммы скоростей, а цифрами от 1 до 9 различные участки диаграммы моментов.

При подходе металла к непрерывной группе клетей автоматически запускается главный двигатель универсальной клети UR. Между каждым двигателем чистовой группы клетей тандем установлена шестеренная клеть, которая имеет передаточное число равно $i = 5,3$. Разгон главного двигателя клети UR на участке «а-б» происходит от 0 до 152 об/мин, после чего клеть UR автоматически переводится на вращение валков с постоянной частотой (участок б-в). Захват металла (точка «А») производится на постоянной частоте вращения валков, при этом частота вращения вала главного двигателя составляет 152 об/мин. Далее в течение некоторого времени раскат прокатывается с постоянной скоростью (участок А-в). На участке «в-г» происходит дальнейший разгон вертикальных и горизонтальных валков с металлом до максимальной частоты вращения вала двигателя 297,55 об/мин. Далее производится прокатка раската с постоянной частотой вращения валков (участок г-д). В точке «Б» происходит выход раската

из валков, и на участке «Б-д» валки вращаются без металла с постоянной частотой. Торможение двигателя без металла производится на двух ступенях. Первая ступень на участке «д-е», далее вращение валков с постоянной частотой (участок е-ж). Вторая ступень торможения на участке «ж-з».

Соответствующая диаграмма моментов приведена на рисунке 4.19 б. В нагрузочной диаграмме приведены данные по загрузке двигателя прокатного стана в процентах от номинального момента двигателя. Графическое изображение нагрузочной диаграммы, в зависимости от диаграммы скоростей, аналогично предложенному графическому изображению диаграмм в работе Целикова А.И., Никитина Г.С., Рокотяна С.Е. [172].

Анализируя диаграмму моментов, можно отметить, что нагрузка на двигатель прокатного стана неравномерна.

На участке 1 происходит разгон валков прокатного стана без металла и момент двигателя равен $M_{\partial в} = M_{дин1} = \frac{G_1 D^2}{375} \varepsilon_{p1}$,

где $G_1 D^2$ – приведенный маховый момент главной линии прокатного стана без учета массы раската;

ε_{p1} – ускорение двигателя при разгоне валков без металла, об/мин·с.

На участке 2 валки вращаются с постоянной частотой без металла. Тогда $M_{\partial в} = M_{хол}$.

В начале участка 3 при постоянной частоте вращения валков, в точке А диаграммы скоростей, происходит захват металла валками, и раскат прокатывается с постоянной скоростью, при этом $M_{\partial в} = M_{см}$. Таким образом, при захвате металла валками динамический момент отсутствует, что уменьшает возможность динамических ударов.

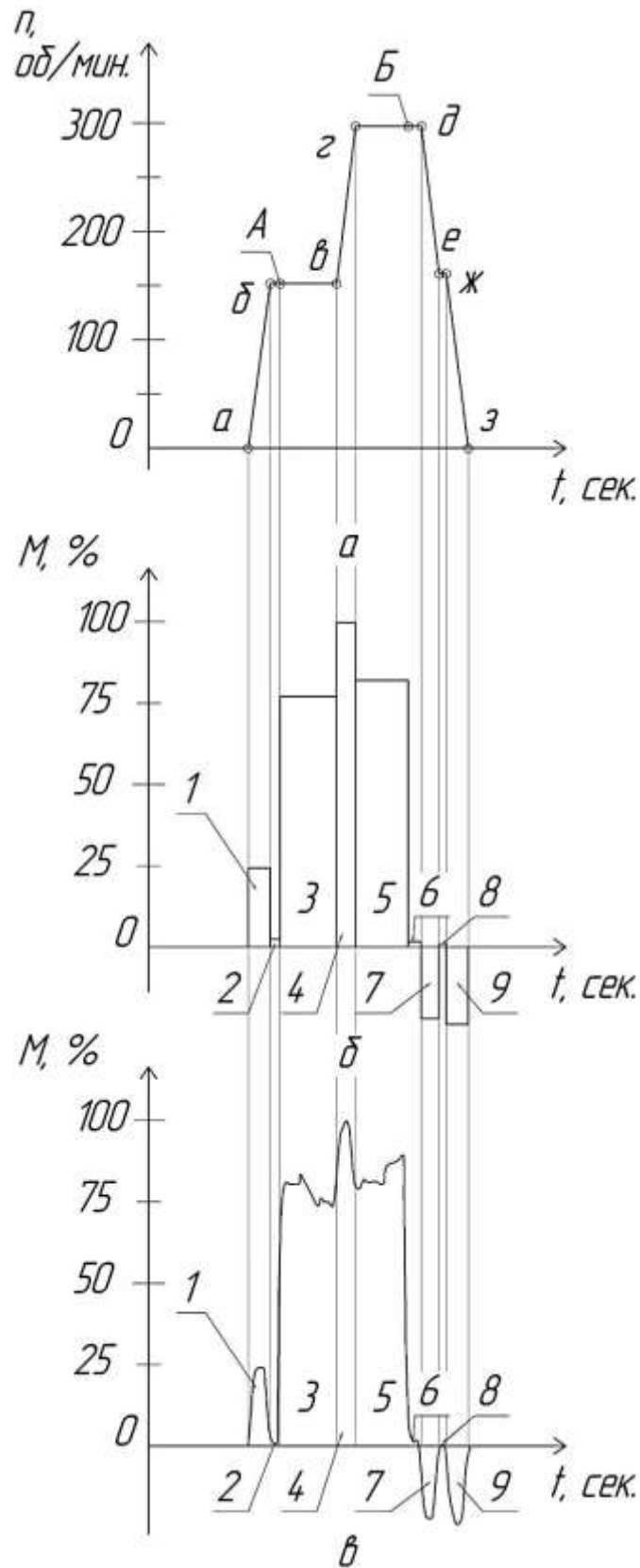


Рисунок 4.19 – Диаграмма скоростных режимов и моментов для первого прохода в клетки UR: а – диаграмма скоростных режимов; б – теоретическая диаграмма моментов; в – фактическая диаграмма моментов

При разгоне валков с раскатом на участке 4 к статическому моменту добавляется динамический момент и $M_{дин} = M_{ст} + \frac{GD^2}{375} \varepsilon_p$,

где GD^2 – приведенный маховый момент вращающихся частей стана с учетом массы раската,

ε_p – ускорение двигателя при разгоне валков с металлом, об/мин·сек.

Прокатка металла с постоянной скоростью происходит на участке 5. В этом случае $M_{дв} = M_{ст}$.

После выхода раската из валков, валки вращаются на участке 6 с постоянной частотой без металла и $M_{дв} = M_{хол}$.

Торможение двигателя прокатного стана осуществляется за две ступени, между которыми есть участок вращения валков с постоянной частотой. При торможении вращающихся частей главной линии прокатного стана без раската, динамический момент торможения становится отрицательным (участок 7 и 9) и

$$M_{дв} = M_{дин.т} = - \frac{G_1 D^2}{375} \varepsilon_{т1},$$

где $\varepsilon_{т1}$ – замедление двигателя при торможении валков без металла, об/мин·сек.

Вращение валков с постоянной частотой между двумя ступенями торможения показано на участке 8, при этом $M_{дв} = M_{хол}$.

В таблице 4.5 приведены усредненные данные по крутящим моментам, в процентах к номинальному, и ускорения двигателя при первом проходе в клетки UR.

При анализе результатов таблицы 4.5 можно отметить, что динамический момент разгона (участок 1) вращающихся деталей главной линии прокатного стана равен динамическому моменту торможения (участок 7 и 9), т.е. $M_{дин1} \approx M_{дин.т}$. Величина момента холостого хода на этапах разгона (участок 2) и торможения (участок 6) валков прокатного стана может отличаться в 1,5 раза. С увеличением частоты вращения вала двигателя от 152 об/мин до 297,55 об/мин (участок 3 и 5) величина статического момента возрастает на 6,5%.

Таблица 4.5 – Экспериментальные моменты прокатки в клети UR, в процентах к номинальному моменту двигателя, первый проход

Величины	Номер участка								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Моменты	$M_{дин1}$	$M_{хол}$	$M_{ст}$	$M_{ст} + M_{дин}$	$M_{ст}$	$M_{хол}$	$M_{дин.т}$	$M_{хол}$	$M_{дин.т}$
Момент, %	24,25	2,38	77	99,79	82	1,65	-22,09	1,03	-23,69
Ускорение, об/мин·с	74,15	0	0	83,17	0	0	-82,46	0	-78,78

В первом проходе двухвалковая клеть ER совместно с клетью UR составляют непрерывную группу клеток, поэтому график скоростей у клети ER аналогичен графику скоростей клети UR. Моменты прокатки в этой клети приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Экспериментальные моменты прокатки в клети ER, в процентах к номинальному моменту двигателя, первый проход

Величины	Номер участка								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Моменты	$M_{дин1}$	$M_{хол}$	$M_{ст}$	$M_{ст} + M_{дин}$	$M_{ст}$	$M_{хол}$	$M_{дин.т}$	$M_{хол}$	$M_{дин.т}$
Момент, %	4,17	0,48	16,68	24,88	18,41	0,35	-4,29	0,35	-4,15
Ускорение, об/мин·с	85,5	0	0	94,22	0	0	-95,23	0	-88,54

На рисунке 4.19 введена экспериментальная диаграмма моментов для первого прохода клети UR. Можно отметить, что в целом экспериментальные данные соответствуют теоретическим положениям. Некоторые отличия связаны с перепадом температуры по длине раската и особенностями технологии прокатки.

Во втором реверсивном проходе раскат прокатывают в двух клетях ER и UR, валки третьей клетки UF разведены для свободного прохода раската.

На рисунке 4.20 а приведена диаграмма скоростного режима прокатки в клетях UR для второго прохода и теоретическая нагрузочная диаграмма на рисунке 4.20 б. При подходе металла к непрерывной группе клетей автоматически запускается главный двигатель клетки UR. Разгон вала двигателя клетки UR на участке «а-б» происходит от 0 до 132,82 об/мин, после чего клетка UR автоматически переводится на вращение валков с постоянной частотой (участок «б-в»). Захват металла, точка «А», производится при постоянной частоте вращения вала двигателя при 132,82 об/мин. Далее, на участке «А-в», происходит прокатка с постоянной скоростью. На участке «в-г» происходит дальнейший разгон вертикальных и горизонтальных валков с металлом до максимальной частоты вращения вала двигателя 309,92 об/мин. Далее производится прокатка раската с постоянной частотой вращения валков (участок «г-д»). В связи с большой длиной рельсов перед выходом производится торможение валков прокатного стана вместе с раскатом. В точке «Б» происходит выход раската из валков. На участке «д-е» происходит первая ступень торможения валков, далее, на участке «е-ж», валки вращаются без металла с постоянной частотой. Дополнительное торможения двигателя без металла производится на участке «ж-з». Соответствующая нагрузочная диаграмма (диаграмма моментов) приведена на рисунке 4.20 б.

В таблице 4.7 приведены усредненные данные по крутящим моментам и ускорениям двигателя при втором проходе в клетях UR. Во втором проходе, как и в первом, захват металла валками производится при постоянной частоте вращения валков, т.е. динамический момент при захвате отсутствует.

На рисунке 4.20 в приведена экспериментальная диаграмма моментов для второго прохода клетки UR.

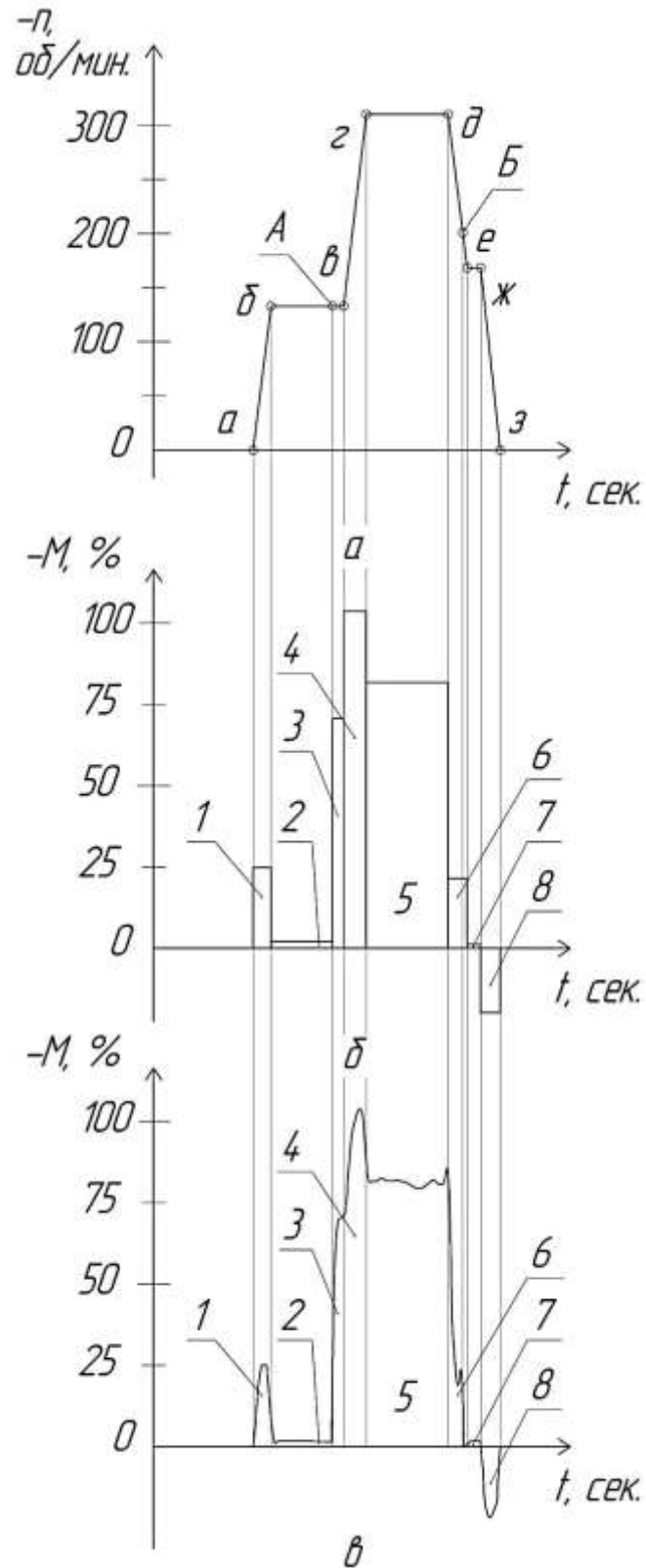


Рисунок 4.20 – Диаграмма скоростных режимов и моментов для второго прохода клетки UR: а – диаграмма скоростных режимов; б – теоретическая диаграмма моментов; в – фактическая диаграмма моментов; знак « \leftrightarrow » означает реверс двигателя

Таблица 4.7 – Экспериментальные моменты прокатки в клети UR, в процентах к номинальному моменту двигателя, второй проход

Величины	Номер участка							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Моменты	$M_{дин1}$	$M_{хол}$	$M_{ст}$	$M_{ст} + M_{дин}$	$M_{ст}$	$M_{дин.т}$	$M_{хол}$	$M_{дин.т}$
Момент, %	-24,9	-2,13	-70,7	-103,81	-81,78	-21,5	-1,2	19,81
Ускорение, об/мин·с	80,5	0	0	84,33	0	-81,3	0	-77,8

Двухвалковая клеть ER совместно с клетью UR составляют непрерывную группу клетей, поэтому график скоростей у клети ER аналогичен графику скоростей клети UR. Моменты прокатки в этой клети приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Экспериментальные моменты прокатки в клети ER, в процентах к номинальному моменту двигателя, второй проход

Величины	Номер участка							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Моменты	$M_{дин1}$	$M_{хол}$	$M_{ст}$	$M_{ст} + M_{дин}$	$M_{ст}$	$M_{дин.т}$	$M_{хол}$	$M_{дин.т}$
Момент, %	-4,05	-0,41	-6,98	-10,89	3,98	3,11	-0,41	3,8
Ускорение, об/мин·с	69,68	0	0	74	0	-70,01	0	-80,06

Экспериментальная нагрузочная диаграмма (диаграмма моментов) для второго прохода клети ER, на участке 5 нагрузочной диаграммы статический момент $M_{ст}$ получился отрицательным. Это объясняется значительным натяжением, т.е. универсальная клеть UR протягивает раскат через валки вспомогательной клети ER. Так как деформация в клети ER незначительна (контроль высоты подошвы и головки профиля), то мощность сил натяжения превосходит мощность, необходимую на осуществление деформации, даже при небольшом

рассогласовании скоростей прокатки между клетями ER и UR. Можно отметить, что в целом экспериментальные данные соответствуют теоретическим положениям. Некоторые отличия связаны с перепадом температуры по длине раската и некоторыми особенностями технологии прокатки.

В третьем проходе раскат прокатывают в трех клетях UR, ER и UF. На рисунке 4.21 а приведена диаграмма скоростного режима прокатки в клетях UR для третьего прохода. При подходе металла к непрерывной группе клетей автоматически запускается главный двигатель клетей UR, ER и UF. Разгон валков клетки UR на участке «а-б» происходит при вращении вала двигателя от 0 до 183,44 об/мин, клетки ER от 0 до 204,02 об/мин, клетки UF от 0 до 216,77 об/мин, после чего все три клетки автоматически переводятся на вращение валков с постоянной частотой (участок «б-в»). Захват металла (точка «А») производится при постоянной частоте вращения валков при этом динамический момент стана будет отсутствовать. Далее производится прокатка раската с постоянной частотой вращения валков (участок «А-Б»). В точке «Б» происходит выход раската из валков, и на участке «Б-в» валки вращаются без металла с постоянной частотой. Торможение двигателя без металла производится на участке «в-г».

Соответствующая нагрузочная диаграмма (диаграмма моментов) для третьего прохода клетки UR приведена в нижней части рисунка 4.21 б.

В таблице 4.9 приведены усредненные данные по крутящим моментам, в процентах к номинальному моменту двигателя, при третьем проходе в клетях UR, ER и UF.

На рисунке 4.21 в приведена экспериментальная (фактическая) диаграмма моментов для третьего прохода клетки UR. Можно отметить, что согласно экспериментальным данным, ввиду неравномерности температуры по длине раската, крутящий момент несколько увеличивается по ходу прокатки.

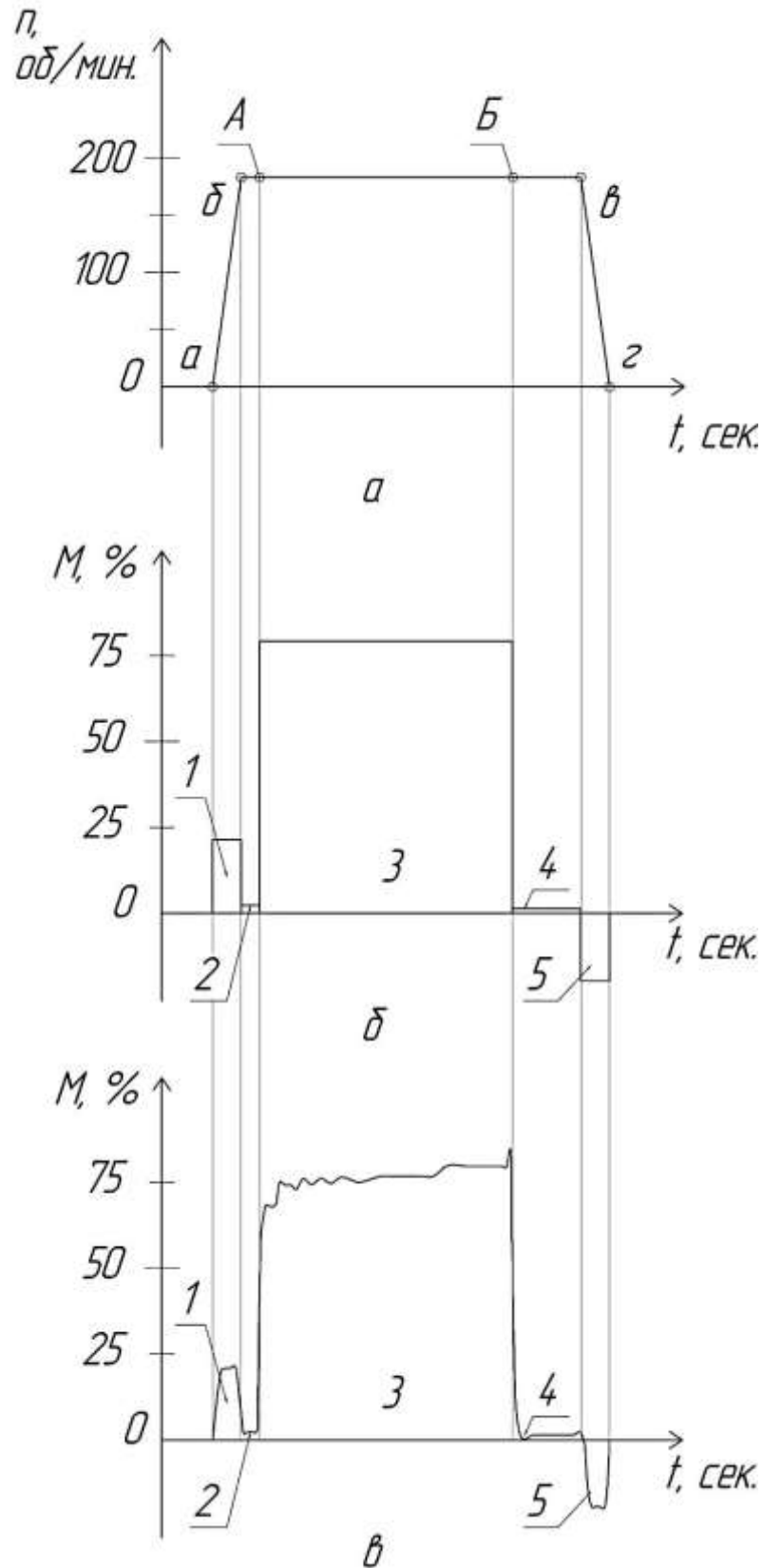


Рисунок 4.21 – Диаграмма скоростных режимов и моментов для третьего прохода клетки UR: а – диаграмма скоростных режимов; б – теоретическая диаграмма моментов; в – фактическая диаграмма моментов

Таблица 4.9 – Экспериментальные моменты прокатки в клетях UR, ER и UF, в процентах к номинальному моменту двигателя, третий проход

Величины	Номер участка				
	1	2	3	4	5
Моменты, %	$M_{дин1}$	$M_{хол}$	$M_{ст}$	$M_{хол}$	$M_{дин.т}$
Клеть UR	21,4	2,25	79,29	1,3	-19,65
Клеть ER	3,9	0,42	11,5	0,31	-4,3
Клеть UF	25,1	1,23	63	1,1	-21,8

По предложенной технологии прокатки захват металла валками осуществляется на постоянной частоте вращения валков, при этом полоса движется с линейной скоростью равной линейной окружной скорости вращения прокатных валков. При выполнении данного условия динамический момент вращающихся частей прокатного стана ($M_{дин. стана}$) отсутствует, что улучшает условия захвата раската валками: захват происходит при постоянной частоте вращения валков без пробуксовок. Это позволяет обеспечить отсутствие динамических ударов при захвате, а также повышает надежность оборудования главной линии прокатного стана. Данную рекомендацию можно использовать при разработке технологий прокатки сложных фланцевых профилей в непрерывной группе клетей.

При первом и втором проходе реализуется двухступенчатое торможение в связи с техническими особенностями оборудования и работой системы автоматизации по синхронизации вращения прокатных валков во всех клетях и роликов рольганга перед реверсивным проходом с целью минимизации цикла прокатки в непрерывной группе клетей.

Значения частоты вращения валков во всех проходах для участка «б-А» диаграммы скоростного режима, на котором происходит захват раската, выбраны экспериментально с учетом крутящих моментов, исходя из условия обеспечения стабильного захвата раската без пробуксовок (первый проход частота вращения вала двигателя 152 об/мин, второй проход 132,82 об/мин, третий проход

183,44 об/мин). Значения частоты вращения валков при прокатке с постоянной повышенной скоростью на второй ступени для первого и второго прохода (первый проход частота вращения вала двигателя 297,55 об/мин, второй проход 309,92 об/мин) выбраны, исходя из условия максимально допустимых значений по крутящим моментам на валу двигателя при разгоне валков с раскатом на участке «в-г» (первый проход в клети UR – крутящий момент $M = 99,79\%$, второй проход в клети UR крутящий момент $M = 103,81\%$).

По разработанной ресурсосберегающей технологии прокатки в первом проходе в клети UR крутящий момент составляет $M = 99,79\%$ от номинального момента двигателя, во втором проходе в клети UR крутящий момент $M = 103,81\%$, для клети UR крутящий момент в третьем проходе составляет $M = 79,29\%$. Таким образом, технические характеристики прокатного стана использованы в полном объеме.

По результатам проведенных исследований произведены промышленные прокатки трамвайных рельсов (рисунок 4.22), все рельсы признаны годными и соответствующими требованиям, предъявляемым к трамвайным рельсам по ГОСТ.



Рисунок 4.22 – Трамвайные рельсы, прокатанные по разработанной технологии

В соответствии с разработанными режимами обжаты и действующими силами прокатки получены диаграммы моментов, возникающие при прокатке трамвайных рельсов по разработанным скоростным режимам. В нагрузочной диаграмме приведены данные по загрузке двигателя прокатного стана в процентах от номинального момента (рисунок 4.23).

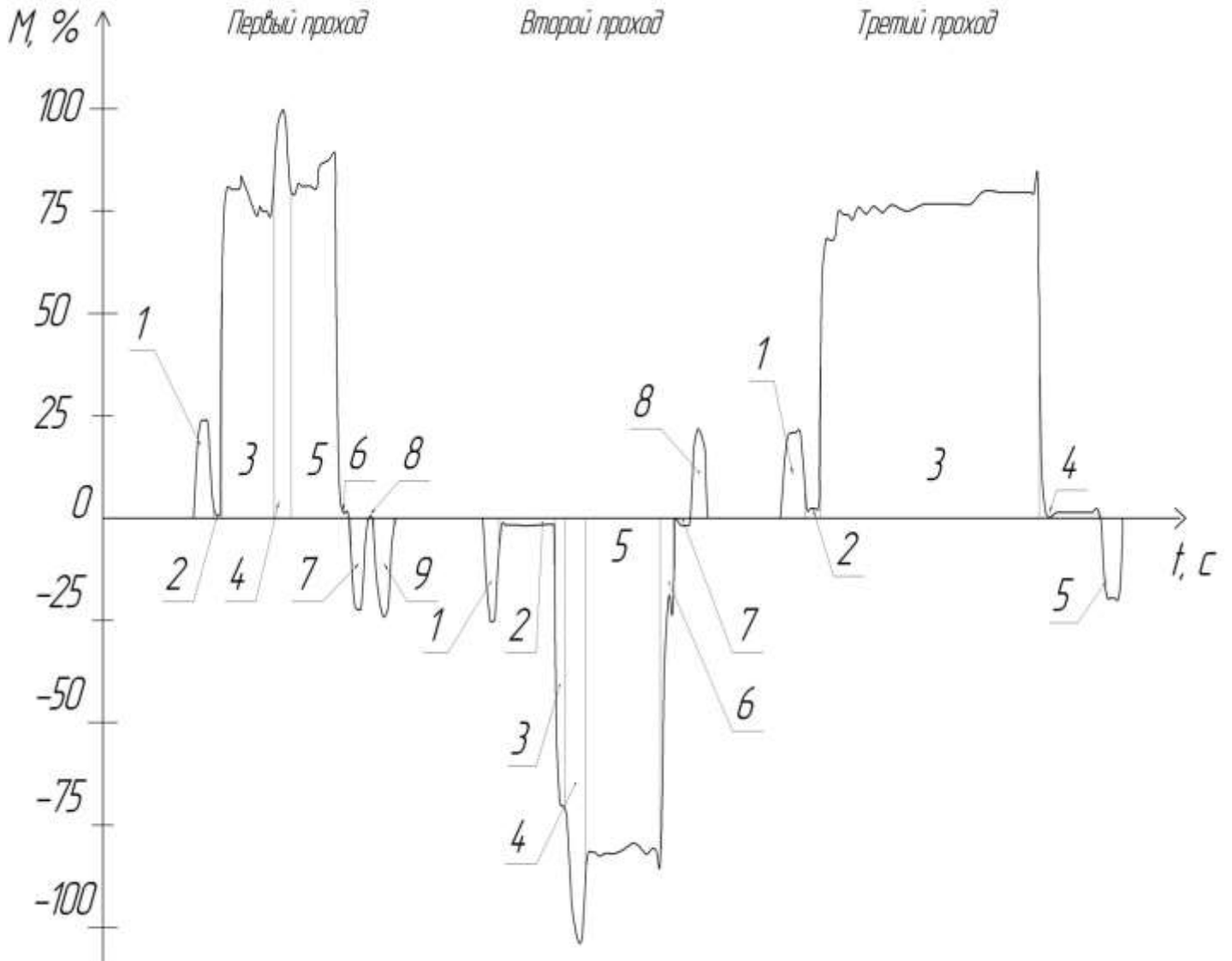
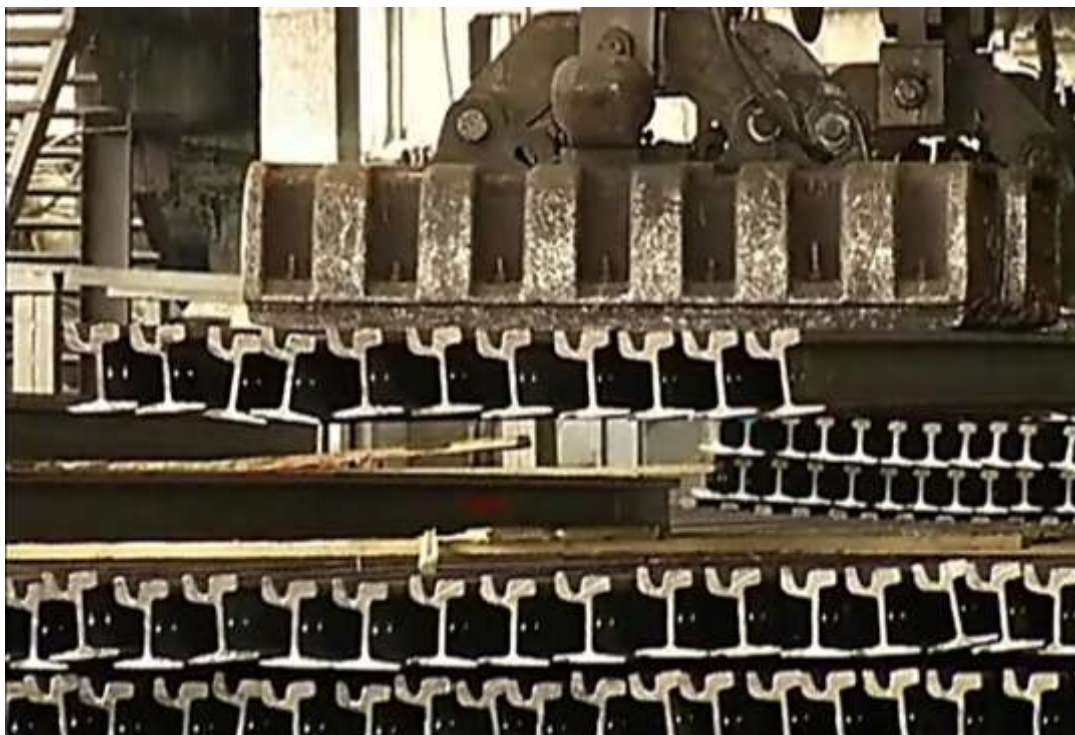


Рисунок 4.23 – Диаграмма моментов (фактическая)
в группе тандем

По результатам исследований, изложенных в диссертации разработана, освоена и внедрена в промышленное применение технология прокатки трамвайных рельсов на стане с группой тандем АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (рисунок 4.24).



а



б

Рисунок 4.24 – Трамвайные рельсы, прокатанные по разработанной технологии:

а – первая промышленная партия трамвайных рельсов
РТ62-Э76-Х-А-НТ-12,5-20-ГОСТ Р 55941–2014;

б – первая промышленная партия трамвайных рельсов
РТ58-Э76-Х-А-НТ-12,5-20-ГОСТ Р 55941–2014

Полученные теоретические результаты показали высокую сходимость с данными промышленных экспериментов, что говорит об адекватности проведенного исследования.

Разработана ресурсосберегающая технология прокатки, которая позволила:

- 1) сократить расход электроэнергии;
- 2) улучшить качество прокатанной продукции;
- 3) повысить производительность прокатного стана.

По расходу электроэнергии разработанная ресурсосберегающая технология прокатки трамвайных рельсов на стане с группой тандем, в сравнении с прокатными станами, в состав которых входили клетки трио, снижает расход на 55 кВт·ч/т, в сравнении с проектной калибровкой снижение составило 45 кВт·ч/т, что составляет 28% (таблица 4.10)

Таблица 4.10 – Показатели эффективности энерго- и ресурсосберегающей технологии прокатки трамвайных рельсах на стане с группой тандем

Наименование параметра	Проектная технология	Разработанная технология
Различие сил прокатки на вертикальных валках, %	30 – 35 (1650/1150)	10 (1500/1350)
Расход эл.энергии, кВт·ч/т (снижение кВт·ч/т / %)	158	113 (снижение на 45 кВтч/т, что составляет уменьшение на 28%)
Выход годного, %	74	97
Крутящий момент в % от номинального	125	100 (уменьшение на 20 – 25%)
Производительность, тн/час	62	68,2 (увеличение на 10%)
Стойкость прокатных валков, кг/тн	1,24	1,03 (экономия на 0,21 кг/т, что составляет повышение стойкости на 17%)
Увеличение межремонтного цикла оборудования, час	---	увеличился на 6,5 час. (увеличение межремонтного цикла на 23%)

Повысилось качество трамвайных рельсов:

- на прокатных станах, в состав которых входили клетки трио, с чистовой клетью дуо невозможно было прокатать трамвайные рельсы по ГОСТ, все трамвайные рельсы с 1945г. прокатывались по ТУ. Разработанная технология позволила обеспечить производство трамвайных рельсов в соответствии с требованиями ГОСТ;

- выход трамвайных рельсов первого сорта по проектной технологии на прокатном стане с группой тандем составлял 74%, при этом значительное количество рельсов имело в качестве дефекта осевую пористость, после внедрения разработанной ресурсосберегающей технологии трамвайных рельсов на стане с группой тандем выход первого сорта составил 97%.

Повысилась производительность прокатного стана:

- производительность прокатного стана, в состав которого входили клетки трио, составляла 50 т/час, на прокатном стане с группой тандем по проектной калибровке – 62 т/час, по разработанной ресурсосберегающей технологии прокатки трамвайных рельсов производительность прокатного стана с группой тандем составляет 68,2 т/час;

По итогам проведенных исследований разработана и внедрена в производство на рельсобалочном стане с группой тандем АО «ЕВРАЗ ЗСМК» новая энерго- и ресурсосберегающая технология прокатки трамвайных рельсов в соответствии с требованиями ГОСТ Р 55941–2014 «Рельсы трамвайные желобчатые».

4.2 Прокатка остряковых и усовиковых рельсов на стане с группой тандем АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Применяя основные положения и результаты исследований, полученные на трамвайных рельсах, разработана технология прокатки для более простых, с точки зрения геометрии профиля, асимметричных рельсов – остряковых рельсов ОР50, ОР65 и усовиковых рельсов УР65. Схема прокатки для производства остряковых и усовиковых рельсов на универсальном рельсобалочном стане с группой тандем представлена на рисунках 4.25, 4.26, 4.27.

Профиль острякового и усовикового рельса получают из непрерывнолитой заготовки сечением 300 x 365 мм за 15 проходов в 19 калибрах прокатного стана с группой тандем, которые распределяются по клетям следующим образом:

- в клетях BD-1 осуществляется 7 проходов;
- в клетях BD-2 осуществляется 5 проходов;
- в непрерывной реверсивной группе клеток тандем 3 прохода в 7 калибрах.

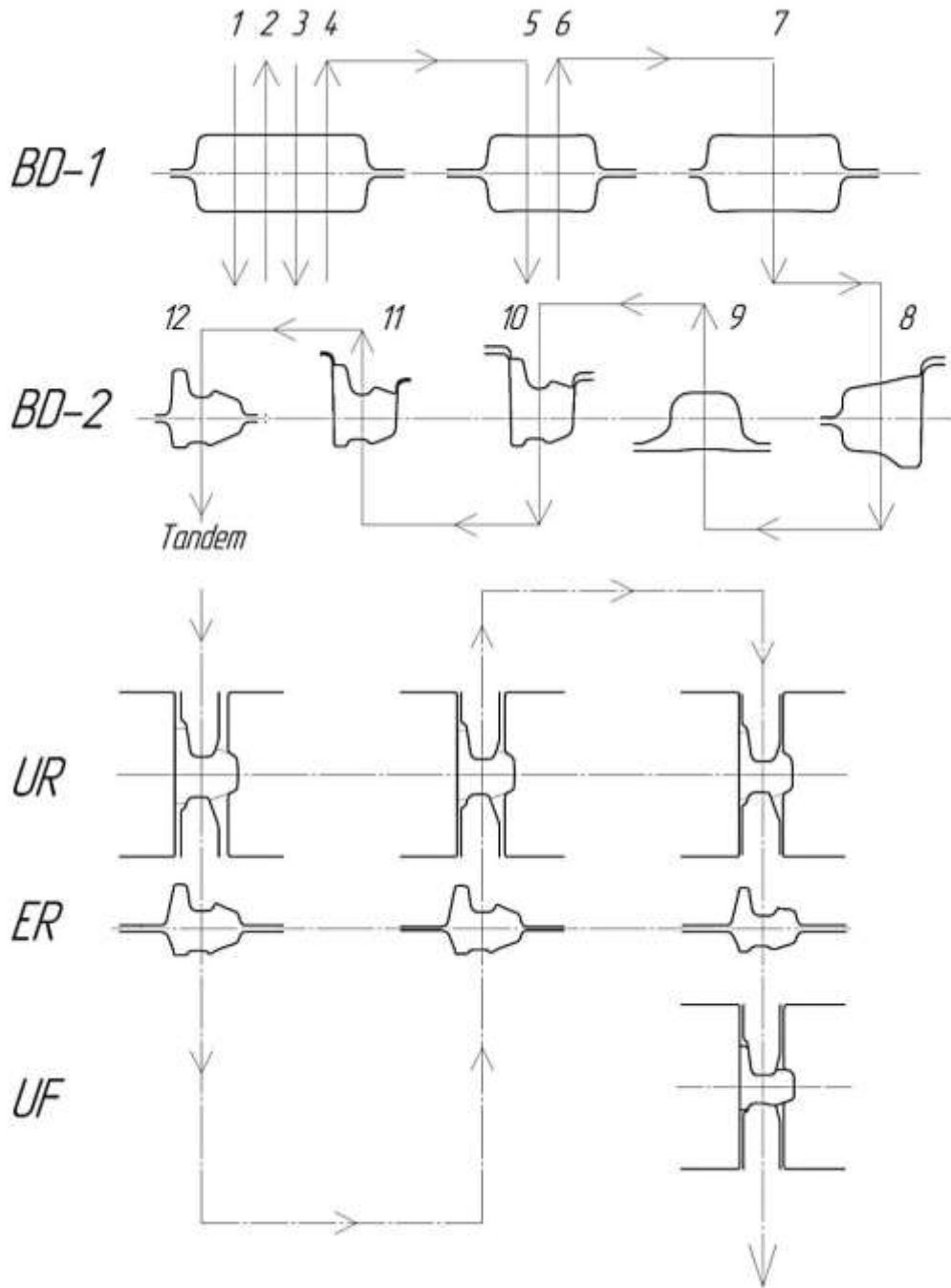


Рисунок 4.25 – Схема прокатки остряковых рельсов OP50 на стане с группой тандем по разработанной ресурсосберегающей технологии

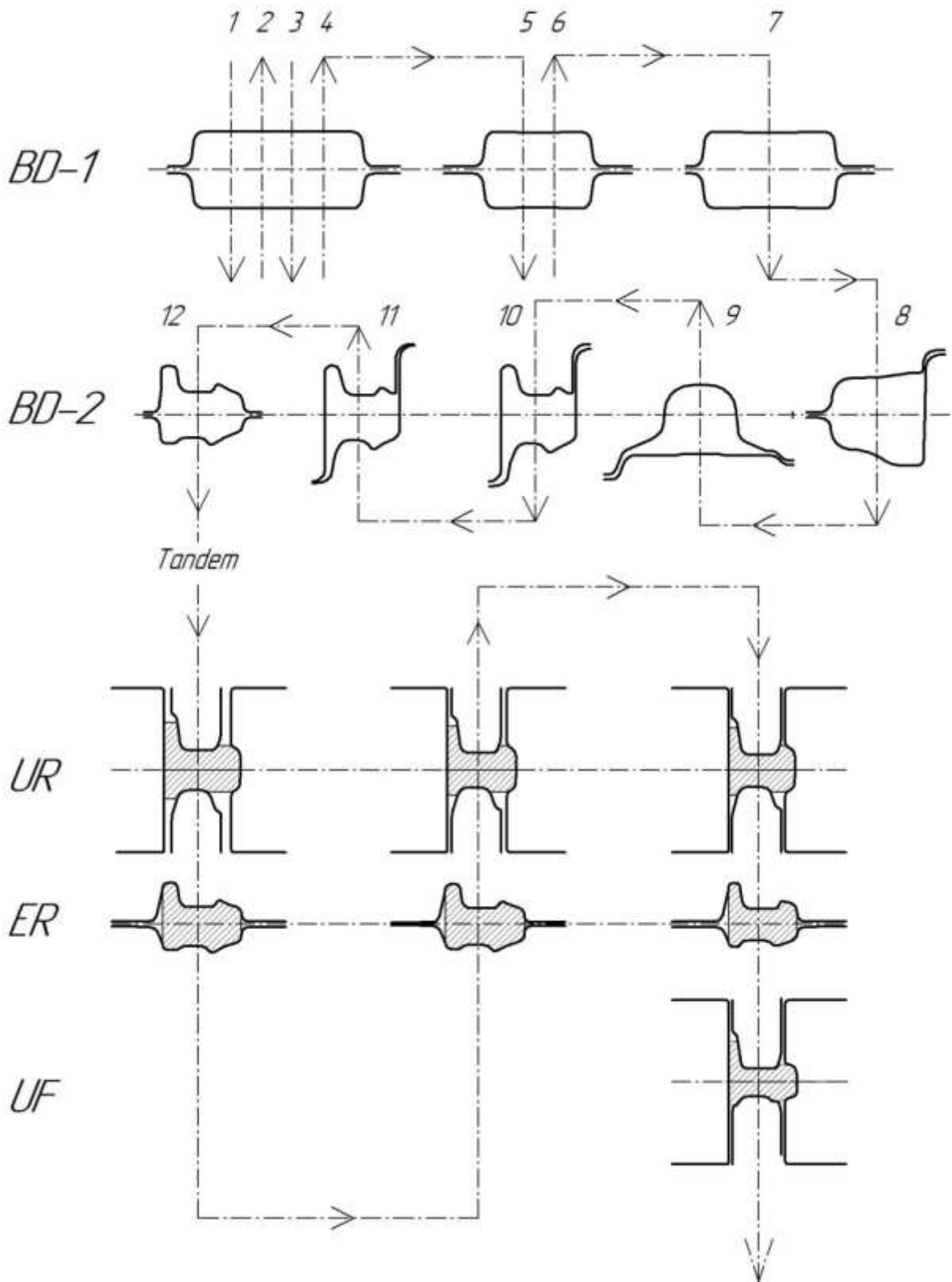


Рисунок 4.26 – Схема прокатки острых рельсов ОР65 на стане с группой тандем по разработанной ресурсосберегающей технологии

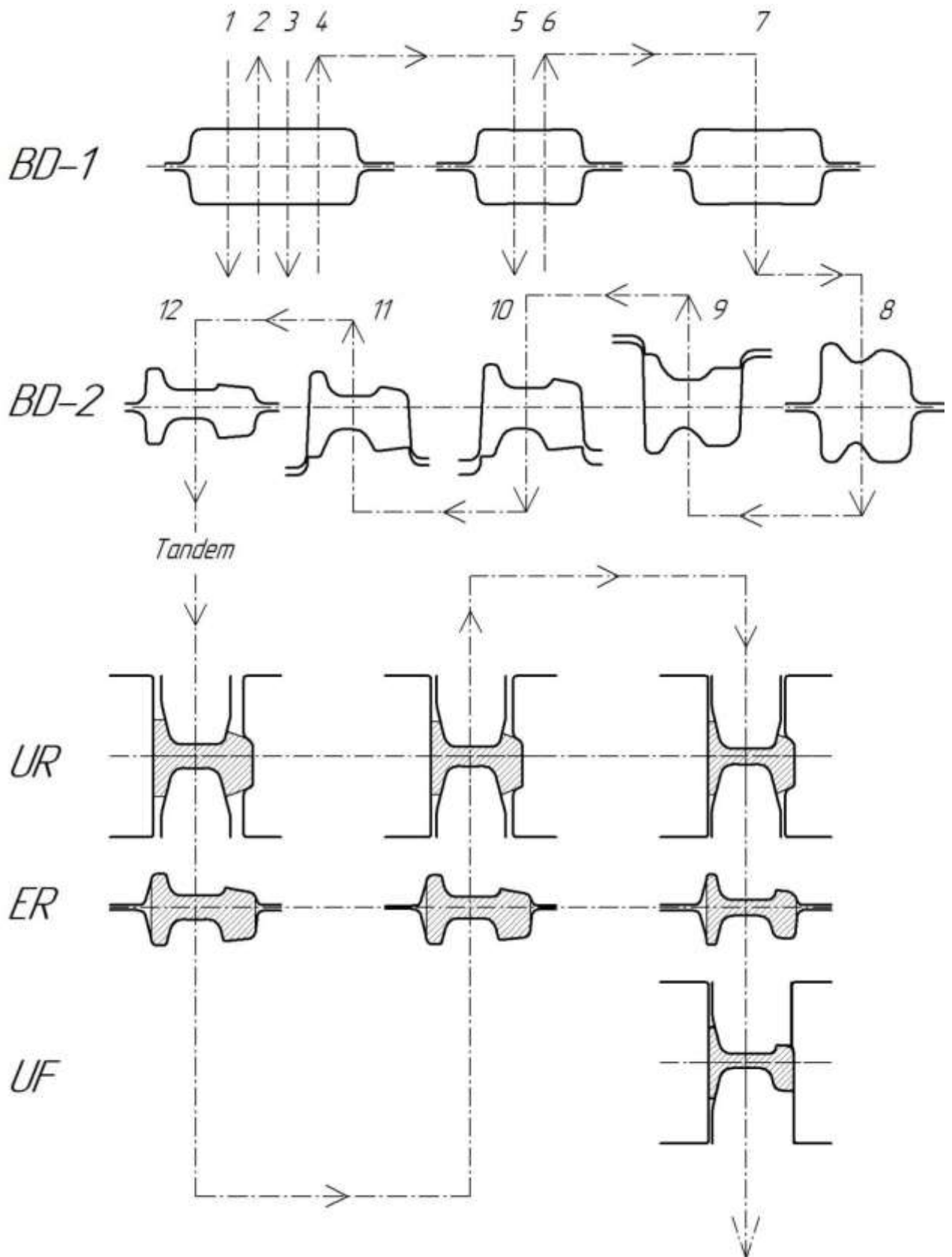


Рисунок 4.27 – Схема прокатки усовиковых рельсов УР65 на стане с группой тандем по разработанной ресурсосберегающей технологии

В разработанной технологии прокатки остряжковых и усовиковых рельсов применялся способ прокатки для асимметричных рельсовых профилей, в котором учитываются смещаемые объемы металла от обжатия вертикальными валками, при этом четырехвалковые калибры рассчитаны таким образом, чтобы обеспечивалось равенство (минимальное различие) сил прокатки в горизонтальной плоскости (рисунок 4.28 – 4.30), а для расчета площади контакта металла с валками применялся разработанный 3D-метод.

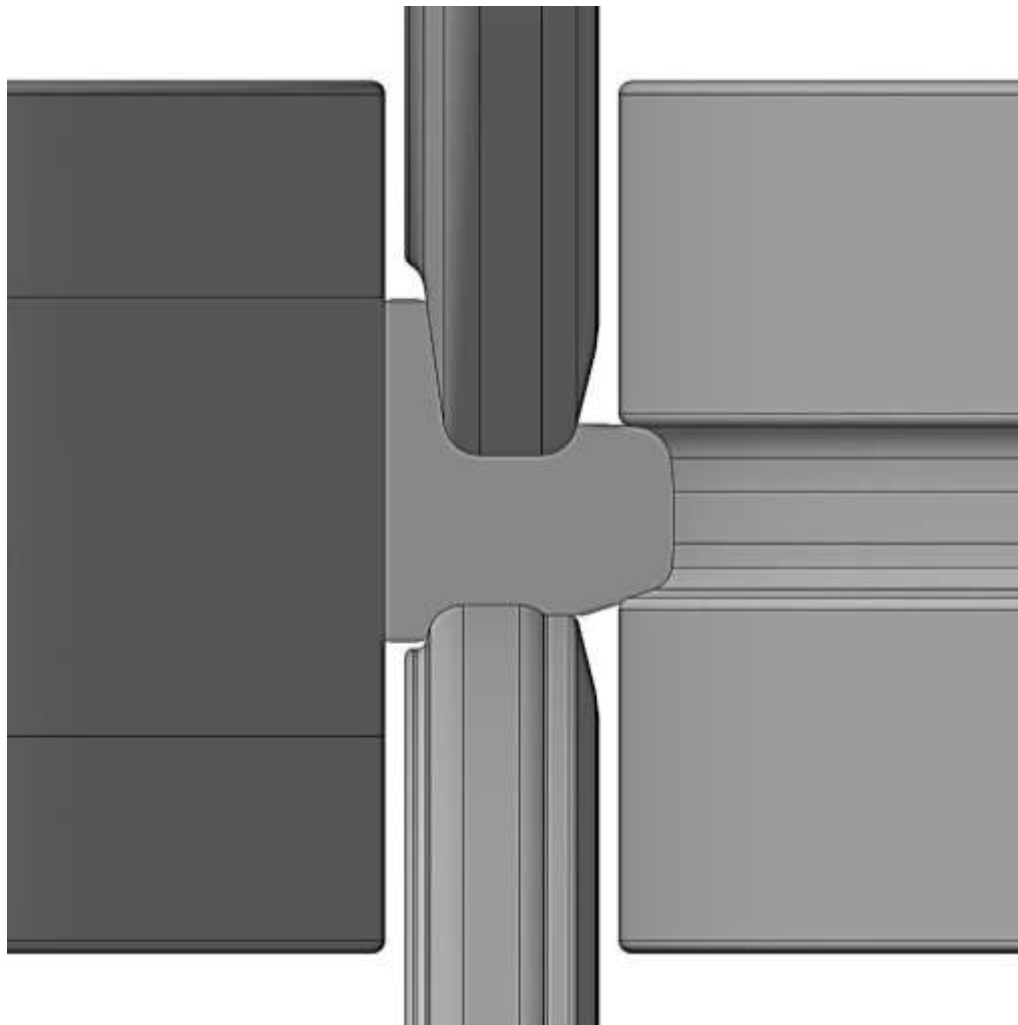


Рисунок 4.28 – 3-D модель уравновешенного по силам прокатки в горизонтальной плоскости чистового четырехвалкового калибра для рельса ОР50 при прокатке на стане с группой тандем

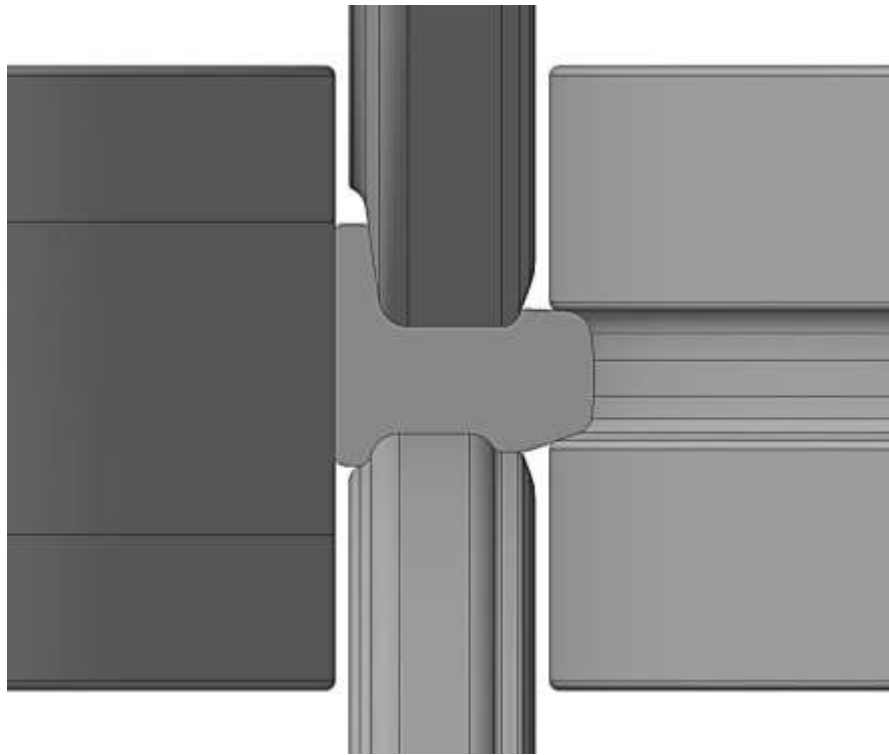


Рисунок 4.29 – 3-D модель уравновешенного по силам прокатки в горизонтальной плоскости чистового четырехвалкового калибра для рельса ОР65 при прокатке на стане с группой тандем

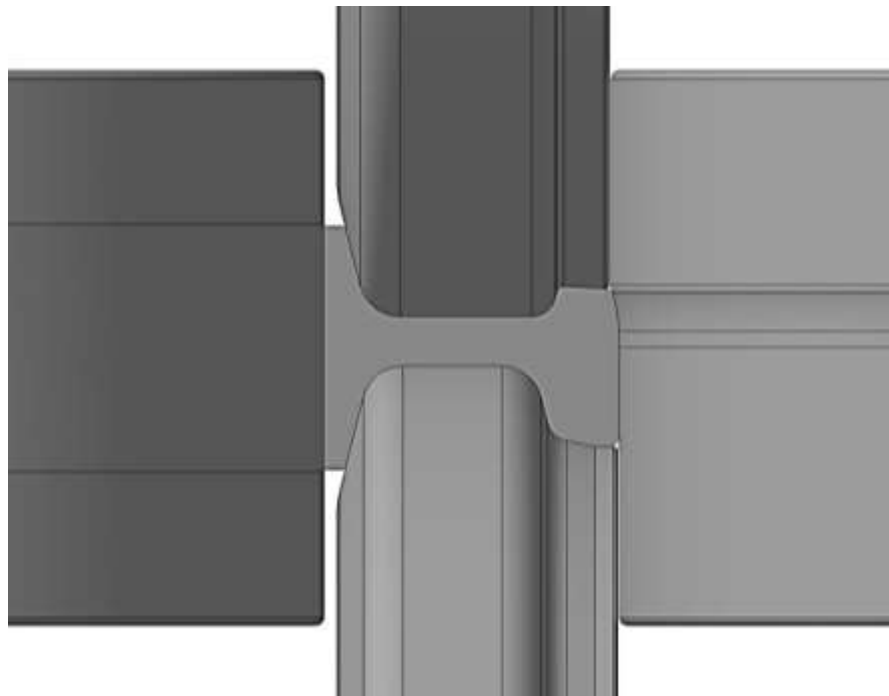


Рисунок 4.30 – 3-D модель уравновешенного по силам прокатки в горизонтальной плоскости чистового четырехвалкового калибра для рельса УР65 при прокатке на стане с группой тандем

Применяя способ прокатки с уравновешенными (минимальное различие сил прокатки действующих от вертикальных валков) четырехвалковыми калибрами в чистовой группе клетей и разработанные скоростные режимы прокатки, успешно внедрены промышленные технологии прокатки остроговых рельсов ОР50, ОР65 и усовиковых рельсов УР65 на прокатном стане с группой тандем ЕВРАЗ ЗСМК (рисунок 4.31).



а



б



в

Рисунок 4.31 – Асимметричные рельсы, прокатанные по разработанной новой технологии: а – остроговый рельс ОР50; б – остроговый рельс ОР65; в – усовиковый рельс УР65

Выводы по главе 4

1. Разработан и внедрен в промышленное производство новый эффективный скоростной режим прокатки трамвайных рельсов в чистовой непрерывной реверсивной группе клеток тандем, согласно которому прокатка осуществляется в непрерывном режиме следующим образом: первый проход в двух клетях (калибры UR-1 и ER-1); второй проход реверсивный, также в двух клетях (калибры ER-2 и UR-2); третий чистовой проход в трех клетях (калибры UR-3, ER-3, UF).

Прокатка в первом проходе. При подходе металла к чистовой непрерывной группе клеток автоматически запускаются главные двигатели универсальной клетки UR и вспомогательной клетки ER. Между каждым главным двигателем и клетью в непрерывной группе тандем установлены шестеренные клетки с передаточным числом $i = 5,3$. Разгон главного двигателя клетки UR происходит от 0 до 152 об/мин с ускорением 74,15 об/мин·с. Разгон главного двигателя клетки ER происходит от 0 до 175 об/мин с ускорением 85,37 об/мин·с, после чего клетки UR и ER автоматически переводятся на вращение валков с постоянной частотой. Захват металла производится на постоянной частоте вращения валков. При этом для клетки UR частота вращения вала двигателя составляет 152 об/мин, для клетки ER 175 об/мин. Количество оборотов между клетями различается из-за того, что валки клеток различного диаметра и необходимо в каждой последующей клетке при непрерывной прокатке учитывать вытяжку от обжатия в предшествующем калибре с учетом постоянства секундных объемов. После захвата металла в двух клетях UR и ER, раскат прокатывают некоторое время с постоянной скоростью. Далее одновременно в двух клетях происходит ускорение вращения валков с металлом. Ускорение продолжается до максимальной частоты вращения вала двигателя равной в клетке UR – 297,55 об/мин и клетки ER – 338,65 об/мин. Далее происходит прокатка металла при максимальной скорости одновременно в двух клетях. Выход раската из клетки UR и ER происходит на постоянной скорости, и некоторое время валки вращаются без раската.

Торможение валков клетей UR и ER без металла производится за два этапа. Для клетки UR на первой ступени торможения происходит снижение оборотов вала двигателя от 297,55 до 161,49 об/мин, после чего валки вращаются с постоянной частотой. На второй ступени торможения происходит снижение оборотов вращения вала двигателя от 161,49 до 0 об/мин. Для клетки ER на первой ступени производится торможение и число оборотов вала двигателя снижается с 338,65 об/мин до 181,52 об/мин, после чего валки клетки ER некоторое время вращаются с постоянной частотой. На второй ступени торможения происходит снижение оборотов вала двигателя клетки ER от 181,52 об/мин до 0 об/мин. После остановки валков и их реверса во втором проходе прокатка осуществляется по аналогии с первым проходом в непрерывном режиме в двух клетях ER и UR с незначительными изменениями скоростного режима относительно первого прохода, которые вызваны особенностями оборудования.

Прокатка в третьем проходе. После остановки валков для третьего прохода клеть ER перемещается в осевом направлении для выставки калибра ER-3 в линию прокатки чистового прохода. Устанавливаются размеры калибров клетей UR и UF, начинается третий чистовой проход, который является завершающим. В третьем проходе прокатка осуществляется в непрерывном режиме в трех клетях UR-ER-UF. Главными приводами клетей автоматически во всех трех клетях одновременно начинают разгоняться прокатные валки. В клетях UR разгон вала двигателя происходит от 0 до 183,44 об/мин с ускорением 73,38 об/мин·с. В клетях ER разгон вала двигателя происходит от 0 до 204,02 об/мин с ускорением 82,14 об/мин·с. В клетях UF разгон вала двигателя происходит от 0 до 216,77 об/мин с ускорением 86,71 об/мин·с. Затем приводные валки всех трех клетей вращаются с постоянной частотой. Захват металла производится при постоянной частоте вращения валков. В клетях UR захват раската происходит при постоянной частоте вращения вала двигателя 183,44 об/мин. В клетях ER захват раската происходит при частоте вращения вала двигателя 204,02 об/мин и в клетях UF при частоте вращения вала двигателя 216,77 об/мин. Далее валки клетей UR-ER-UF в течение некоторого времени прокатывают металл с постоянной

скоростью. Выход металла производится при постоянной частоте вращения валков всех клетей: из клетки UR на постоянной частоте вращения вала двигателя равной 183,44 об/мин, ER при частоте вращения вала двигателя 204,02 об/мин и UF при частоте вращения вала двигателя 216,77 об/мин. После выхода металла валки клетей UR, ER и UF вращаются некоторое время с постоянной частотой вращения. Затем происходит одновременное торможение валов главных двигателей во всех трех клетях от 183,44 об/мин до 0 для UR; от 204,02 об/мин до 0 для ER и от 216,77 об/мин до 0 для UF. После остановки валков во всех трех клетях валки клетей устанавливаются в калибры UR-1, клеть ER смещается на исходную позицию калибра ER-1, а валки клетки UF разводятся, после чего непрерывная реверсивная группа клетей готова к прокатке следующей полосы.

2. Динамическая составляющая крутящего момента ($M_{\text{дин}}$) на валу главного привода прокатного стана необходима для преодоления сил инерции при разгоне и торможении вращающихся частей стана ($M_{\text{дин. стана}}$), сил инерции при разгоне и торможении вертикальных валков ($M_{\text{дин. верт}}$) и прокатываемой полосы ($M_{\text{дин. полосы}}$). Предложен способ прокатки, в котором захват металла осуществляется при постоянной частоте вращения прокатных валков. Это позволяет, в момент захвата металла, исключить влияние динамического момента вращающихся частей прокатного стана ($M_{\text{дин. стана}}$). По предложенной технологии прокатки захват металла валками во всех клетях группы тандем осуществляется при постоянной частоте вращения валков, при этом полоса движется с линейной скоростью равной линейной окружной скорости вращения прокатных валков. Поскольку масса вертикальных валков и масса раската в сумме составляют менее 3% от массы вращающихся частей прокатного стана ($M_{\text{дин. стана}}$), соответственно увеличение динамического момента от вертикальных валков ($M_{\text{дин. верт}}$) и динамического момента полосы ($M_{\text{дин. полосы}}$) является незначительным. Величина момента холостого хода при прокатке трамвайных рельсов составляет 1,5 – 2% от $M_{\text{ст}}$. С увеличением скорости прокатки в два раза величина статического момента $M_{\text{ст}}$

возрастает на 6,5%. Разработанные скоростные режимы прокатки трамвайных рельсов в непрерывной реверсивной группе клетей позволили на 20 – 25% уменьшить момент при захвате металла валками за счет отсутствия динамического момента при постоянном числе оборотов вращающихся частей прокатного стана.

3. В четырехвалковых калибрах чистовой группы клетей тандем, внедрен предложенный способ прокатки асимметричных рельсовых профилей, в котором учитываются смещаемые объемы металла по элементам профиля, при этом величина обжатия металла по головке и подошве профиля рассчитана таким образом, чтобы действующие силы прокатки от вертикальных валков, со стороны головки R_g и подошвы R_p профиля, были равны (имели минимальное различие) между собой $R_g \approx R_p$. Причем профиль раската рассчитан таким образом, чтобы из предшествующего калибра в последующий калибр металл обжимался настолько, чтобы раскат из калибра в калибр обеспечивал равенство сил прокатки со стороны головки и подошвы профиля. Данный способ прокатки позволяет исключить осевые силы на горизонтальные валки, а четырехвалковый калибр является уравновешенным по силам прокатки в горизонтальном направлении. Использование предлагаемого способа прокатки обеспечивает следующие преимущества: стабильная геометрия профиля по длине раската за счет отсутствия сдвигающих осевых сил при прокатке; увеличение стойкости калибра из-за отсутствия выработки по опорным поверхностям горизонтальных валках с подшипниками и повышение производительности прокатного стана в связи с уменьшением количества перевалок клетей, связанных с выработками калибров из-за осевых усилий на горизонтальные валки [349].

4. По итогам проведенных моделирований методом конечных элементов и натурных исследований разработана, освоена и внедрена в промышленное производство на рельсобалочном стане с группой тандем АО «ЕВРАЗ ЗСМК» ресурсосберегающая технология прокатки для асимметричных рельсовых профилей: трамвайных, остряковых и усовиковых рельсов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Диссертация направлена на решение актуальной научно-технической проблемы разработки, теоретического обоснования и внедрения ресурсосберегающей технологии прокатки асимметричных рельсовых профилей на станах с группой тандем.

1. Выполнен анализ этапов развития и современного состояния теории и практики прокатки асимметричных рельсовых профилей. Установлено, что технология прокатки асимметричных рельсовых профилей более трудоемка и энергоемка по сравнению с технологией прокаткой симметричных рельсов в четырехвалковых калибрах, при этом трамвайные рельсы имеют самую сложную геометрию профиля поперечного сечения из всех прокатываемых рельсов. На основе теоретического анализа и экспериментальных результатов разработаны новые научно обоснованные технические и технологические решения, позволившие впервые в России разработать и реализовать ресурсосберегающую технологию прокатки асимметричных рельсовых профилей на станах с группой тандем, внедрение которой вносит значительный вклад в развитие страны.

2. Применяя компьютерное моделирование с помощью метода конечных элементов, получены результаты исследований по распределению полей интенсивности деформаций и полей интенсивности напряжений при прокатке трамвайных рельсов.

По разработанным режимам деформации металла при прокатке в группе тандем установлено, что зона с максимальным распределением полей интенсивности деформаций располагается по оси разрезного гребня у вершины разрезаемого желоба и соответствует наибольшим перемещениям объемов металла, при этом значения интенсивности деформаций в поперечном сечении составляют $\varepsilon_e = 3,5$. Для чистового четырехвалкового калибра поля интенсивности деформаций в поперечном сечении раската имеют распределение значений близкое к равномерному, которые находятся в диапазоне $\varepsilon_e = 0,05 - 0,8$.

Наибольшие значения интенсивности напряжений составляют $\sigma_e = 160$ МПа и расположены в двух элементах профиля: в головке профиля (возникают из-за деформаций металла разрезным гребнем) и в месте сопряжения шейки с подошвой профиля. С удалением от поверхностных слоев, в зоне контакта разрезного валка, значения интенсивности напряжений уменьшаются, такая же закономерность наблюдается при распределении полей интенсивности деформаций.

Показано, что по разработанным режимам обжатия значения интенсивности деформаций и интенсивности напряжений находятся в допустимых пределах, при этом не происходит нарушения сплошности металла, что согласуется с проведенными результатами натуральных исследований.

3. Разработан 3D-метод, позволяющий с высокой точностью рассчитать, применяя системы трехмерного твердотельного моделирования, площадь контактной поверхности металла с валками, форму и смещаемые объемы металла в геометрическом очаге деформации для сложных прокатываемых профилей. Показано, что применение 3D-метода позволяет анализировать захват металла по элементам профиля и рассчитать площади контактной поверхности металла с валками в геометрическом очаге деформации точнее 25 – 30% в сравнении с известными методами, что обеспечивает повышение точности расчета силы прокатки.

4. На основании теоретических результатов исследований с применением методики планирования многофакторного эксперимента, используя сверхнасыщенный план по методу случайного баланса, проведены исследования изменения размеров фланцев профиля при прокатке в четырехвалковых калибрах. Показано, что наиболее существенное влияние на изменение ширины подошвы оказывает величина обжатия горизонтальными валками внутренней части подошвы и обжатие шейки профиля. Вторым по величине значимости влияния на изменение размера ширины оказывает обжатие вертикального валка по подошве, а в меньшей степени влияет температура прокатки в заданном диапазоне и глубина внедрения вертикального валка со стороны головки профиля.

Показано, что изменение ширины головки профиля не зависит от диаметра разрезного и гладкого валка. В большей степени зависит от глубины внедрения разрезного валка и во вторую очередь от обжатия горизонтальными валками внутренней части головки. В меньшей степени на изменение ширины головки профиля оказывают обжатие гладкого валка и температура прокатки в заданном диапазоне.

Разработаны уравнения регрессии для расчета абсолютного и относительного изменения размеров фланцев профиля трамвайного рельса при прокатке в четырехвалковых калибрах группы тандем. Разработанные уравнения регрессии позволили рассчитать режимы деформации при прокатке в четырехвалковых калибрах группы тандем, обеспечивающие получение профиля с регламентированными размерами, что подтверждено проведенными натурными исследованиями.

5. На основе компьютерного моделирования с помощью метода конечных элементов, применяя методику планирования многофакторного эксперимента и результатов натурных исследований, разработан способ прокатки рельсовых профилей в четырехвалковых калибрах, обеспечивающий эффективное распределение сил прокатки, действующих от обжатия вертикальными валками. Под эффективным распределением подразумевается равенство (минимальное различие) сил прокатки, действующих со стороны головки и подошвы профиля при прокатке.

Показано, что при прокатке трамвайных рельсов отношение сил прокатки (со стороны разрезного и гладкого валка) обеспечивается в интервале $P_p/P_r = 0,85 \div 1,19$ при условии выполнения отношения смещаемых объемов металла вертикальными валками, находящимся в диапазоне $V_p/V_r = 3,22 \div 4,44$, что позволяет получить коэффициенты изменения размеров фланцев головки и подошвы $\beta_n = \beta_r = 0,99 \div 1,01$ – это обеспечивает требуемую геометрию профиля. Проведенные натурные эксперименты с применением разработанного способа прокатки подтверждают результаты компьютерного моделирования, что свидетельствует об адекватности проведенного исследования. Новизна разработанного способа прокатки

рельсовых профилей в четырехвалковых калибрах защищена патентом РФ №2595082.

б. Исследовано с помощью компьютерного моделирования и натуральных экспериментов трансформация осевой пористости непрерывнолитой заготовки при прокатке в зависимости от формы калибра и коэффициента вытяжки. При прокатке в двухвалковых калибрах определены значения интенсивности деформаций, интенсивности напряжений и ресурса пластичности металла для второго, седьмого, девятого и двенадцатого проходов с оценкой трансформации осевой пористости, которая изначально имеет площадь поперечного сечения до $S = 1256,6 \text{ мм}^2$. Для второго прохода в ящичном калибре максимальные значения интенсивности деформаций составляют $\varepsilon_e = 1,46$, интенсивности напряжений $\sigma_e = 167 \text{ МПа}$, ресурс пластичности $D = 0,2$. При этом площадь поперечного сечения осевой пористости после второго прохода составляет $S = 998,24 \text{ мм}^2$. Для седьмого прохода в ящичном калибре наибольшие значения интенсивности деформаций имеет металл, находящийся по радиусам сопряжения бочки вала с выпусками калибра, максимальные значения интенсивности деформаций составляют $\varepsilon_e = 0,87$, интенсивности напряжений $\sigma_e = 162 \text{ МПа}$, ресурса пластичности $D = 0,122 - 0,162$, при этом площадь поперечного сечения осевой пористости уменьшается до $S = 364,5 \text{ мм}^2$. В девятом калибре наибольшие значения интенсивности деформаций соответствуют разрезному гребню по закрытому ручью $\varepsilon_e = 2,25$, при этом интенсивность напряжений $\sigma_e = 125 - 167 \text{ МПа}$, коэффициент ресурса пластичности составляет $D = 0,2 - 0,3$, а площадь поперечного сечения осевой пористости уменьшается до $S = 40,13 \text{ мм}^2$. В двенадцатом проходе (последний для второй черной клетки), осевая пористость полностью отсутствует, максимальные значения интенсивности деформаций составляют $\varepsilon_e = 1,25 - 1,67$, интенсивности напряжений составляют $\sigma_e = 166 \text{ МПа}$, ресурса пластичности $D = 0,125 - 0,168$. Установлено, что при прокатке осевая пористость локализуется в шейке профиля, уменьшение площади осевой пористости пропорционально суммарному коэффициенту вытяжки. Показано, что

заваривание осевой пористости и полная ее выработка происходит в десятом проходе, при этом суммарный коэффициент вытяжки составляет $\Sigma\lambda_{1\div 10} = 4,13$. Результаты промышленного эксперимента на заготовке с максимальной осевой пористостью показали высокую сходимость с результатами компьютерного моделирования, при этом в готовых рельсах металл профиля имеет удовлетворительную макроструктуру, требуемую геометрию, а зона с осевой пористостью отсутствует, что подтверждает адекватность полученных результатов.

7. Предложены новые (эффективные) скоростные режимы прокатки в группе тандем с учетом действующих крутящих моментов по разработанному способу прокатки. При этом режиме во всех клетях (от первой до последней) захват раската осуществляется при постоянной частоте вращения горизонтальных валков, при этом полоса движется с линейной скоростью, равной окружной скорости вращения валков – это позволяет исключить влияние динамического момента вращающихся частей прокатного стана, в момент захвата металла валками.

Показано, что при пониженной постоянной частоте вращения 0,42 – 0,51 от максимального количества оборотов происходит устойчивый захват раската валками в первой и второй клетки, затем происходит ускорение валков с раскатом в двух клетях одновременно до максимальной рабочей скорости и последующая прокатка с учетом действующих крутящих моментов (не превышающих номинальный крутящий момент). При третьем проходе захват раската валками, прокатка и выход раската осуществляется при постоянной рабочей частоте вращения 0,6 ÷ 0,7 от максимальных оборотов. По разработанным эффективным скоростным режимам проведены промышленные исследования, которые показали, что при получении профиля с регламентированной геометрией, обеспечивается увеличение производительности прокатного стана, повышение стойкости прокатных валков и увеличение межремонтного цикла оборудования прокатных клетей.

8. На основании теоретических и экспериментальных исследований, выполненных на примере сложного асимметричного профиля трамвайного рельса показано, что разработанные методы расчета и способы прокатки могут быть применены для разработки ресурсосберегающей технологии прокатки более простых асимметричных профилей таких как остряковые и усовиковые рельсы. Показано, что применяя разработанный 3D-метод расчета контактных поверхностей металла с валками и уравнения регрессии для расчета изменения размеров фланцев профиля, с учетом способа прокатки, основанного на эффективном распределении сил прокатки в четырехвалковых калибрах, а так же применяя разработанные эффективные скоростные режимы для группы тандем с учетом действующих крутящих моментов и проанализировав результаты исследований напряженно-деформированного состояния металла, в том числе с учетом трансформации осевой пористости, разработана ресурсосберегающая технология прокатки остряковых и усовиковых рельсов на стане с группой тандем. Предложенный комплексный подход с применением разработанных методов расчета и способов прокатки для разработки ресурсосберегающих технологий производства рельсовых профилей адаптируется к условиям любого рельсобалочного прокатного стана с группой тандем.

9. На основе теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в диссертации, разработаны теоретические и технологические положения для асимметричных рельсовых профилей, использованные при разработке, единственной в России и странах СНГ, технологии прокатки трамвайных рельсов на стане с группой тандем. Разработанная ресурсосберегающая технология освоена и внедрена в промышленное производство на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» которая обеспечила: уменьшение на 20 – 25 % значения крутящего момента при захвате металла валками; отсутствие динамических ударов при захвате полосы и повышение надежности оборудования главной линии прокатного стана; увеличение производительности прокатного стана на 10 %; повышение стойкости прокатных валков на 17 % и увеличение межремонтного цикла оборудования прокатных клеток на 23 %; уменьшение потребления электроэнергии на

45 кВт·ч/т; повышение стабильности профиля и его качество. Экономический эффект от внедрения предложенных мероприятий составил 82 млн.руб./год.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ

1. Список сокращений примененных в диссертации для обозначения клетей прокатного стана

Сокращение	Наименование на английском языке	Наименование на русском языке
BD	Break Down	Черновая клеть
BD-1	Break Down №1	Черновая клеть №1 расположенная по ходу прокатки
BD-2	Break Down №2	Черновая клеть №2 расположенная по ходу прокатки
ER	Edging Reversible	Вспомогательная реверсивная клеть
UF	Universal Finishing	Универсальная чистовая клеть
UR	Universal Roughing	Универсальная черновая клеть
U0	Universal Mill	Универсальный прокатный стан

2. Список специальных терминов введенных в диссертации

В диссертации введены термины «неуравновешенный четырехвалковый калибр» и «уравновешенный четырехвалковый калибр» по аналогии с терминологией примененной в книге Целикова А.И. [273] на стр.229 «...очевидно, указанные шесть сил, действующих на прокатываемый металл от верхнего и нижнего валков, должны взаимно уравновешиваться...».

Неуравновешенный четырехвалковый калибр – четырехвалковый калибр состоящий из двух горизонтальных приводных валков и двух вертикальных не приводных валков в котором при прокатке рельсов со стороны вертикальных валков действуют различные по величине силы прокатки, т.е сила прокатки со стороны головки больше, чем со стороны подошвы.

Уравновешенный четырехвалковый калибр – четырехвалковый калибр состоящий из двух горизонтальных приводных валков и двух вертикальных не приводных валков в котором при прокатке рельсов со стороны вертикальных валков действуют одинаковые по величине силы прокатки, т.е сила прокатки со стороны головки равна (приблизённо равна) силе прокатки со стороны подошвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 г. № 1734-р [Текст] – Москва : 2008. – 266 с.
2. Стратегия развития транспортного машиностроения в Российской Федерации на период до 2030 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 августа 2017 г. № 1756-р [Текст] – Москва : 2017. – 68 с.
3. Государственная программа «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности», подпрограмма 10 «Металлургия», утвержденная постановлением Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. №328 [Текст] – Москва : 2014. – 367 с.
4. Развитие рельсового транспорта облегченного типа в мире [Текст] // Железные дороги мира – 2016. – № 3. – С.50–54.
5. Программа развития пассажирского транспорта Москвы до 2030 года [Текст] – Москва : 2004. – 65 с.
6. Свод правил 98.13330.2012 Трамвайные и троллейбусные линии [Текст] – Москва : Минрегион России, 2012. – 76 с.
7. ГОСТ Р 55941–2014. Рельсы трамвайные желобчатые [Текст] – Москва : Стандартиформ, 2014. – 14 с.
8. EN 14811:2006+A1:2009 «Железные дороги. Верхнее строение пути. Специальные рельсы. Желобчатые рельсы и сопутствующие конструкционные профили» [Текст] – Брюссель : 2009. – 69 с.
9. Дерябин, А. А. Разработка новых национальных стандартов на трамвайные рельсы и рельсы для подъездных и технологических путей промышленного железнодорожного транспорта [Текст] / А. А. Дерябин, В. А. Рабовский // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых креплений (по материалам заседания некоммерческого партнерства

- «Рельсовая комиссия» 25 – 27 октября 2013 г.): сб. научн. докл. – Екатеринбург : ОАО «УИМ», 2014. С. 141–148.
10. Свейковски, У. Производство рельсов высокого качества с использованием компактных универсальных клетей и технологии RailCool [Текст] / У. Свейковски, Т. Нерзак // *Металлургическое производство и технология.* – 2006. – № 2. – С. 50–56.
11. Модернизация рельсопрокатного стана компании ArcelorMittal Espana [Текст] // *Черные металлы.* – 2017. – № 2. – С. 9–10.
12. Загуменнов, О. В. Новый рельсобалочный стан ОАО ЧМК [Текст] / О. В. Загуменнов, В. С. Симачев, М. Е. Моторыгин // *Сталь.* – 2015. – № 7. – С. 28–30.
13. Краткие заметки: компании «Ниппон стил» и «Сумитомо метэл корп.» готовы производить самые длинные железнодорожные рельсы в мире [Текст] // *Iron and Steel Technology.* – 2014. – № 7. – С. 11.
14. Колесников, А. Г. Технологическое оборудование прокатного производства : учеб. пособие для вузов [Текст] / А. Г. Колесников, Р. А. Яковлев, А. А. Мальцев – Москва : изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 159 с.
15. Янг Р., Сирайт М. 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. – No. 9. – P. 41–48.
16. Компания «Ниппон Стил и Сумитомо Метэл корп.» готова производить самые длинные железнодорожные рельсы в мире: краткая заметка. Переводное издание [Текст] / ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», № 4038. Пер. с англ.– Пер. изд. : NSSMC ready to make world’s longest railway rails *Iron and Steel Technology.* – 2014. – № 7.
17. Поляков, В. В. Развитие производства рельсов за рубежом [Текст] / В. В. Поляков, Е. А. Артамонова // *Обзорн. информ. сер. Чер. металлургия.* – Москва : ЦНИИТЭИЧМ, 1989. – 29 с.

18. Матвеев, Б. Н. Современные рельсопрокатные станы [Текст] / Б. Н. Матвеев // Чер. металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». – 2006. – № 2. – С. 40–43.
19. Огородников, С. И. Освоение производства фасонного проката на универсальном рельсобалочном стане [Текст] / С. И. Огородников, А. Е. Попов, О. В. Загуменнов // Сталь. – 2013. – № 11. – С. 46–47.
20. Гугис, Н. Н. Основные направления развития прокатного производства России в 2010-2012 гг. [Текст] / Н. Н. Гугис // Производство проката. – 2013. – № 7.
21. Кучко, И. И. Производство трамвайных рельсов типа «Феникс» [Текст] / И. И. Кучко // Бюл. НТИЧМ. – 1946. – № 17. – С. 28–31.
22. ГОСТ Р 51685–2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия [Текст] – Москва : Стандартиформ, 2014. – 96 с.
23. ГОСТ Р 53866–2010. Рельсы крановые [Текст] – Москва : Стандартиформ, 2011. – 14 с.
24. ТС 05757676-41-2015. Производство и поставки монорельса М200 для шахтных монорельсовых дорог [Текст] – Новокузнецк : АО «ЕВРАЗ ЗСМК», 2016. – 8 с.
25. ТУ 32 ЦП 804–94. Рельсы усовиковые типа УР65 [Текст] – Новокузнецк : КМК, 1994. – 18 с.
26. ГОСТ 17507–85. Рельсы остряковые ОР65 [Текст] – Москва : Государственный комитет СССР по стандартам, 1986. – 8 с.
27. ГОСТ 17508–85. Рельсы остряковые ОР50 [Текст] – Москва : Государственный комитет СССР по стандартам, 1986. – 10 с.
28. ГОСТ Р 55497–2013. Рельсы железнодорожные контррельсовые [Текст] – Москва : Стандартиформ, 2014. – 21 с.
29. ТС 05757676–43–2016. Заготовка рельса Т62 [Текст] – Новокузнецк : ЕВРАЗ ЗСМК, 2016. – 6 с.
30. ТУ У 27.1-053930565-275–2004. Бесшечный желобчатый трамвайный

- рельс [Текст] – Украина: ЕВРАЗ – ДМЗ им. Петровского, 2004. – 7 с.
31. ТУ 14-2Р-320–96. Рельсы трамвайные желобчатые [Текст] – АО «УИМ», 1996. – 21 с.
32. Пат. 164976 DE, МПК E01B 5/04. Желобчатый рельс, в частности железнодорожный желобчатый рельс / Лауссманн Кристиан, Валериус Роланд; № 2015150660/11; заявл. 25.11.2015; опубл. 27.09.2016, Бюл. №27.
33. Пат. 2342479C1 DE, МПК E01B 5/04. Желобчатый рельс / Зюс Йоахим; № 2007121676/11; заявл. 03.11.2005; опубл. 27.12.2008, Бюл. №36.
34. Дорофеев, В. В. Новая технология прокатки рельсов из непрерывнолитой заготовки в черновых калибрах [Текст] / В. В. Дорофеев, В. В. Кузнецов, А. В. Дорофеев // Перспективные промышленные технологии и материалы: сб. ст. – Новосибирск, 2004. – С. 93–110.
35. А.с. 1445823 СССР, МКИ 4 В 21 В 1/08. Способ калибровки рельсов / А. Ф. Кузнецов, И. К. Лысенко, И. А. Шарапов, Е. Л. Кравченко, В. В. Дорофеев; № 4251369/28-02; заявл. 01.06.87 ; опубл. 23.12.88, Бюл. № 47. – 3 с.
36. Критинин, И. А. Улучшение качества железнодорожных и острязковых рельсов [Текст] / И. А. Критинин, Н. П. Кудрявцев, И. А. Шарапов [и др.] // Сталь. – 1972. – № 2. – С. 148–149.
37. Шарапов, И. А. Калибровка несимметричных рельсовых профилей [Текст] / И. А. Шарапов, Е. Л. Кравченко, В. В. Дорофеев // Сталь. – 1990. – № 12. – С. 47–51.
38. Головатенко, А. В. Технические и технологические особенности освоения прокатки рельсовых профилей на новом рельсобалочном стане ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» [Текст] / А. В. Головатенко, К. В. Волков, В. В. Дорофеев, С. В. Степанов, А. В. Добрянский // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений (по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» 25 – 27 октября 2013 г.) : сб. науч. докл. – Екатеринбург : ОАО «УИМ». – 2014. – С. 75–92.
39. Уманский, А. А. Совершенствование режима прокатки железнодорожных

- рельсов в обжимных клетях универсального рельсобалочного стана [Текст] / А. А. Уманский, А. В. Головатенко, В. Н. Кадыков // Черные металлы. – 2016. – № 11. – С. 16–21.
40. Шилов, В. А. Особенности прокатки длинномерных рельсов на универсальном рельсобалочном стане [Текст] / В. А. Шилов, Д. Л. Шварц, Е. О. Скосарь // Metallurg. – 2016. – № 3. – С. 44–48.
41. Уманский, А. А. Совершенствование режимов прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане с использованием методов физического моделирования процессов деформации [Текст] / А. А. Уманский, А. В. Головатенко, В. Н. Кадыков // Производство проката. – 2016. – № 7. – С. 27–32.
42. Головатенко, А. В. Повышение качества железнодорожных рельсов при прокатке за счет усовершенствования системы черновых калибров в условиях нового универсального рельсопрокатного стана ЕВРАЗ ЗСМК [Текст] / А. В. Головатенко [и др.] // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сб. науч. докл. по материалам юбилейного 130-го заседания НП «Рельсовая комиссия» (7 – 9 октября 2014 г. Новокузнецк). – СПб. – 2015. – С. 201–210.
43. Шварц, Д. Л. Теоретическое исследование прокатки рельсового профиля в универсальном калибре. Сообщение 1. [Текст] / Д. Л. Шварц // Известия вузов. Черная металлургия. – 2015. – № 6. – С. 448–453.
44. Головатенко, А. В. Развитие технологии прокатки и процессов калибровки железнодорожных рельсов [Текст] / А. В. Головатенко, К. В. Волков, В. В. Дорофеев, С. В. Степанов, А. В. Добрянский // Производство проката. – 2014. – № 2. – С. 25–39.
45. 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.
46. 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.
47. Шилов, В. А. Приращение и утяжка фланцев при прокатке рельсов в универсальных калибрах [Текст] / В. А. Шилов, Д. Л. Шварц, Р. А. Литвинов // Производство проката. – 2010. – № 7. – С. 27–30.
48. Шилов, В. А. Силовые воздействия при прокатке рельсового профиля в универсальном калибре [Текст] / В. А. Шилов, Д. Л. Шварц // Известия вузов. Черная металлургия. – 2009. – № 11. – С. 25–29.
49. 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.
50. Шилов, В. А. Расчет формоизменения металла при прокатке рельсов в универсальном калибре [Текст] / В. А. Шилов, Д. Л. Шварц, Р. А. Литвинов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2008. – № 3. – С. 51–54.
51. Шилов, В. А. Скоростные режимы прокатки рельсов в непрерывных реверсивных группах клеток современного рельсобалочного стана [Текст] / В. А. Шилов, Д. Л. Шварц, Р. А. Литвинов // Производство проката. – 2008. – № 7. – С. 30–33.
52. Литвинов, Р. А. Моделирование напряженно-деформированного состояния универсальной рабочей клетки при прокатке рельсового профиля [Текст] / Р. А. Литвинов, В. А. Шилов // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: межрегион. сб. науч. тр. – Магнитогорск. – 2007. – С. 23–27.
53. Шилов, В. А. Формоизменение металла при прокатке рельсов в универсальных калибрах [Текст] / В. А. Шилов, Д. Л. Шварц, Р. А. Литвинов // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: Межрег. сб. науч. тр. – Магнитогорск. – 2007. – С. 200–206.
54. Бровман, М. Я. Анализ экспериментальных данных по энергосиловым параметрам прокатки [Текст] / М. Я. Бровман // Производство проката. – 2014.

- № 11. – С. 3–10.
55. Перетятыко, В. Н. Влияние разрезки на положение центральной пористости в рельсах Р65 / В. Н. Перетятыко, С. Г. Литвин, Е.М. Пятайкин // Известия вузов. Черная металлургия. – 2003. – № 4. – С. 36–38.
56. Дорофеев, В. В. Анализ формоизменения осевой пористости при универсальной прокатке рельсов в зависимости от схемы деформации в черновых калибрах [Текст] / В. В. Дорофеев, А. В. Добрянский, А. Ю. Каретников, В. В. Ерастов [и др.] // Сталь. – 2012. – № 11. – С. 32–35.
57. Дорофеев, В. В. Рациональная система калибров для прокатки рельсов в черновых пропусках [Текст] / В. В. Дорофеев, В. Е. Громов, И. А. Шарапов, В. А. Бердышев // Известия вузов. Черная металлургия. – 1997. – № 6. – С. 61–62.
58. Пат. 2233716 С1 РФ, МПК В 21 В 1/08//В 21 В 108:02. Валковый узел универсального четырехвалкового калибра / В. В. Дорофеев, Е. Л. Кравченко, А. Г. Кочетков, В. И. Прибытков, А. В. Дорофеев; № 20031002661/02; заявл. 04.01.2003; опубл. 10.08.2004; Бюл. № 8.
59. Рудюк, А. С. Совершенствование технологии производства железнодорожных рельсов [Текст] / А. С. Рудюк, А. А. Азаркевич, Р. С. Сидорчук, А. В. Кармазин, И. М. Кошулэ // Металлург. – 2013. – №9. – С. 84–87.
60. Полухин, П. И. Прокатка и термическая обработка рельсов [Текст] / П. И. Полухин, Ю. В. Грдина, Е. Я. Зарвин. – Москва : Металлургиздат, 1963. – 511 с.
61. Павлов, В. В. Разработка прогрессивных калибровок и технологий прокатки на станах Новокузнецкого металлургического комбината [Текст] / В. В. Павлов, В. В. Дорофеев, Е. М. Пятайкин, В. В. Ерастов. – Новосибирск : Наука, 2006. – 224 с.
62. Илюкович, Б. М. Прокатка и калибровка: справочник. В 6 т. Т. 2: Калибровка полосовых профилей симметричных, асимметричных и клиновидных;

- полосовых профилей с отогнутыми краями, утолщениями по краям и ребрами жесткости [Текст] / Б. М. Илюкович. – Днепропетровск : Дніпро-ВАЛ, 2003. – 569 с.
63. Есипов, В. Д. Прокатка специальных профилей сложной формы [Текст] / В. Д. Есипов и др. – Киев : Техніка, 1985. – 190 с.
64. Илюкович, Б. М. Прокатка и калибровка [Текст] / Б. М. Илюкович. – Днепропетровск : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2004. – 824 с.
65. Чекмарев, А. П. Калибровка прокатных валков [Текст] / А. П. Чекмарев, М. С. Мутьев, Р. А. Машковцев. – Москва : Металлургия, 1971. – 625 с.
66. Беняковский, М. А. Технология прокатного производства: справочник. В 2 кн. Кн. 1 / М. А. Беняковский, К. Н. Богоявленский, А. И. Виткин [и др.] – Москва : Металлургия, 1991. – 440 с.
67. Беняковский, М. А. Технология прокатного производства: справочник. В 2 кн. Кн. 2 [Текст] / М. А. Беняковский, К. Н. Богоявленский [и др.] – Москва : Металлургия, 1991. – 423 с.
68. Клименко, В. М. Технология прокатного производства [Текст] / В. М. Клименко, А. М. Онищенко [и др.] – Киев : Выща школа, 1989. – 311 с.
69. Смирнов, В.С. Теория прокатки [Текст] / В. С. Смирнов. – Москва : Металлургия, 1967. – 460 с.
70. Грудев, А. П. Теория прокатки: 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / А. П. Грудев. – Москва : Интермет Инжиниринг, 2001. – 280 с.
71. Скороходов, Н. Е. Калибровка сложных профилей: справочник [Текст] / Н. Е. Скороходов, Б. М. Илюкович, И. П. Шулаев [и др.] – Москва : Металлургия, 1970. – 232 с.
72. Диомидов, Б. Б. Калибровка прокатных валков [Текст] / Б. Б. Диомидов, Н. В. Литовченко. – Москва : Металлургия, 1970. – 312 с.
73. Илюкович, Б. М. Прокатка и калибровка фасонных профилей : справочник [Текст] / Б. М. Илюкович, И. П. Шулаев, В. Д. Есипов, С. Е. Меркурьев. – Москва : Металлургия, 1989. – 312 с.

74. Илюкович, Б.М. Прокатка и калибровка : справочник. В 6 т. Т. 6 : Калибровка двутавровых профилей и профилей особо сложной формы [Текст] / Б. М. Капелюшный ; под ред. Б. М. Илюковича. – Дніпропетровськ : Дніпро-ВАЛ, 2004. – 824 с.
75. Смирнов, В. К. Калибровка прокатных валков : учеб. пособие [Текст] / В. К. Смирнов, В. А. Шилов, Ю. В. Инарович. – Москва : Metallurgiya, 1987. – 368 с.
76. Грудев, А. П. Технология прокатного производства : учебник для вузов [Текст] / А. П. Грудев, Л. Ф. Машкин, М. И. Ханин / под общ. ред. А. П. Гудева. – Москва : Metallurgiya, 1994. – 656 с.
77. Бахтинов, В. Б. Технология прокатного производства: учебник для техникумов [Текст] / В. Б. Бахтинов. – Москва : Metallurgiya, 1983. – 488 с.
78. Литовченко, Н. В. Калибровка профилей и прокатных валков [Текст] / Н. В. Литовченко. – Москва : Metallurgiya, 1990. – 432 с.
79. Полухин, П. И. Прокатное производство: учебник для вузов, 3-е изд., перераб. и доп. [Текст] / П. И. Полухин, Н. М. Федосов, А. А. Королев. – Москва : Metallurgiya, 1982. – 696 с.
80. Дорофеев, В. В. Особенности калибровки двутавровой балки М155 для шахтных монорельсовых дорог на стане 500 [Текст] / В. В. Дорофеев, В. С. Марамзин, А. Ю. Каретников // Производство проката. – 2003. – № 11. – С. 16–18.
81. Дорофеев, В. В. Новый способ прокатки фланцевых профилей в черновых калибрах [Текст] / В. В. Дорофеев, Е. М. Пятайкин, В. С. Марамзин // Производство проката. – 1998. – № 6. – С. 24–27.
82. Скороходов, Н. Е. Калибровка сложных профилей: справочник [Текст] / Н. Е. Скороходов, Б. М. Илюкович, И. П. Шулаев [и др.] – Москва : Metallurgiya, 1979. – 230 с.
83. Целиков, А. И. Теория продольной прокатки: учеб. пособие [Текст] / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. С. Рокотян – Москва : Metallurgiya, 1980. –

380 с.

84. Бергеман, Г. В. Разработка новой прогрессивной технологии прокатки профиля бесшпечного желобчатого трамвайного рельса [Текст] / Г. В. Бергеман // Прокатное производство. – 2015. – № 2. – С. 43–48.
85. Бергеман, Г. В. Разработка новой прогрессивной технологии прокатки профиля бесшпечного желобчатого трамвайного рельса [Текст] / Г. В. Бергеман // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2015. – № 2. – С. 43–48.
86. Каретников, А. Ю. Освоение производства бесшпечных трамвайных рельсов [Текст] / А. Ю. Каретников, В. В. Дорофеев // Metallургия XXI века: сб. тр. 1-й Междунар. конф. молодых специалистов. – Москва : ВНИИметмаш. – 2005. – С. 177–190.
87. Кучко, И. И. Калибровка валков для прокатки желобчатых рельсов [Текст] / И. И. Кучко // Бюллетень ЦИИ ЧМ. – 1955. – №2. – С. 63–64.
88. Критинин, И. А. Повышение качества трамвайных желобчатых рельсов [Текст] / И. А. Критинин, В. А. Кошкин, Р. И. Дарушин, П. И. Пшеничнов, Н. П. Кудрявцев // Сталь. – 1969. – № 1. – С. 52–53.
89. Сапрыгин, Х. М. Промышленное производство облегченных трамвайных рельсов [Текст] / Х. М. Сапрыгин, И. А. Шарапов, И. И. Могилевский // Сталь. – 1982. – № 2. – С. 56–57.
90. Мец, Н. Горячая прокатка и калибровка валков [Текст] / М. Мец. – Москва; Ленинград : ОНТИ НКТП СССР. Гл. ред. лит. по чер. металлургии, 1937. – 332 с.
91. Dehez, J. Калибровка валков: пер. с нем. Э.К. Крикента [Текст] / J. Dehez. – Каменское : Днепропетровского округа, 1928. – 48 с.
92. Тринкс, В. Калибровка прокатных валков: пер. с англ. Ч.П [Текст] / В. Тринкс. – Москва; Ленинград; Свердловск : ОНТИ НКТП СССР. Гл. ред. лит. по чер. металлургии. – 1939. – 136 с.
93. Кучко, И. И. Производство трамвайных рельсов новых типов [Текст] /

- И. И. Кучко, М. Г. Серкин, И. Б. Рапопорт // Сталь. – 1956. – № 8. – С. 708–716.
94. А.с. 1776469 СССР. МПК В 21 В 1/08. Трехвалковый калибр для прокатки трамвайных рельсов / В. В. Дорофеев, И. А. Шарапов, Е. Л. Кравченко // Открытия. Изобретения. – 1992. – № 43. – С. 19.
95. Пат. 2233716 РФ. МПК В 21 В 1/08//В 21 В 108:02. Валковый узел универсального четырехвалкового калибра / В. В. Дорофеев, Е. Л. Кравченко, А. Г. Кочетков, В. И. Прибытков, А. В. Дорофеев; 200310261/02; заявл. 04.01.2003; опубл. 10.08.2004 // Открытия. изобретения. – 2004. – № 22.
96. Перетятыко, В. Н. Деформация металла в наклонных разрезных калибрах [Текст] / В. Н. Перетятыко, Е. М. Пятайкин, В. С. Марамзин, И. А. Шарапов // Известия вузов. Черная металлургия. – 1999. – № 4. – С. 23–25.
97. Перетятыко, В. Н. Деформация металла в разрезном рельсовом калибре при прокатке рельсов Р65 [Текст] / В. Н. Перетятыко, Е. М. Пятайкин, Е. Р. Браунштейн // Известия вузов. Черная металлургия. – 1998. – № 4. – С. 23–25.
98. Рождественский, Ю. В. Совершенствование технологии прокатки рельсов [Текст] / Ю. В. Рождественский // Известия вузов. Черная металлургия. – 1995. – № 9. – С. 74.
99. Смирнов, В. К. Исследование прокатки рельсов в универсальных клетях [Текст] / В. К. Смирнов, А. Р. Бондин, А. М. Михайленко // Производство проката. – 2004. – № 12. – С. 24–30.
100. Смирнов, В. К. Прокатка рельсов с применением универсальных клеток [Текст] / В. К. Смирнов, А. Р. Бондин, А. М. Михайленко // Труды пятого конгресса прокатчиков. МОО «Объединение прокатчиков». – Москва : Черметинформация, 2004. – С. 218–223.
101. Головатенко, А. В. Повышение качества железнодорожных рельсов при прокатке за счет усовершенствования системы черновых калибров в условиях нового универсального рельсопрокатного стана ЕВРАЗ ЗСМК

- [Текст] / А. В. Головатенко [и др.] // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сб. науч. докл. по материалам юбилейного 130-го заседания НП «Рельсовая комиссия» (7 – 9 октября 2014 г., г. Новокузнецк). – СПб. – 2015. – С. 201–210.
102. Головатенко, А. В. Ввод в эксплуатацию универсального рельсобалочного стана и освоение технологии производства рельсов на современном оборудовании в рельсобалочном цехе ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» [Текст] / А. В. Головатенко, К. В. Волков, И. В. Александров, Е. П. Кузнецов, В. В. Дорофеев, О. И. Сапелкин // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 6. – С. 32–38.
103. Илюкович, Б. М. Прокатка и калибровка фасонных профилей: справочник. т. 1. [Текст] / Б. М. Илюкович. – Москва : Металлургия, 1999. – 477 с.
104. Шварц, Д. Л. Теоретическое исследование прокатки рельсового профиля в универсальном калибре. Сообщение 2 [Текст] / Д. Л. Шварц // Известия вузов. Черная металлургия. – 2015. – № 7. – С. 526–529.
105. Шилов, В. А. Расчет и моделирование технологических режимов прокатки двутавровых профилей на универсальном рельсобалочном стане [Текст] / В. А. Шилов, С. О. Непряхин, Д. Л. Шварц // Сталь. – 2016. – № 8. – С. 50–54.
106. Непряхин, С. О. Закономерности течения металла и силовых воздействий при прокатке двутавров в универсальных калибрах [Текст] / С. О. Непряхин, В. А. Шилов, Д. Л. Шварц // Сталь. – 2014. – № 11. – С. 29–33.
107. Непряхин, С. О. Влияние геометрических параметров на приращение фланцев при прокатке двутавровых профилей в универсальном балочном калибре [Текст] / С. О. Непряхин, В. А. Шилов, Д. Л. Шварц // Известия вузов. Черная металлургия. – 2013. – № 9. – С. 67–68.
108. Илюкович, Б. М. Прокатка и калибровка: справочник. В 6 т. Т. 3: Калибровка с-образных профилей, профилей с отношением $0,7 \text{ в/н } 4,0$, тавровых и крестообразных профилей [Текст] / Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев,

- В. П. Капелюшный, под ред. Б. М. Илюковича. – Дніпропетровськ : Дніпро-ВАЛ, 2002. – 429 с.
109. Илюкович, Б. М. Прокатка и калибровка: справочник. В 6 т. Т. 4: Калибровка угловых и зетовых профилей [Текст] / Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев, В. П. Капелюшный, под ред. Б. М. Илюковича. – Дніпропетровськ : Дніпро-ВАЛ, 2004. – 369 с.
110. Илюкович, Б. М. Прокатка и калибровка: справочник. В 6 т. Т. 5: Калибровка швеллерообразных и корытообразных профилей [Текст] / Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев, С. Е. Меркурьев, под ред. Б. М. Илюковича. – Дніпропетровськ : Дніпро-ВАЛ, 2004. – 481 с.
111. Кучко, И. И. О рациональной калибровке рельсов [Текст] / И. И. Кучко, М. Г. Серкин, Л. И. Сороко // Сталь. – 1956. – № 5. – С. 438–445.
112. Перетяцько, В. Н. Деформация металла в разрезном рельсовом калибре при прокатке рельсов [Текст] / В. Н. Перетяцько, Е. М. Пятайкин, Е. Р. Браунштейн // Известия вузов. Черная металлургия. – 1998. – № 4. – С. 23–25.
113. Шарапов, И. А. Рациональная расточка четырехвалкового комплекта валков для прокатки рельсов [Текст] / И. А. Шарапов, В. В. Дорофеев, В. А. Бердышев, В. Е. Громов // Сталь. – 1998. – № 5. – С. 45–46.
114. Нестеров, Д. К. Производство железнодорожных рельсов из непрерывнолитых заготовок [Текст] / Д. К. Нестеров, А. Я. Глазков // Сталь. – 1995. – № 8. – С. 36–44.
115. Ерастов, В. В. Оптимизация процесса прокатки рельсов в чистовом калибре на основе полей скоростей течения металла [Текст] / В. В. Ерастов, С. Г. Литвин, В. В. Павлов [и др.] // Материалы юбилейной рельсовой комиссии: сб. докл. – Новокузнецк. – 2002. – С. 28–32.
116. Дорофеев, В. В. Производство новых прокатных профилей для ОАО «Российские железные дороги» [Текст] / В. В. Дорофеев, Е. Л. Кравченко, А. В. Дорофеев, А. Ю. Каретников // Производство проката. – 2004. – № 12. – С. 22–25.

117. Пат. 2288045 РФ, МПК 8 В 21 В 1/088. Способ прокатки симметричных профилей сложной формы / Е. М. Пятайкин, Е. Л. Кравченко, И. А. Шарапов, В. В. Дорофеев, А. Ю. Каретников, В. С. Марамзин; № 2005112379; заявл. 25.04.05; опубл. 27.11.06, Бюл. № 33.
118. Пат. 2284872 РФ, МПК 8 В 21 В 1/085. Способ прокатки асимметричных профилей / В. В. Дорофеев, Е. М. Пятайкин, Е. Л. Кравченко, В. С. Марамзин, А. Ю. Каретников, И. А. Шарапов; № 2005112380/02; заявл. 25.04.05; опубл. 10.10.06, Бюл. № 28.
119. Пат. 2103077 РФ, МПК 6 В 21 В 1/08. Система калибров для прокатки рельсов в черновых пропусках / И. А. Шарапов, В. В. Дорофеев, Г. Н. Юнин; № 93001973/02; заявл. 12.01.94; опубл. 27.01.98, Бюл. № 3.
120. Дорофеев, В. В. Усовершенствование технологии прокатки железнодорожных рельсов [Текст] / В. В. Дорофеев, В. А. Бердышев, И. А. Шарапов, В. Е. Громов // Известия вузов. Черная металлургия. – 1997. – № 4. – С. 39–41.
121. А.с. 1731305 СССР, МКИ 5 В 21 В 1/08. Чистовой двухвалковый калибр для прокатки рельсов / А. Ф. Кузнецов, И. А. Шарапов, Е. Л. Кравченко, В. В. Дорофеев, А. Р. Трынкин; № 4828123/27; заявл. 02.04.90; опубл. 07.05.92, Бюл. № 17.
122. А.с. 1607985 СССР, МКИ 5 В 21 В 1/08. Валковый узел универсального калибра для прокатки рельсов / А. Ф. Кузнецов, В. А. Осокин, А. И. Назаров, И. А. Шарапов, Е. Л. Кравченко, В. В. Дорофеев; № 4390005/27-02; заявл. 10.03.88; опубл. 23.11.90, Бюл. № 43.
123. Пат. 2241556 РФ, МПК 7 В 21 В 1/08, В 21 В 108:02. Способ прокатки рельсов / В. В. Павлов, В. В. Дорофеев, Е. Л. Кравченко, Е. М. Пятайкин, Г. Н. Юнин, В. В. Ерастов; № 2003124405/02; заявл. 04.08.03; опубл. 10.12.04, Бюл. № 34.
124. Критинин, И. А. Улучшение качества железнодорожных и остряковых рельсов [Текст] / И. А. Критинин, Н. П. Кудрявцев, И. А. Шарапов [и др.] //

- Сталь. – 1972. – № 2. – С. 148–149.
125. А.с. 16679952 СССР, МКИ 5 В 21 В 1/08. Способ прокатки несимметричных рельсовых профилей / И. А. Шарапов, Е. Л. Кравченко, В. В. Дорофеев; № 4666674/02 ; заявл. 27.03.89 ; опубл. 07.08.91, Бюл. № 29.
126. Пат. 2293615 РФ, МПК 8 В 21В 1/85. Способ прокатки несимметричных рельсовых профилей в черновых калибрах / Е. Л. Кравченко, В. В. Дорофеев, С. П. Гришин, С. В. Степанов, А. Ю. Каретников, В. С. Камнев, И. А. Шарапов; № 2005123884/02; заявл. 27.07.2005; опубл. 20.02.07, Бюл. № 5.
127. Сапрыгин, Х. М. Освоение прокатки трамвайных желобчатых рельсов с узкой подошвой [Текст] / Х. М. Сапрыгин, И. А. Шарапов, Д. К. Нестеров [и др.] // Бюл. НТИ ЧМ. – 1981. – № 11. – С. 57–59.
128. Дорофеев, В. В. Новые конструкции универсальных калибров для прокатки трамвайных желобчатых рельсов [Текст] / В. В. Дорофеев [и др.] // Тр. пятого конгресса прокатчиков (21 – 24 октября 2003 г. Череповец) МОО «Объединение прокатчиков». – Москва : Черметинформация», 2004. – С. 239–243.
129. Сметанин, С. В. Энергосиловые параметры прокатки трамвайных рельсов [Текст] / С. В. Сметанин, В. Н. Перетяцько.– Новокузнецк : изд. центр СибГИУ, 2017. – 268 с.
130. А.с. 1776469 СССР, МКИ 5 В 21 В 1/08. Трехвалковый калибр для прокатки трамвайных рельсов / И. А. Шарапов, Е. Л. Кравченко, В. В. Дорофеев; № 4762542/27; заявл. 21.11.89; опубл. 23.11.92, Бюл. № 43.
131. Пат. RU 2 403 108 С2 РФ. МПК В21В 31/00. Кассета универсальной четырехвалковой клетки для прокатки трамвайных рельсов / А. Б. Юрьев, С. В. Степанов, В. В. Дорофеев, В. Н. Перетяцько, С. В. Сметанин; № 2009101561/02; заявл. 19.01.2009; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 31.
132. Бейнон Росс, Е. Калибровка валков и расположение прокатных станов [Текст] / Е. Бейнон Росс – Москва : Metallurgizdat, 1960. – 204 с.
133. Френкель, В. Я. Пауль Эрнест, 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] /

- В. Я. Френкель. – Москва : Атомиздат, 1977. – 192 с.
134. Нефедьев, Н. Г. Опыт работы универсальной клетки на рельсобалочном стане [Текст] / Н. Г. Нефедьев // *Металлург*. – 1960. – № 5. – С. 29–31.
135. А.с. 1614869 СССР, МКИ 5 В 21 В 1/08. Способ прокатки рельсов / А. Ф. Кузнецов, И. А. Шарапов, Е. Л. Кравченко, В. В. Дорофеев; № 4404236/27-02; заявл. 06.04.88; опубл. 23.12.90, Бюл. № 47.
136. Пат. 2233716 С1 РФ, МПК В 21 В 1/08//В 21 В 108:02. Валковый узел универсального четырехвалкового калибра / В. В. Дорофеев, Е. Л. Кравченко, А. Г. Кочетков, В. И. Прибытков, А. В. Дорофеев; заявл. 04.01.2003; опубл. 10.08.2004, Бюл. № 8.
137. А.с. 1676690 А1 СССР, МКИ В 21 В 1/08. Универсальный четырехвалковый калибр / А. Ф. Кузнецов, И. А. Шарапов, Е. Л. Кравченко, А. Р. Трынкин; № 4752517/02; заявл. 23.10.89; опубл. 15.09.91, Бюл. № 34.
138. Бахтинов, Б. П. Калибровка прокатных валков [Текст] / Б. П. Бахтинов, М. М. Штернов. – Москва : Metallurgizdat, 1953. – 783 с.
139. Graefe, Y. New standards in the production of long rolled steel [Text] / Y. Graefe // *Chernaya metallurgiya*. – 2018. – № 10. – P. 48–51.
140. Kalugina, O. B. Energy efficiency improving of the high-quality rolling process by the groove shape optimization [Text] / O. B. Kalugina, D.I. Kinzin, A. B. Moller // *Izvestia Vuzov. Chernaya metallurgiya*. – 2013. – № 10. – P. 10–12.
141. Shemshurova, N. G. Improving rolls calibration of profile bending machine [Text] / N. G. Shemshurova, V. L. Kornilov, V. G. Antipanov // *Vestnik MGTU im. G. I. Nosova*, 2015. – № 3. – P. 58–63.
142. Sarancha, S. Yu. Optimization of long products rolling and cutting technology based on modern in [Text] / S. Yu. Sarancha, S. A. Levandovskiy, J. S. Statsenko // *CIS Iron and Steel Review*. – 2014. – № 1. – P. 44–49.
143. Li, H. Analysis of flatness control capability based on the effect function and roll contour optimization for 6-h CVC cold rolling mill [Text] / H. Li, Z. Zhao, J. Zhang // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. –

- № 100. – P. 9–12.
144. Wu, L. Optimisation of railhead profiles for curved tracks using improved non-uniform rational B-splines and measured profiles [Text] / L. Wu, J. Liu, M. Dhanasekar, H. Wang, Z. Wen // *Wear*. – 2019. – № 418. – P.123–132.
145. Prinz, K. Optimization-based feedforward control of the strip thickness profile in hot strip rolling [Text] / K. Prinz, A. Steinboeck, A. Kugi // *Journal of Process Control*. – 2018. – № 64. – P. 100–111.
146. Stalinskii, D. V. Production and quality of rails [Text] / D. V. Stalinskii, A. S. Rudyuk // *Steel in Translation*. – 2011. – Vol. 41. – No. 5 – P. 73–77.
147. Samoilovich, Yu. A. Possibility of producing railway rails with increased strength and minimum buckling [Text] / Yu. A. Samoilovich, // *Metallurgist*. – 2012. – Vol.55. – No. 11. – P. 903 – 911.
148. 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. – No. 9. – P. 403–407.
149. http://dzlzelcelniekiem.ucoz.lv/photo/ustrojstvo_putej_i_stancii/613-4-0-0-2.
150. Stambach, R. Das Walzen von tragern und shinen and triogerusten der kontinraseum universalwalzmverfahren [Text] / R. Stambach // *Der Kalibreur*. – 1968. – No. 9.
151. Lassent, A. Le train a'poutrelles et a'rails de l'usine d'hagauge (Sasilor) [Text] / A. Lassent // *Revue de metallurge*. – 1974. – Vol. 11. – No. 10. – P. 733–748.
152. Mennel, G. Schienenwalzung in universal gerust der modernisierung der strap hagange [Text] / G. Mennel // *Der Kalibreur*. – 1981. – No. 35. – P. 15–16.
153. Kinoshita, K. On recontraction of rail mill and newly – developed rail of Nippon Steel Corporation [Text] / K. Kinoshita, M. Hattozi, H. Hagashiga, K. Isozumi // *Nippon Steel Technical Report Overseas*. – 1973. – No. 3.
154. Svejkovsky, U. Newest technoligies for economical sections production [Text] / U. Svejkovsky // *AISE Steel Technology*. – 2002. – No. 2. – P. 33–39.
155. Frank, E. Forner. Steel Dynamics Commissions Ist new struchtrual and rail

- division [Text] / E. Forner Frank // *AISI Steel Technology*. – 2002. – No. 12. – P. 27–35.
156. 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.
157. 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. – No. 3. – P. 214–216.
158. Shvarts, D. L. Rolling of rail profiles in a universal groove. Part 1. [Text] / D. L. Shvarts // *Steel in Translation*. – 2015. – Vol. 45. – No. 6. – P. 430–435.
159. Shvarts, D. L. Rolling of rail profiles in a universal groove. Part 2. [Text] / D. L. Shvarts // *Steel in Translation*. – 2015. – Vol. 45. – No. 7. – P. 499–502.
160. 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.
161. 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. – No. 150. – P. 12–28.
162. Дорофеев, В. В. Анализ и разработка калибровки прокатных валков для производства асимметричных рельсовых профилей в условиях универсального рельсобалочного стана [Текст] / В. В. Дорофеев, А. А. Уманский, А. В. Головатенко, В. Н. Кадыков, А. В. Добрянский // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2017. – Том 60. – № 12. – С. 941–946.
163. Формоизменение металла при прокатке в двухручьевых разрезных калибрах [Текст] / Г. П. Перунов, В. К. Смирнов, Ю. В. Инатович, В. В. Лиманкин // *Производство проката*. – 2006. – №6. – С. 8–10.
164. Жучков, С. М. Энергосиловые параметры процесса деформации металла при прокатке [Текст] / С. М. Жучков, А. П. Лохматов, Л. В. Кулаков,

- Э. В. Сивак // Известия вузов. Черная металлургия. – 1998. – № 4. – С. 14–17.
165. Смирнов, В. К. Калибровка прокатных валков. Учебное пособие для вузов. Издание 2-е переработанное и дополненное [Текст] / В. К. Смирнов, В. А. Шилов, Ю. В. Инарович. – Москва : Теплотехник, 2010. – 490 с.
166. Колесников, А. Г. Особенности физического моделирования контролируемой прокатки [Текст] / А. Г. Колесников, А. В. Мунтин, А. Г. Зинягин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2013. – № 1. – С. 32–34.
167. 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.
168. 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. 29–33.
169. Шилов, В. А. Расчет формоизменения металла при прокатке рельсов в универсальных калибрах [Текст] / В. А. Шилов, Д. Л. Шварц, Р. А. Литвинов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2008. – № 3. – С. 51–54.
170. Штода, М. Н. Классификация ящичных калибров по виду напряженно-деформированного состояния [Текст] / М. Н. Штода, С. В. Ершов, С. Н. Мельник, С. Е. Нагорный // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 5. – С. 30–33.
171. Скосарь, Е. О. Температурное и напряженно-деформированное состояние металла при прокатке длинномерных рельсов [Текст] / Е. О. Скосарь, В. А. Шилов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 11. – С. 63–64.
172. Целиков, А. И. Теория продольной прокатки: учеб. пособие [Текст] / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. С. Рокотян. – Москва : Металлургия, 1980. – 380 с.
173. Казакевич, Г. С. Механика сплошных сред. Теория упругости и пластичности [Текст] / Г. С. Казакевич, А. И. Рудской. – Санкт-Петербург : изд-во СПбГПУ, 2003. – 264 с.

174. Коликов, А. П. Теория обработки металлов давлением [Текст] / А. П. Коликов, Б. А. Романцев. – Москва : НИТУ МИСиС, 2015. – 451 с.
175. Дель, Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости [Текст] / Г. Д. Дель. – Москва : Машиностроение, 1971. – 200 с.
176. Пригоровский, Н. И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений: справочник [Текст] / Н. И. Пригоровский. – Москва : Машиностроение, 1983. – 248 с.
177. Смирнов, В. С. Теория обработки металлов давлением [Текст] / В. С. Смирнов – Москва : Metallurgy, 1973. – 496 с.
178. Соколовский, В. В. Теория пластичности [Текст] / В. В. Соколовский. – Москва : Высш. шк., 1969. – 608 с.
179. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением [Текст] / М. В. Сторожев, Е. А. Попов – Москва : Машиностроение, 1971. – 424 с.
180. Томсен, Э. Механика пластических деформаций при обработке металлов / Э. Томсен, Ч. Янг, Ш. Кобаяши. – М.: Машиностроение, 1969. – 503 с.
181. Целиков, А. И. Основы теории прокатки / А. И. Целиков – Москва : Metallurgy, 1965. – 247 с.
182. Малинин, Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести: учеб. для вузов [Текст] / Н. Н. Малинин. – Москва : Машиностроение, 1968. – 400 с.
183. Надаи, А. Пластичность и разрушение твердых тел. Т. 1 [Текст] / пер. с англ. под ред. Г. С. Шапиро / А. Надаи. – Москва : Мир, 1954. – 786 с.
184. Надаи, А. Пластичность и разрушение твердых тел. Т. 2 [Текст] / пер. с англ. под ред. Г.С. Шапиро / А. Надаи. – Москва : Мир, 1969. – 863 с.
185. Власов, А. В. Программа расчета поврежденности при холодной пластической деформации металлов для постпроцессора DEFORM-3D [Текст] / А. В. Власов // Труды Всероссийской научно-практ. конф. «Инженерные системы 2009». – 2009. – С. 137–139.
186. Колмогоров, В. Л. Механика обработки металлов давлением [Текст] /

- В. Л. Колмогоров. – Екатеринбург : изд-во Уральского ГТУ, 2001. – 836 с.
187. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение [Текст] / В. Л. Колмогоров. – Москва : Metallurgiya, 1970. – 223 с.
188. Колмогоров, В. Л. Пластичность и разрушение [Текст] / В. Л. Колмогоров, А. А. Богатов [и др.] – Москва : Metallurgiya, 1977. – 336 с.
189. Колмогоров, В. Л. Механика обработки металлов давлением: учебник для вузов. [Текст] / В. Л. Колмогоров. – Москва : Metallurgiya, 1986. – 668 с.
190. Колмогоров, В. Л. Феноменологическая модель накопления повреждений и разрушения при различных условиях нагружения [Текст] / В. Л. Колмогоров, Б. А. Мигачев, В. Г. Бурдуковский – Екатеринбург : УрО РАН, 2004. – 104 с.
191. Колмогоров, В. Л. К вопросу построения обобщенной феноменологической модели разрушения при пластической деформации металлов [Текст] / В. Л. Колмогоров, Б. А. Мигачев, В. Г. Бурдуковский // Металлы. – 1995. – № 6. – С. 132–141.
192. Колмогоров, В. Л. О математическом моделировании пластических деформаций [Текст] / В. Л. Колмогоров // Производство проката. – 2003. – № 12. – С. 3–17.
193. Огородников, В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением [Текст] / В. А. Огородников. – Киев : Вища школа, 1983. – 174 с.
194. Огородников, В. А. Исследование способа выдавливания с контурной осадкой [Текст] / В. А. Огородников, И. С. Алиев, Мань Зыонг За // Теоретические и прикладные проблемы развития наукоемких и малоотходных технологий обработки металлов давлением: Тез. республ. науч.-техн. конф. – Винница, 1991. – С. 79–81.
195. Дель, Г. Д. Пластичность деформированного материала [Текст] / Г. Д. Дель // Физика и техника высоких давлений. – 1983. – № 11. – С. 28–32.
196. Дель, Г. Д. Технологическая механика [Текст] / Г. Д. Дель. – Москва : Машиностроение, 1978. – 174 с.

197. Смирнов-Аляев, Г. А. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением [Текст] / Г. А. Смирнов-Аляев, В. П. Чикидовский. – Ленинград : Машиностроение, 1972. – 360 с.
198. Бриджмен, П. У. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. Влияние высокого гидростатического давления на механические свойства материалов [Текст] / П. У. Бриджмен. – Москва : Либроком, 2010. – 446 с.
199. Богатов, А. А. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением [Текст] / А. А. Богатов, О. И. Мижирицкий, С. В. Смирнов. – Москва : Metallurgia, 1984. – 144 с.
200. Сопротивление деформации и пластичность металлов при обработке давлением: Учеб. пособие [Текст] / Ю. Г. Калпин, В. И. Перфилов, П. А. Петров, В. А. Рябов, Ю. К. Филиппов. – Москва : Изд-во МГТУ МАМИ, 2005. – 113 с.
201. Богатов, А. А. Механические свойства и модели разрушения металлов [Текст] / А. А. Богатов. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2002. – 329 с.
202. Афонин, А. Н. Моделирование разрушения металлов при пластической деформации в Deform и LS-Dyna [Текст] – 9 с. – Режим доступа: <http://www.artech-eng.ru/images/stories/Stat/Deform/Orel.pdf>.
203. Urban J. Crushing and Fracture of Lightweight Structures [Text] // PhD Thesis. – Technical University of Denmark. – 2003. – 242 p.
204. Скрипаленко, М. М. Компьютерное моделирование с использованием Procast и Deform-3D для реализации модели полного цикла производства металлопродукции [Текст] / М. М. Скрипаленко, А. В. Коротичкий // Институт экотехнологий и инжиниринга НИТУ "МИСиС". – Электронный ресурс. – Режим доступа: <http://www.myshared.ru/amp/221487>.
205. Матвеев, М. А. Оценка вероятности разрушения металла при горячей прокатке с помощью методов физического и математического моделирования

- [Текст] / М. А. Матвеев, И. А. Шишов, В. В. Мишин, П. А. Глухов, А. М. Корчагин // Черные металлы. – 2014. – № 4. – С. 55–60.
206. 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.
207. 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. – No 9. – P. 14–24.
208. Кадыков, В. Н. Исследование формоизменения поверхностных дефектов при прокатке в сортовых калибрах [Текст] / В. Н. Кадыков, А. А. Уманский, Ю. А. Мартыянов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2013. – № 6. – С. 8–12.
209. Кинзин, Д. И. Исследование эффективности калибровки сортовых профилей с помощью программы Deform-3D [Текст] / Д. И. Кинзин, С. С. Рычков // Электронный ресурс. – Режим доступа: http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_es10_maggtu1.pdf.
210. Головатенко, А. В. Анализ экспериментальной зависимости сопротивления деформации рельсовой стали Э78ХСФ от температуры, скорости и степени деформации [Текст] / А. В. Головатенко, В. В. Дорофеев, В. А. Трусков, К. В. Волков, А. В. Добрянский // Металлург. – 2014. – № 6. – С. 118–123.
211. Гарбер, Э. А. Теория прокатки: учебник для вузов [Текст] / Э. А. Гарбер, И. А. Кожевникова // рец.: Н. А. Чиченев, В. П. Анцупов. – Старый Оскол : ТНТ, 2017. – 312 с.
212. Гун, Г. Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением [Текст] / Г. Я. Гун. – Москва : Металлургия, 1983. – 352 с.
213. Тарновский, И. Я. Теория обработки металлов давлением [Текст] / И. Я. Тарновский, А. А. Поздеев, О. А. Ганаго, В. Л. Колмогоров, В. Н. Трубин, Р. А. Вайсбурд, В. И. Тарновский. – Москва : Металлургиздат, 1963. – 673 с.

214. Смирнов, В. С. Применение ЭЦВМ для расчета параметров прокатки [Текст] / В. С. Смирнов, А. К. Григорьев. – Москва : Metallurgy, 1970. – 230 с.
215. Богатов, А. А. Уральская школа калибровщиков прокатных станков [Текст] / А. А. Богатов, В. А. Шилов // Производство проката. – 2013. – № 2. – С. 35–41.
216. Няшин, Ю. И. Решение задач обработки металлов давлением методом конечного элемента [Текст] / Ю. И. Няшин, И. Н. Ананьев, А. Н. Скороходов // Известия вузов. Черная металлургия. – 1974. – № 5. – С. 74–78.
217. Ли, К. Анализ осесимметричной осадки и поперечной осадки в условиях плоской деформации сплошных цилиндрических заготовок методом конечных элементов [Текст] / К. Ли, С. Кобояси // Тр. американского общества инженеров-механиков. – Сар. В. – 1971. – № 2.
218. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы: пер. с англ. [Текст] / Р. Галлагер. – Москва : Мир, 1984. – 428 с.
219. Argiris, I. H. Energy theorems and structural analysis Aircraft Engineering [Text] / I. H. Argiris // General theory. – 1954. – Vol. 27.
220. Зенкевич, О. К. Метод конечных элементов в технике [Текст] / пер. с англ. под ред. Б.Е. Победри / О. К. Зинкевич. – Москва : Мир, 1975. – 542 с.
221. Клованич, С. Ф. МКЭ в нелинейных задачах инженерной механики [Текст] / С. Ф. Клованич. – Запорожье : изд-во журн. «Свет геотехники», 2009. – 400 с.
222. Каплунов, Б. Г. Компьютерные системы моделирования пластических деформаций: учеб. пособие [Текст] / Б. Г. Каплунов, Е. Г. Полищук, Д. С. Жиров, Е. В. Селюнина. – Челябинск : изд. ЮУрГУ, 2000. – 67 с.
223. Чумаченко, Е. Н. Математическое моделирование и оптимизация процессов деформирования материалов при обработке давлением [Текст] / Е. Н. Чумаченко, И. В. Логашина. – Москва : ООО НПП ЭКОМЕТ, 2008. – 400 с.
224. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов [Текст] /

- Л. Сегерлинд – Москва : Мир, 1979. – 392 с.
225. Степанский, Л. Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением [Текст] / Л. Г. Степанский – Москва : Машиностроение, 1979. – 215 с.
226. Чумаченко, Е. Н. Математическое моделирование течения металла при прокатке: учеб. пособие [Текст] / Е. Н. Чумаченко, И. В. Логашина – Москва : МГИЭМ, 2005. – 147 с.
227. Базайкин, В. И. Анализ конечного формоизменения и напряжений в операциях обработки металлов давлением / В. И. Базайкин, Б. М. Лебошкин, В. Е. Громов. – Москва : Недра коммюникейшн ЛТД, 2000. – 190 с.
228. Рыбин, Ю. И. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением [Текст] / Ю. И. Рыбин, А. И. Рудской, А. М. Золотов. – Санкт-Петербург : Наука, 2004. – 644 с.
229. Субич, В. Н. Расчет и проектирование процессов объемной и листовой штамповки. Учебное пособие [Текст] / В. Н. Субич, Н. А. Шестаков, В. А. Демин, А. В. Власов. – Москва : МГИУ, 2007. – 414 с.
230. An Innovative Manufacturing Process of Gerdau Corsa [Text] / A. I. de Faria Junior, A. Voltolina, L. Gori // AISTech 2016 Proceedings. – P. 2297–2306.
231. Тимофеева, М. А. Новая методика моделирования параметров трения в очаге деформации дрессировочного стана [Текст] / М. А. Тимофеева, Э. А. Гарбер // Бюллетень "Черная металлургия" – 2017. – № 8. – С. 60–64.
232. Филиппова, М. В. Математическое моделирование прокатки шаров [Текст] / М. В. Филиппова, М. В. Темлянцев, В. Н. Перетяцько, Е. Е. Прудкий // Известия вузов. Черная металлургия. – 2017. – том 60. – № 7. – С. 516–520.
233. Шварц, Д. Л. Современное развитие вариационных методов решения задач сортовой прокатки [Текст] / Д. Л. Шварц, В. А. Шилов, С. О. Непряхин // Производство проката. – 2016. – № 5. – С. 18–21.
234. Данченко, В. Н. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Численные методы [Текст] / В. Н. Данченко,

- А. А. Миленин, В. И. Кузьменко, В. А. Гринкевич. – Днепропетровск : Системные технологии, 2005. – 448 с.
235. Desing Enviroment for FORMing. Сайт компании Scientific Forming Technologies Corporation. Точка доступа – www.deform.com.
236. DEFORM™-3D: tutorials. – SFTC, 2003. – 139 с.
237. Бузлаев, Д. В. Применение системы DEFORM для моделирования технологических процессов обработки металлов давлением [Текст] / Д. В. Бузлаев, В. А. Кропотов, А. А. Сахарчук, А. А. Харламов. – Москва : ТЕСИС, 2001. – 13 с.
238. Guerrero, M. A. Hot rolling process simulation. Application to UIC-60 rail rolling [Text] / M. A. Guerrero, J. Belzunce, M. C. Betegón, J. Jorge, J. Fco Vigil. // Proceedings of the 4th IASME/WSEAS International Conference on CONTINUUM MECHANICS (CM'09) – 2018. – P. 213.
239. Харламов, А. А. Моделирование обработки металлов давлением с помощью комплекса DEFORM [Текст] / А. А. Харламов, А. П. Латаев, В. В. Галкин, П. В. Уланов // САПР и графика. – 2005. – № 5. – С. 2–4.
240. Харламов, А. А. DEFORM – программный комплекс для моделирования процессов обработки металлов давлением [Текст] / А. А. Харламов, А. П. Уваров // САПР и графика. – 2003. – № 6. – С. 10–15.
241. Kobayashi, S. Metallforming and the FiniteElement Method [Text] / S. Kobayashi, S. I. Oh, T. Altan – Oxford University Press, 1989.
242. Паршин, В. С. Практическое руководство к программному комплексу Deform-3D: учебн. пособие [Текст] / В. С. Паршин, А. П. Карамышев, И. И. Некрасов, А. И. Пугин, А. А. Федулов. – Екатеринбург : УрФУ, 2010. – 266 с.
243. Негода, А. В. Ликвация в непрерывнолитой заготовке рельсовой стали [Текст] / А. В. Негода, Н. А. Козырев, Н. Н. Тиммерман // Известия вузов. Черная металлургия. – 1997. – № 4. – С. 23–24.
244. Дементьев, В. П. Ликвация в профиле Р65 рельсовой стали [Текст] /

- В. П. Дементьев, Н. А. Козырев, Р. А. Гизатулин, П. Е. Сычев // Известия вузов. Черная металлургия. – 2002. – № 10. – С. 53–54.
245. Поляков, В. В. Основы технологии производства железнодорожных рельсов [Текст] / В. В. Поляков, А. В. Великанов. – Москва : Металлургия, 1990. – 416 с.
246. Пикус, Н. И. Качество железнодорожных рельсов из непрерывнолитой стали [Текст] / Н. И. Пикус, В. В. Несвет, А. А. Ситало [и др.] // Сталь. – 1999. – № 7. – С. 65–67.
247. Перетятыко, В. Н. Формоизменение металла в трапецеидальных калибрах при прокатке рельсов Р65 [Текст] / В. Н. Перетятыко, Е. М. Пятайкин, В. В. Дорофеев [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 1998. – № 8. – С. 41–43.
248. Дорофеев, В. В. Новая технология прокатки рельсов из непрерывнолитой заготовки в черновых калибрах [Текст] / В. В. Дорофеев, В. В. Кузнецов, А. В. Дорофеев // Перспективные промышленные технологии и материалы: Сб. ст. – Новосибирск, 2004. – С. 93–110.
249. Грудев, А. П. Захватывающая способность прокатных валков [Текст] / А. П. Грудев. – Москва : Интермет Инжиниринг – 1998. – 283 с.
250. Смирнов, Е. Н. Развитие подходов к исследованию на физических моделях механизмов "залечивания" дефектов сплошности осевой зоны непрерывнолитой заготовки [Текст] / Е. Н. Смирнов, В. А. Скляр, В. А. Белевитин [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2016. – т. 59. – № 5. – С. 322–326.
251. Dyja, H. The analysis of the influence of varying types of shape grooves on the behavior of internal material discontinuities during rolling [Text] / H. Dyja, K. Sobczak, A. Kawalek // Metalurgija. – 2013. – № 1. – С. 35–38.
252. Анализ влияния калибровки валков на состояние внутренних несплошностей в материале при прокатке. Перевод статьи [Текст] // Новости чер. металлургии за рубежом. – 2013. – № 3. – С. 65–67.

253. Юнин, Г. Н. Технология прокатки остряковых рельсов на универсальном рельсопрокатном стане АО "ЕВРАЗ ЗСМК" [Текст] / Г. Н. Юнин, А. В. Головатенко, В. В. Дорофеев, А. В. Добрянский // Путь и путевое хозяйство. – 2017. – № 7. – С. 24–27.
254. Михайленко, А. М. Блочная структура рельсовых калибровок [Текст] / А. М. Михайленко, Д. Л. Шварц // Производство проката. – 2017. – № 6. – С. 16–20.
255. Матвеев, Б. Н. Современные рельсопрокатные станы [Текст] / Б. Н. Матвеев // Бюллетень Черная металлургия. – 2006. – № 2. – С. 40–43.
256. Смирнов, В. К. Производство рельсов с применением универсальных клетей за рубежом / В. К. Смирнов, В. А. Паршин, В. М. Смирнов [и др.] // Черная металлургия: Бюл. ин-та "Черметинформация". – 1983. – № 20. – С. 28–39.
257. Артамонова, Е. А. Производство рельсового проката повышенного качества за рубежом [Текст] / Е. А. Артамонова // Черная металлургия. Бюл. ин-та "Черметинформация". – 1984. – № 6. – С. 16–24.
258. Никитина, Л. А. Состояние и перспективы развития производства проката в России и за рубежом. Ч. IV [Текст] / Л. А. Никитина // Производство проката. – 2000. – № 11. – С. 2–10.
259. 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.
260. Шилов, В. А. Приращение и утяжка фланцев при прокатке рельсов в универсальных калибрах [Текст] / В. А. Шилов, Д. Л. Шварц, Р. А. Литвинов // Производство проката. – 2010. – № 7. – С. 27–30.
261. Хайкин, Б. Е. О совокупности критериев, характеризующих очаг деформации [Текст] / Б. Е. Хайкин, И. Я. Тарновский, В. Б. Ляшков // Известия вузов. Черная металлургия. – 1965. – № 4. – С. 102–107.
262. Протодяконов, М. М. Методика рационального планирования экспериментов [Текст] / М. М. Протодяконов, Р. И. Тедер. – Москва : Наука,

1970. – 76 с.

263. Адлер, Ю. П. Введение в планирование эксперимента [Текст] / Ю. П. Адлер. – Москва : Металлургия, 1968. – 155 с.
264. Горский, В. Г. Планирование промышленных экспериментов [Текст] / В. Г. Горский, Ю. П. Адлер. – Москва : Металлургия, 1974. – 264 с.
265. Хикс, Ч. Основные принципы планирования эксперимента: пер. с англ. [Текст] / Ч. Хикс. – Москва : Мир, 1967. – 407 с.
266. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных [Текст] / Пер. с англ. под ред. Э. К. Лецкого / Н. Джонсон, Ф. Лион. – Москва : Мир, 1980. – 610 с.
267. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента [Текст] / Н. Джонсон, Ф. Лион. – Москва : Мир, 1981. – 520 с.
268. Ермаков, С. М. Математическая теория планирования эксперимента [Текст] / Под ред. С. М. Ермакова / С. М. Ермаков, В. З. Бродский, А. А. Жиглявский, В. П. Козлов, М. Б. Малютков, Б. Б. Мелас, Е. В. Седунов, В. В. Федоров. – Москва : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. – 392 с.
269. Леушин, И. О. Моделирование процессов и объектов в металлургии: учебник [Текст] / И. О. Леушин. – Москва : Форум; инфра-М, 2013. – 208 с.
270. Новик, Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов [Текст] / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов – Москва : Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с.
271. Бродский, В. З. Введение в факторное планирование эксперимента [Текст] / В. З. Бродский. – Москва : Наука, 1976. – 224 с.
272. 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.
273. Целиков, А. И. Теория расчета усилий в прокатных станах: монография [Текст] / А. И. Целиков. – Москва : Металлургия, 1962. – 494 с.

274. Целиков, А. И. Теория прокатки: справочник [Текст] / А. И. Целиков, А. Д. Томленов, В. И. Зюзин [и др.] – Москва : Metallurgy, 1982. – 335 с.
275. Зайков, М. А. Процесс прокатки [Текст] / М. А. Зайков, В. П. Полухин, А. М. Зайков, Л. Н. Смирнов. – Москва : МИСиС, 2004. – 640 с.
276. Целиков, А. И. Основные положения современной теории продольной прокатки [Текст] / в кн. Академик А. И. Целиков. – Москва : Наука, 2003. – С. 475–501.
277. Бровман, М. Я. Проблемы реальной точности расчета энергосиловых параметров прокатки [Текст] / в кн. Обработка металлов давлением / М. Я. Бровман, В. П. Полухин. – Москва : Интермет-Инжиниринг, 2004. – С. 150–159.
278. Дрозд, В. Г. Контактные напряжения и усилия при прокатке фасонных профилей [Текст] / В. Г. Дрозд // Конструкция, расчет и исследование новых линий и агрегатов прокатных станов. – 1975. – С. 150–158.
279. Дрозд, В. Г. Исследование процесса прокатки экономичных фасонных профилей [Текст] / В. Г. Дрозд // Труды ВНИИМЕТМАШ. – 1964. – №14. – С. 74–91.
280. Коновалов, Л. В. Расчет энергосиловых параметров при прокатке в фасонных калибрах [Текст] / Л. В. Коновалов, К. В. Горев // Труды ВНИИМЕТМАШ. – 1976. – С. 143–150.
281. Хензель, А. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: справ. изд.; пер. с нем. [Текст] / А. Хензель, Т. Шпиттель – Москва : Metallurgy, 1982. – 360 с.
282. Лукашкин, Н. Д. Обработка металлов давлением. Учебное пособие [Текст] / Н. Д. Лукашкин, Л. С. Кохан. – Москва : МГВМИ, 2006. – 424 с.
283. Валквист, Г. Исследование энергосиловых параметров при горячей прокатке металла [Текст] / Г. Валквист. – Москва : Metallurgizdat, 1957. – 112 с.
284. Уманский, А. А. Совершенствование режима прокатки железнодорожных

- рельсов в обжимных клетях универсального рельсобалочного стана [Текст] / А. А. Уманский, А. В. Головатенко, В. Н. Кадыков // Черные металлы. – 2016. – № 11. – С. 16–21.
285. Уманский, А. А. Совершенствование режимов прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане с использованием методов физического моделирования процессов деформации [Текст] / А. А. Уманский, А. В. Головатенко, В. Н. Кадыков // Производство проката. – 2016. – №7. – С. 27–32.
286. Шварц, Д. Л. Теоретическое исследование прокатки рельсового профиля в универсальном калибре. Сообщение 1 [Текст] / Д. Л. Шварц // Известия вузов. Черная металлургия. – 2015. – № 6. – С. 448–454.
287. 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.
288. Шварц, Д. Л. Силовые воздействия при прокатке рельсового профиля в универсальном калибре [Текст] / Д. Л. Шварц, В. А. Шилов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2009. – № 11. – С. 25–29.
289. Василев, Я. Д. Теория продольной прокатки. Учеб. для магистров вузов. [Текст] / Я. Д. Василев, А. А. Минаев. – Донецк : УНИТЕХ, 2010. – 456 с.
290. Никитин, Г. С. Теория непрерывной продольной прокатки: учебное пособие [Текст] / Г. С. Никитин. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 399 с.
291. Рудской, А. И. Теория и технология прокатного производства [Текст] / А. И. Рудской, В. А. Лунев. – Санкт-Петербург : Наука, 2008. – 527 с.
292. Целиков, А. Н. Теория прокатки : учебник [Текст] / А. Н. Целиков, А. И. Гришков. – Москва : Металлургия, 1979. – 358 с.
293. Целиков, А. И. Теория расчета усилий при прокатке [Текст] / А. И. Целиков. – Москва : Металлургиздат, 1962. – 96 с.

294. Чекмарев, А. П. Теория продольной прокатки [Текст] / А. П. Чекмарев, А. А. Нефедов, В. А. Николаев. – Харьков : изд-во Харьковского ун-та, 1965. – 212 с.
295. Бровман, М. Я. Анализ экспериментальных данных по энергосиловым параметрам прокатки [Текст] / М. Я. Бровман // Производство проката. – 2014. – № 11. – С. 3–10.
296. Лехов, О. С. Исследование напряженно-деформированного состояния системы валки-полоса при прокатке широкополочной балки в клетях универсально-балочного стана [Текст] / О. С. Лехов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 10. – С. 37–40.
297. Перунов, Г. П. Оценка силовой загрузки подшипников вертикальных валков универсальных рабочих клеток балочных станов [Текст] / Г. П. Перунов, М. И. Журухин, Ю. В. Инатович // Производство проката. – 2014. – № 10. – С. 29–33.
298. 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.
299. Непряхин, С. О. Новый метод расчета формоизменения металла и энергосиловых параметров при прокатке в универсальном балочном калибре [Текст] / С. О. Непряхин, В. А. Шилов, Д. Л. Шварц // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 5. – С. 67–68.
300. Николаев, В. А. Определение силы прокатки по мощности главного двигателя [Текст] / В. А. Николаев // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2014. – № 1. – С. 52–55.
301. Пасечник, Н. В. Проблемы точности расчетов силовых воздействий при горячей продольной прокатке [Текст] / Н. В. Пасечник, В. Г. Дрозд // Неделя металлов в Москве, 09-12 ноября 2010 г.: Сборник трудов конференций. – Москва, 2011. – С. 221–231.

302. Пат. 1676690 А1 СССР. МПК В21 В 1/08. Универсальный четырехвалковый калибр // А. Ф. Кузнецов, И. А. Шарапов, Е. Л. Кравченко, А. Р. Трынкин; № 4752517/02; заявл 23.10.89; опубл. 15.09.91. Бюл. №34.
303. Шварц, Д. Л. Метод оперативного контроля усилий и крутящих моментов прокатки [Текст] / Д. Л. Шварц, Ю. В. Шилов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2011. – № 11. – С. 54–56.
304. Сталинский, Д. В. Компьютерная программа расчета технологических параметров прокатки [Текст] / Д. В. Сталинский [и др.] // Сталь. – 2014. – № 3. – С. 53–56.
305. Томленов, А. Д. Приближенный энергетический метод определения усилий, вызывающих пластическое течение металлов [Текст] / А. Д. Томленов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1962. – № 8. – С. 8–11.
306. Степанский, Л. Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением [Текст] / Л. Г. Степанский. – Москва : Машиностроение, 1979. – 215 с.
307. Рокотян, Е. С. Исследование типового блюминга 1000 конструкции ЦКБММ ЦНИИТМАШ [Текст] / Е. С. Рокотян // Прокатные станы: Сб. науч. тр. ЦНИИТМАШ. – Москва: Машгиз, 1955. С. 158–178.
308. Гуревич, А. Е. Методы исследования прокатных станов [Текст] / А. Е. Гуревич, Е. С. Рокотян. – Москва : Metallurgizdat, 1967. – 494 с.
309. Рокотян, Е. С. Энергосиловые параметры обжимных и листовых станов [Текст] / Е. С. Рокотян, С. Е. Рокотян. – Москва : Metallurgiya, 1968. – 272 с.
310. Бровман, М. Я. Энергосиловые параметры и усовершенствование технологии прокатки [Текст] / М. Я. Бровман. – Москва : Metallurgiya, 1995. – 256 с.
311. Поляков, Б. Н. Нагруженность, несущая способность и долговечность прокатного оборудования [Текст] / Б. Н. Поляков, Ю. И. Няшин, И. Ф. Волегов, Л. Ф. Трусов. – Москва : Metallurgiya, 1990. – 319 с.
312. Максименко, О. П. Анализ силового взаимодействия в очаге деформации при прокатке [Текст] / О. П. Максименко, Д. И. Лобойко, Р. Я. Романюк //

- Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 6. – С. 47–49.
313. Шилов, В. А. Скоростные режимы прокатки рельсов в непрерывных реверсивных группах клетей современного рельсобалочного стана [Текст] / В. А. Шилов, Д. Л. Шварц, Р. А. Литвинов // Производство проката. – 2008. – № 7. – С. 30–33.
314. Путноки, А. Ю. Динамика взаимодействия клетей в переходных режимах непрерывной прокатки с учетом крутильных колебаний в линиях главного привода валков [Текст] / А. Ю. Путноки, В. В. Веренев // Бюллетень Черная металлургия. – 2016. – № 2. – С. 53–56.
315. Сталинский, Д. В. Компьютерная программа расчета технологических параметров прокатки [Текст] / Д. В. Сталинский, А. С. Рудюк, В. С. Медведев, А. И. Кривоносов, С. Б. Стрюков // Сталь. – 2014. – № 3. – С. 53–56.
316. Тягунов, В. А. Режимы прокатки на реверсивных станах [Текст] / В. А. Тягунов. – Свердловск : Металлургиздат, 1954. – 136 с.
317. Выдрин, В. Н. Динамика прокатных станов [Текст] / В. Н. Выдрин. – Свердловск : Металлургиздат, 1960. – 256 с.
318. Целиков, А. И. Теория продольной прокатки : учебное пособие [Текст] / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. С. Рокотян. – Москва : Металлургия, 1980. – 380 с.
319. Дукмасов, В. Г. Производство точного проката [Текст] / В. Г. Дукмасов, В. Н. Выдрин, О. И. Тищенко. – Москва : Металлургия, 1990. – 168 с.
320. Есипов, В. Д. Прокатка специальных профилей сложной формы [Текст] / В. Д. Есипов. – Киев : Техніка, 1985. – 190 с.
321. 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.
322. Минкин, А. В. Расчет систем вытяжных калибров: Научное издание [Текст] / А. В. Минкин. – Москва : Металлургиздат, 2011. – 264 с.
323. Гринавцев, В. Н. Исследование контактных нормальных напряжений при

- прокатке двутавров в четырехвалковом калибре [Текст] / В. Н. Гринавцев, Ю. В. Рождественский // Известия вузов. Черная металлургия. – 1997. – № 7. – С. 28–30.
324. Буркин, С. П. Кинематические и силовые параметры прокатки в четырехвалковых калибрах [Текст] / С. П. Буркин, Р. Ф. Исхаков, Е. А. Андрюкова // Известия вузов. Черная металлургия. – 2008. – № 10. – С. 34–40.
325. Гринавцев, В. Н. Определение усилий при прокатке двутавров в ребровом четырехвалковом калибре [Текст] / В. Н. Гринавцев, Ю. В. Рождественский // Известия вузов. Черная металлургия. – 1995. – № 1. – С. 28–29.
326. Исхаков, Р. Ф. Исследование процесса прокатки прутков и труб в четырехвалковых калибрах [Текст] / Р. Ф. Исхаков, С. П. Буркин // Производство проката. – 2011. – № 3. – С. 37–44.
327. Николаев, В. А. Энергосиловые параметры прокатки в четырехвалковых калибрах [Текст] / В. А. Николаев // Сталь. – 2005. – № 8. – С. 56–58.
328. Литовченко, Н. В. Калибровка профилей и прокатных валков [Текст] / Н. В. Литовченко. – Москва : Металлургия, 1990. – 432 с.
329. А.с. 1676690 РФ, МПК В 21 В 1/08. Универсальный четырехвалковый калибр / А. Ф. Кузнецов, И. А. Шарапов, Е. Л. Кравченко, А. Р. Трынкин; № 4752517/02; заявл. 23.10.89; опубл. 15.09.91, Бюл. № 34.
330. Пат. 2233716 С1 РФ, МПК В 21 В 1/08//В 21 В 108:02. Валковый узел универсального четырехвалкового калибра / В. В. Дорофеев, Е. Л. Кравченко, А. Г. Кочетков, В. И. Прибытков, А. В. Дорофеев; № 2003100261/02; заявл. 04.01.2003; опубл. 10.08.2004, Бюл. №8.
331. Пат. 2241556 РФ, МПК 7 В 21 В 1/08, В 21 В 108:02. Способ прокатки рельсов / В. В. Павлов, В. В. Дорофеев, Е. Л. Кравченко, Е. М. Пятайкин, Г. Н. Юнин, В. В. Ерастов; № 2003124405/02; заявл. 04.08.03; опубл. 10.12.04, Бюл. № 34.
332. Пат. RU 2394660С2. РФ, МПК В21В 1/08. Способ прокатки рельсов /

- В. В. Дорофеев, А. Б. Юрьев, А. Ю. Каретников, С. В. Степанов, А. В. Мезенцев, С. В. Дорофеев; № 2008135537/02; заявл. 01.09.2008; опубл. 20.07.2010, Бюл. № 7.
333. Снитко, Ю. П. Современное состояние производства рельсов за рубежом [Текст] / Ю. П. Снитко, А. Х. Галямов, С. В. Никитин // Материалы юбилейной рельсовой комиссии 2002; Сб. науч. трудов. – Новокузнецк, 2002. С. 10–20.
334. Пат. 1225622 СССР. МПК В 21 В 1/08. Способ изготовления рельсов / В. К. Смирнов, В. А. Паршин, А. Р. Бондин, С. В. Маслов, Б. П. Гуселетов; № 3817929/22-02; заявл. 30.11.84; опубл. 23.04.86, Бюл. № 15.
335. Зибель, Э. Обработка металлов в пластическом состоянии. Пер. с нем. [Текст] / Э. Зибель. – Москва : Metallurgizdat, 1934. – 400 с.
336. Зиновьев, А. В. Теория обработки металлов давлением. Раздел трение в процессах прокатки. Учебное пособие [Текст] / Под. ред. П. И. Полухина / А. В. Зиновьев, Ю. П. Чумаков. – Москва : МИСиС, 1983. – 80 с.
337. Уманский, А. А. Анализ и разработка универсальной математической модели расчета сопротивления деформации рельсовой стали Э78ХСФ при прокатке [Текст] / А. А. Уманский, А. В. Головатенко, В. Н. Кадыков // Теоретические и прикладные аспекты современной науки – 2014. – № 4. – С. 182–187.
338. Боровиков, В. П. STATISTIKA® – Статистический анализ и обработка данных в среде Windows® [Текст] / В. П. Боровиков, И. П. Боровиков. – Москва : Информационно-издательский дом «Филинь», 1997. – 608 с.
339. Линник, Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической обработки наблюдений [Текст] / Ю. В. Линник. – Москва : Физматгиз, 1982. – 320 с.
340. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ [Текст] / Пер. с англ. / Н. Дрейпер, Г. Смит – Москва : Статистика, 1973. – 351 с.
341. Додж, М. Эффективная работа с Excel 7.0 для Windows [Текст] / Пер. с

- англ. / М. Додж, К. Кината, К. Стансон. – Санкт-Петербург : Питер, 2005. – 1088 с.
342. Закс, Л. Статистическое оценивание [Текст] / Пер. с нем. / Л. Закс. – Москва : Статистика, 1976. – 598 с.
343. Химмельблау, Д. Анализ процессов статистическими методами [Текст] / Пер. с англ. / Д. Химмельблау. – Москва : Мир, 1973. – 957 с.
344. Ганин, Н. Б. Компас 3D V7 [Текст] / Н. Б. Ганин. – Москва : ДМК Пресс, 2005. – 384 с.
345. Темлянцев, М. В. Окисление и обезуглероживание стали в процессах нагрева под обработку давлением [Текст] / М. В. Темлянцев, Ю. Е. Михайленко. – Москва : Теплотехник, 2006. – 200 с.
346. Павлов, В. В. Перспективные технологии тепловой и термической обработки в производстве рельсов: монография [Текст] / В. В. Павлов, М. В. Темлянцев, Л. В. Корнева, А. Ю. Сюсюкин. – Москва : Теплотехник, 2007. – 280 с.
347. Пат. 2440427 С1 РФ. МПК В 21 В 1/08//В 21 В 108:02. Способ производства рельсов / Е. М. Пятайкин, Н. И. Бедарев, А. А. Иванов, Е. А. Колотов, Л. В. Корнева, Е. А. Горбунова, В. В. Могильный, А. В. Мезенцев, Е. А. Нюняев, А. Ю. Сюсюкин, Е. Г. Закаулов, А. И. Ткачев, С. В. Сметанин [и др.]; № 2010133340/02; заявл. 09.08.2010; опубл. 20.01.2012., Бюл. № 2.
348. Горелова, Г. В. Теория вероятностей и математическая статистика в примерах и задачах с применением Excel [Текст] / Г. В. Горелова. – Москва : Феникс, 2005. – 476 с.
349. Пат. 2595082 РФ. МПК В21В 1/08. Способ прокатки рельсов / В. Н. Перетятыко, С. В. Сметанин, А. Б. Юрьев, М. В. Темлянцев, М. В. Филиппова; № 2015116829/02; заявл. 30.04.2015; опубл. 20.08.2016, Бюл. № 23.
350. Пат. 2604076 РФ. МПК В21В 31/02. Способ прокатки трамвайных желобчатых рельсов и чистовой четырехвалковый калибр для прокатки

трамвайных желобчатых рельсов / В. Н. Перетяцько, С. В. Сметанин, А. Б. Юрьев, М. В. Темлянцев, М. В. Филиппова; № 2015118469/02; заявл. 18.05.2015; опубл. 10.12.2016, Бюл. №34.

351. Руководство iBaAnaliser. Программа анализа V1.0. [Текст] // издатель iBaAG, Königswarterstr. 2009. – 272 с. – Режим доступа: www.iba-ag.com.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ



УТВЕРЖДАЮ

Управляющий директор
АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-
Сибирский металлургический комбинат»,
доктор технических наук, доцент

 А.Б. Юрьев
20 ноября 2018 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы
Сметанина Сергея Васильевича
на соискание ученой степени доктора технических наук

В процессе выполнения диссертационной работы Сметаниным С.В. было проведено большое количество научно-исследовательских работ с применением математического и физического моделирования, по результатам которых были получены новые научные знания о напряженно-деформированном состоянии металла и энергосиловым параметрам прокатки трамвайных рельсов.

Для проверки адекватности проведенного математического моделирования, выполненного в специализированном программном комплексе, были проведены многочисленные промышленные эксперименты по прокатке трамвайных рельсов на действующем рельсобалочном прокатном стане АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК»). Проведенные промышленные эксперименты показали хорошую сходимость с результатами математического моделирования, что говорит об адекватности проведенного исследования.

Разработанные Сметаниным С.В. научные основы технологии прокатки трамвайных рельсов успешно применяются на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» для разработки калибровок сложных асимметричных фланцевых профилей, в том числе и для трамвайных рельсов по Европейскому стандарту EN 14811:2006+A1:2009 «Железные дороги. Верхнее строение пути. Специальные рельсы. Желобчатые рельсы и сопутствующие конструкционные профили».



На основании полученных новых научных данных изложенных в диссертационной работе Сметанина С.В. была разработана и успешно внедрена в промышленное производство на АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» единственная в России и странах СНГ энергоэффективная технология прокатки трамвайных рельсов по ГОСТ Р 55941-2014 «Рельсы трамвайные желобчатые» на современном рельсобалочном прокатном стане. Применение новой технологии в рельсобалочном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК» позволило на 20–25% уменьшить значения крутящего момента при захвате металла валками, обеспечить отсутствие динамических ударов при захвате полосы и повысить надежность оборудования главной линии прокатного стана. Разработанная технология прокатки трамвайных рельсов позволила увеличить производительность прокатного стана на 10%, повысить стойкость прокатных валков на 17% и увеличить межремонтный цикл оборудования прокатных клетей на 23%. Экономический эффект от внедрения предложенных мероприятий составил 82 млн.руб./год.

Председатель комиссии:

Директор по рельсовому
производству АО «ЕВРАЗ ЗСМК»,
кандидат технических наук



А.В. Головатенко

Члены комиссии:

Начальник
рельсобалочного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

А.В. Лапченко

Главный калибровщик АО «ЕВРАЗ ЗСМК»,
доктор технических наук

В.В. Дорофеев

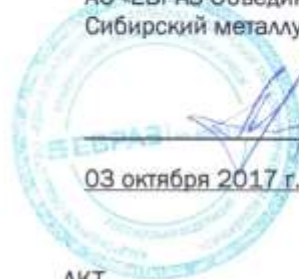
Начальник отдела технического
контроля АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Е.В. Поляков



УТВЕРЖДАЮ

Директор по рельсовому производству
АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно -
Сибирский металлургический комбинат»



А.В.Лапченко

03 октября 2017 г.

АКТ

использования результатов диссертационной работы

Сметанина Сергея Васильевича

на соискание ученой степени доктора технических наук

Настоящим актом подтверждается, что по результатам выполнения комплекса научно-исследовательских и опытно-технологических работ, а так же промышленного освоения технологий прокатки асимметричных рельсовых профилей в рамках диссертационной работы Сметанина С.В. на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.05 – Обработка металлов давлением, в рельсобалочном цехе АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК») за период 2009 – 2017 год разработаны и внедрены новые технологии прокатки, а так же новые научные знания, которые применяются при разработке калибровок для прокатки асимметричных сложных фланцевых профилей, в том числе и для прокатки трамвайных желобчатых рельсов типа РТ58, РТ60Е, РТ62, РТ62Е по ГОСТ Р 55941–2014 «Рельсы трамвайные желобчатые»:

- впервые установлено распределение интенсивности деформаций, интенсивности напряжений, запаса пластичности металла при прокатке в черновых двухвалковых, предчистовых и чистовых четырехвалковых калибрах при прокатке трамвайных рельсов;
- в четырехвалковых калибрах определены закономерности интенсивности деформаций, интенсивности напряжений и запаса пластичности металла в зависимости от изменения диаметров вертикальных валков;
- получены новые научные знания по распределению осевой пористости и ее завариванию в зависимости от конфигурации и последовательности черновых двухвалковых калибров;
- предложена новая методика определения контактной площади при прокатке сложных профилей с использованием графического твердотельного компьютерного моделирования. Данный подход возможно использовать для всех прокатываемых профилей в двух-, трех- и четырехвалковых калибрах;
- получены новые результаты последовательного заполнения очага деформации и контактные площади при прокатке трамвайного рельса на современном рельсобалочном прокатном стане;
- впервые установлено, что сила прокатки, полученная с учетом графического определения контактной площади с помощью систем твердотельного моделирования, хорошо совпадает с результатами промышленного эксперимента, и меньше, чем при использовании метода «приведенной полосы»;



- экспериментальные данные показали, что горизонтальная сила со стороны вертикального вала с разрезным гребнем отличается от силы прокатки со стороны гладкого вала в зависимости от смещаемого объема металла;

- впервые установлено оптимальное соотношение смещаемых объемов металла вертикальными валами и получаемые при этом усилия прокатки в четырехвалковом калибре. Получены математические модели данных зависимостей;

- получены уравнения регрессии по нахождению коэффициентов приращения и утяжки фланцев подошвы и головки трамвайного рельса при прокатке;

- разработаны новые рациональные скоростные режимы прокатки в чистовой непрерывной реверсивной группе клетей обеспечивающие максимальную производительность прокатного стана;

- получены теоретические и экспериментальные диаграммы скоростей и нагрузочные диаграммы, позволяющие оценить изменения значений крутящего момента в процессе прокатки и эффективно использовать резервные мощности главного привода прокатного стана;

- предложен новый подход при прокатке сложных асимметричных профилей, в четырехвалковых калибрах, который позволяет разрабатывать энергоэффективные технологии прокатки с оптимальным распределением усилия прокатки в горизонтальной плоскости от действия вертикальных валков.

В рамках диссертационной работы Сметанина С.В. в рельсобалочном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК» внедрены следующие разработки признанные изобретениями:

1. Патент №2403108 «Кассета универсальной четырехвалковой клетки для прокатки трамвайных рельсов» (19.01.2009 г.);

2. Патент №2440427 «Способ производства рельсов» (09.10.2010 г.);

3. Патент №2595082 «Способ прокатки рельсов» (30.04.2015 г.);

4. Патент №2604076 «Способ прокатки трамвайных желобчатых рельсов и чистовой четырехвалковый калибр для прокатки трамвайных желобчатых рельсов» (18.05.2015 г.);

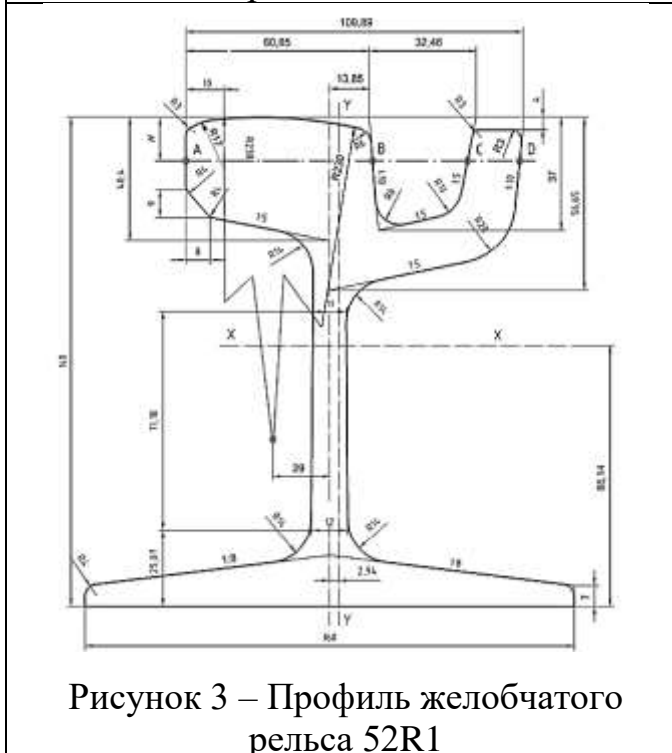
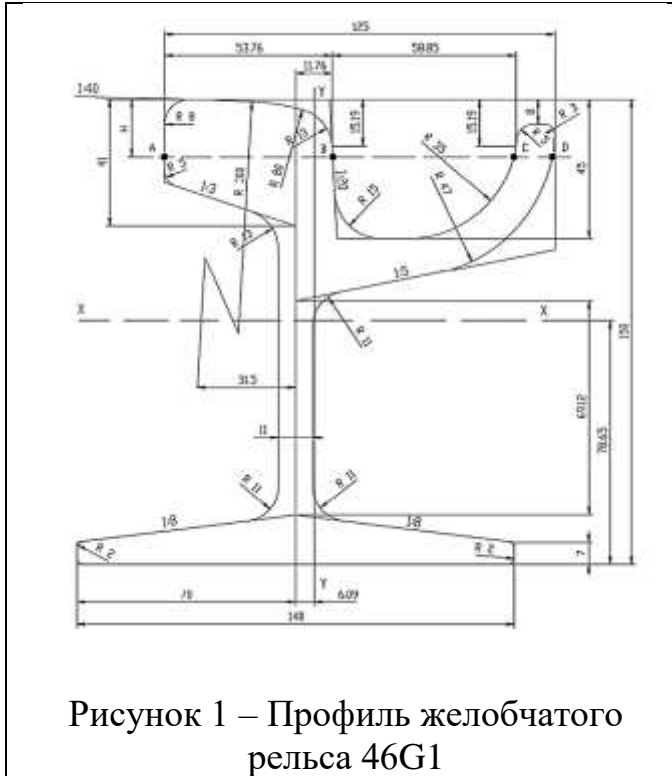
Проведенные обширные научные исследования и промышленные эксперименты позволили разработать и внедрить в производство единственную в России и странах СНГ, новую энергоэффективную технологию прокатки трамвайных желобчатых рельсов с применением непрерывной чистовой реверсивной группы клетей на рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Полученные новые научные знания открывают прогрессивные направления развития теории и практики горячей прокатки сложных асимметричных фланцевых профилей. Полученные результаты и новые научные знания, позволяют модернизировать существующие и разрабатывать новые оптимальные энергоэффективные технологии горячей прокатки сложных асимметричных фланцевых профилей, при прокатке которых в качестве предчистовых и чистовых калибров применяются непрерывные, в том числе реверсивные, группы клетей с использованием двух-, трех- и четырехвалковых калибров.

Вышеприведенные мероприятия и новые технологии внедрены в производство и используются в рельсобалочном цехе АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» для прокатки трамвайных желобчатых рельсов, что позволило получить суммарный экономический эффект от их использования в размере 84,67 млн.руб./год., при долевом участии автора 50% или 42,335 млн.руб./год.

Начальник рельсобалочного цеха
АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский
металлургический комбинат»

А.А.Пасечко

**Трамвайные рельсы в соответствии с Европейским стандартом
EN 14811:2006+A1:2009 «Железные дороги. Верхнее строение пути.
Специальные рельсы. Желобчатые рельсы и сопутствующие
конструкционные профили».**



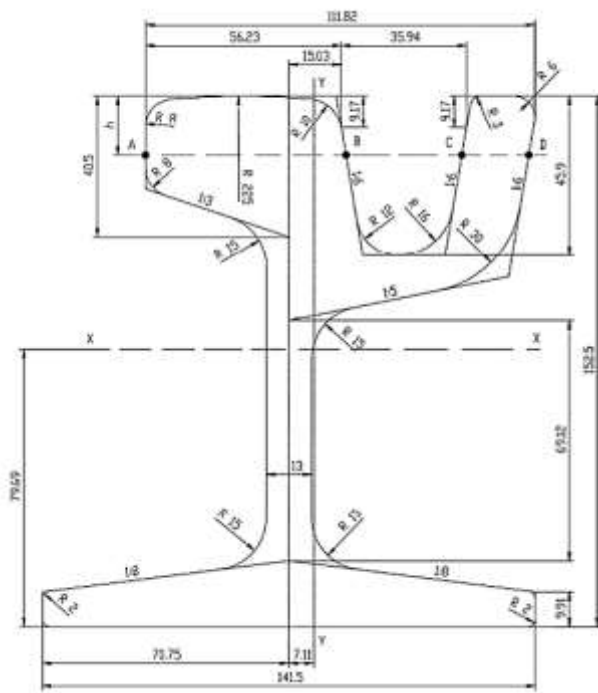


Рисунок 5 – Профиль желобчатого рельса 55G1

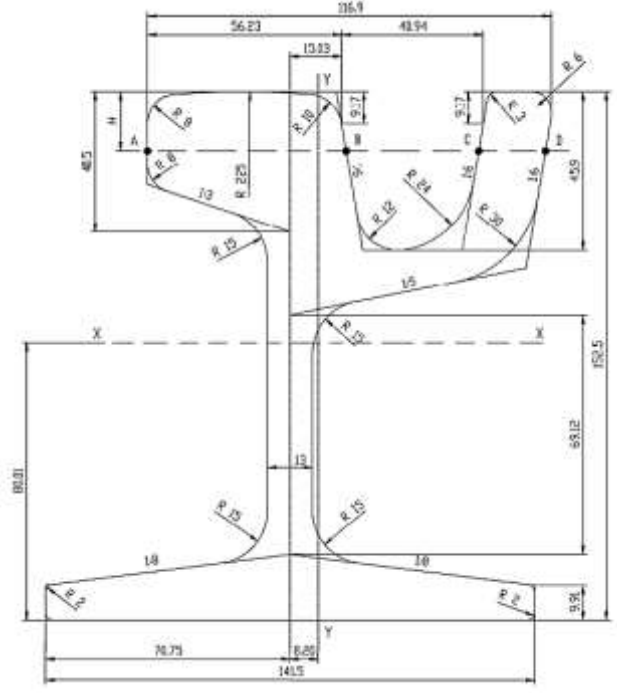


Рисунок 6 – Профиль желобчатого рельса 55G2

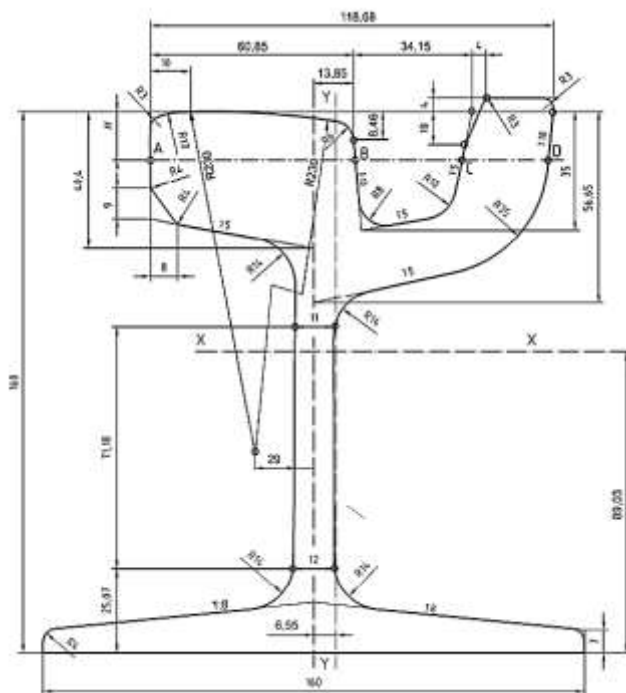


Рисунок 7 – Профиль желобчатого рельса 56R1

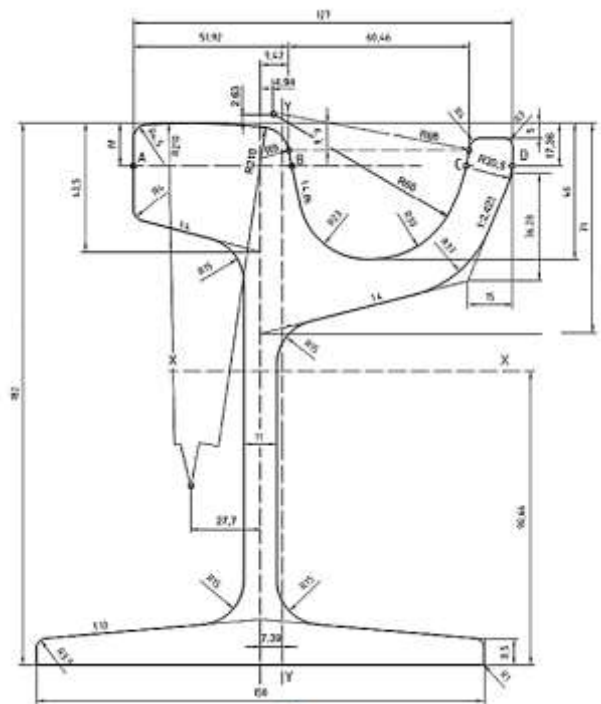


Рисунок 8 – Профиль желобчатого рельса 57R1

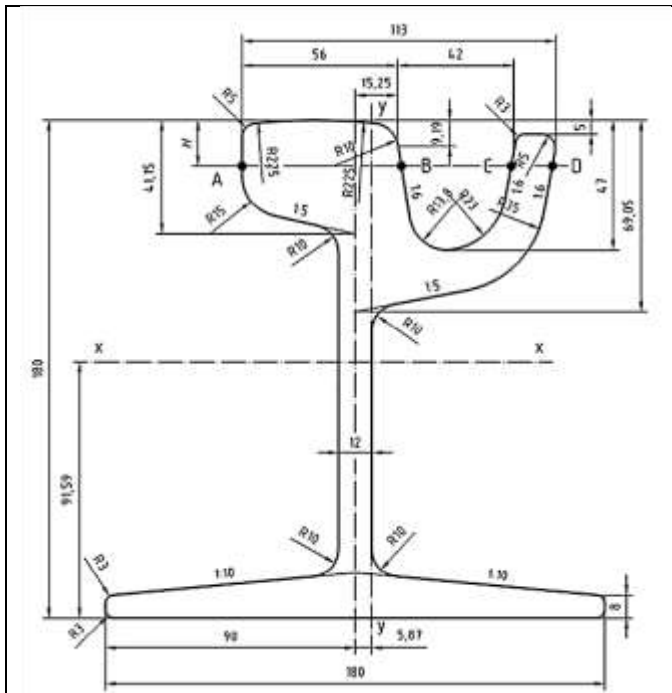


Рисунок 9 – Профиль желобчатого рельса 59R1

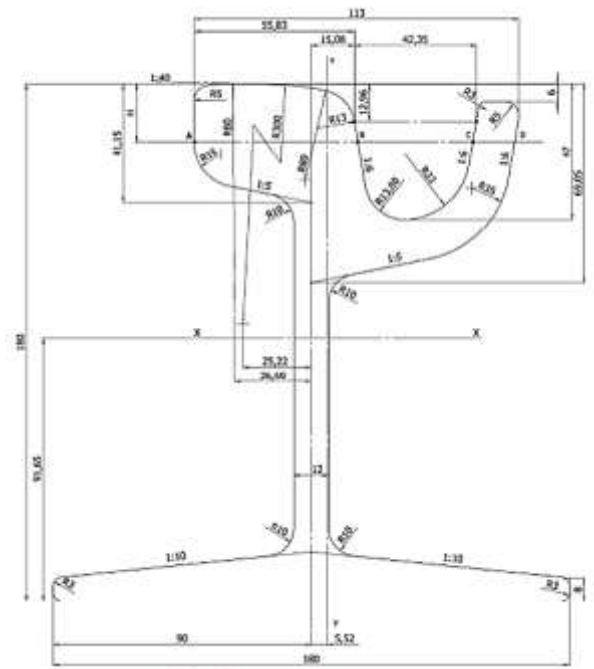


Рисунок 10 – Профиль желобчатого рельса 59R2

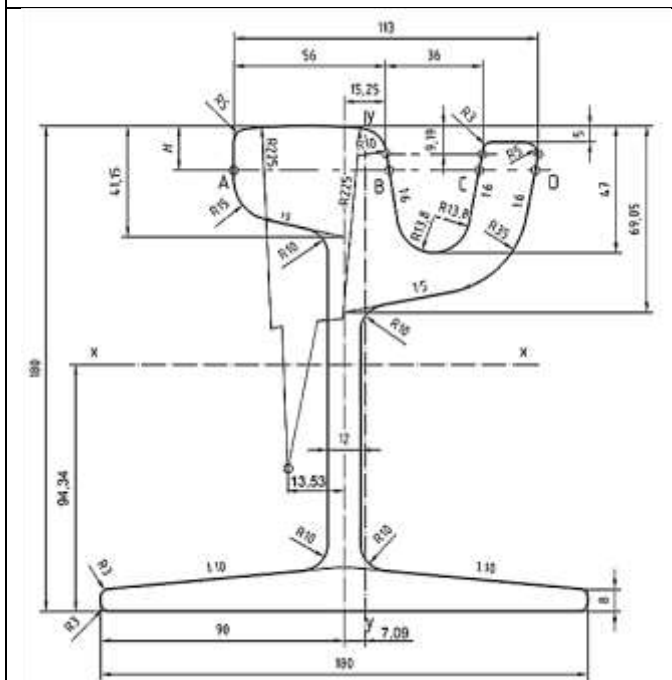


Рисунок 11 – Профиль желобчатого рельса 60R1

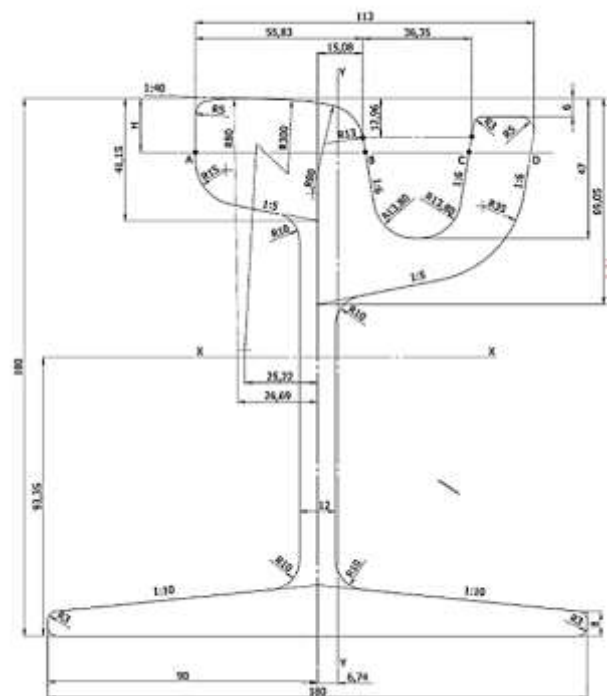
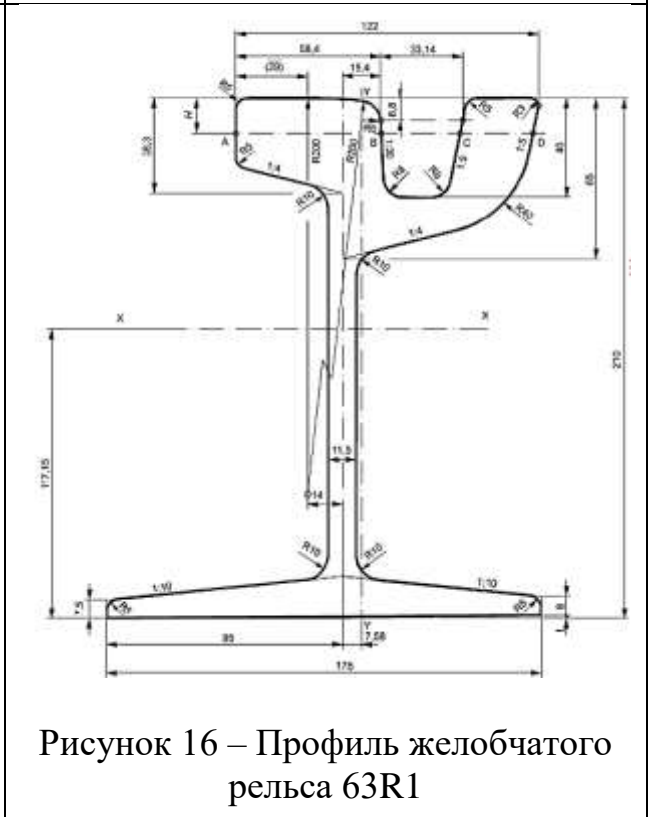
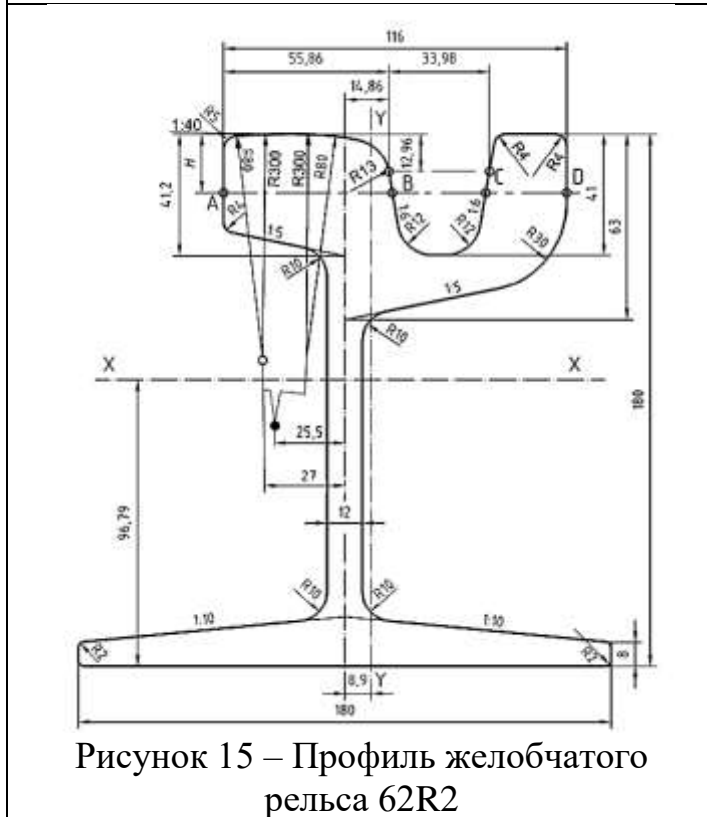
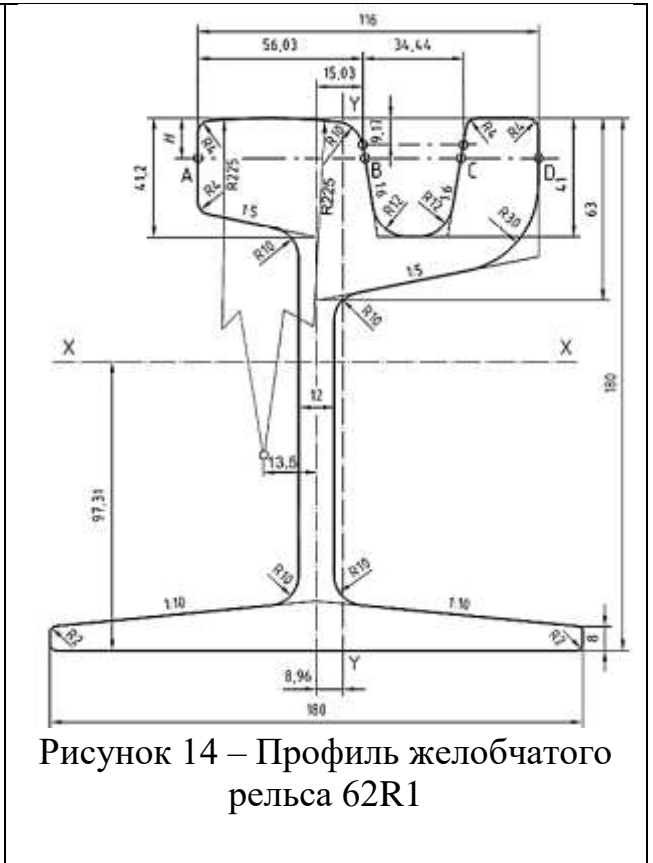
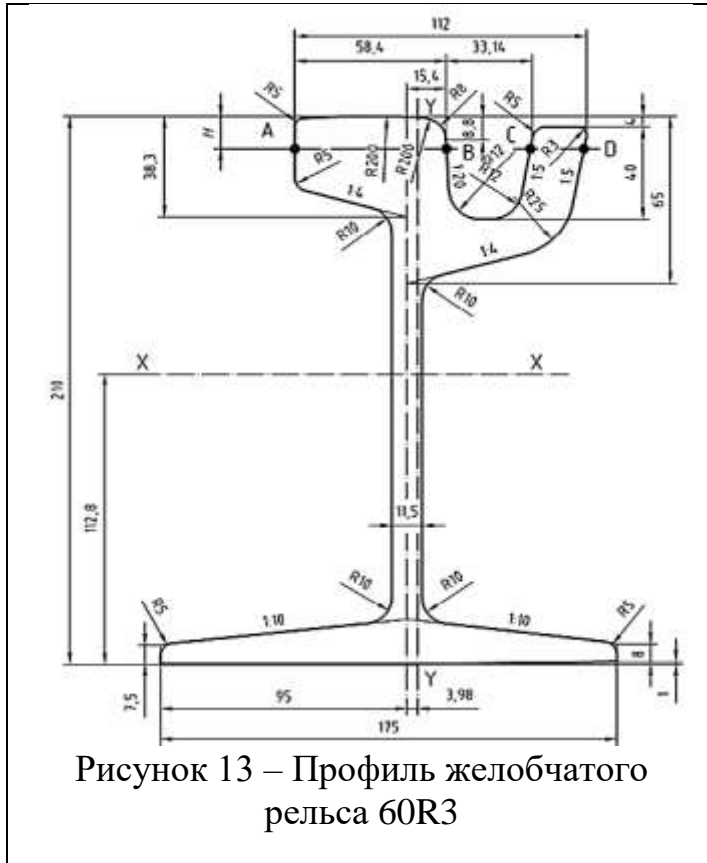


Рисунок 12 – Профиль желобчатого рельса 60R2



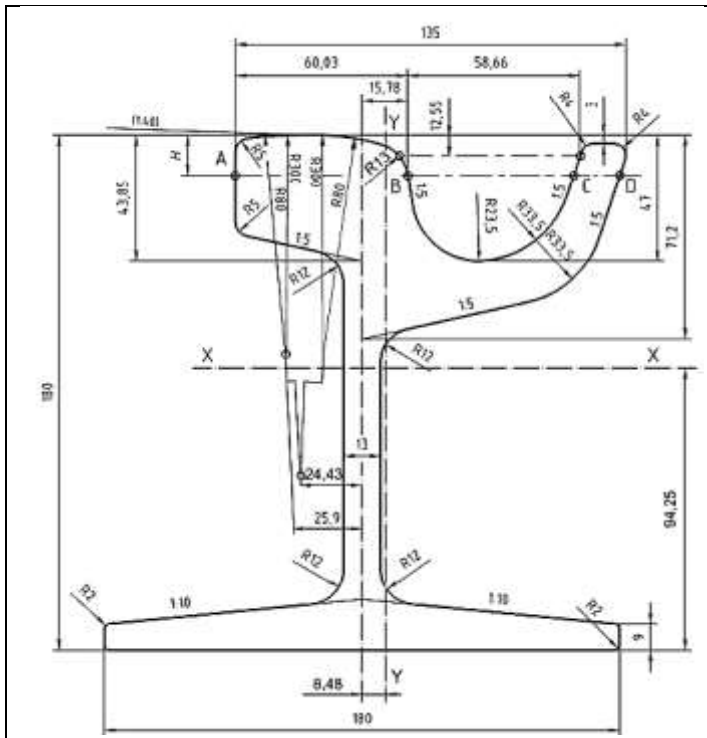


Рисунок 17 – Профиль желобчатого рельса 67R1

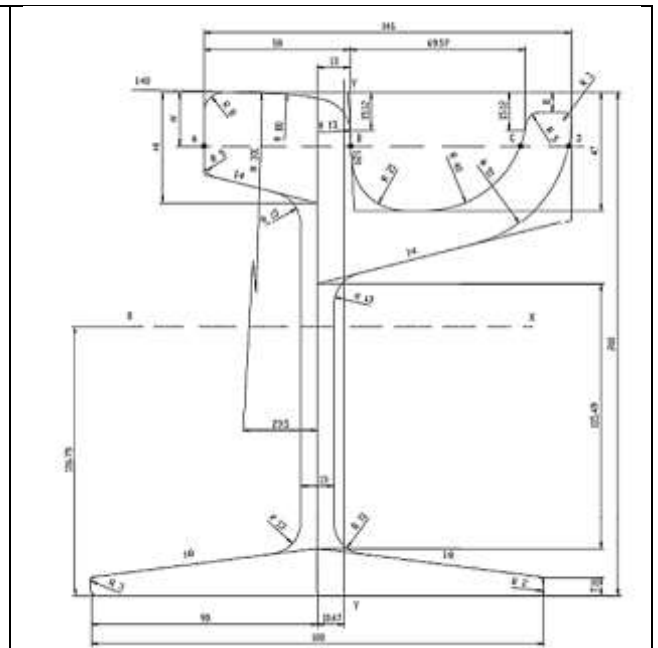


Рисунок 18 – Профиль желобчатого рельса 68G1

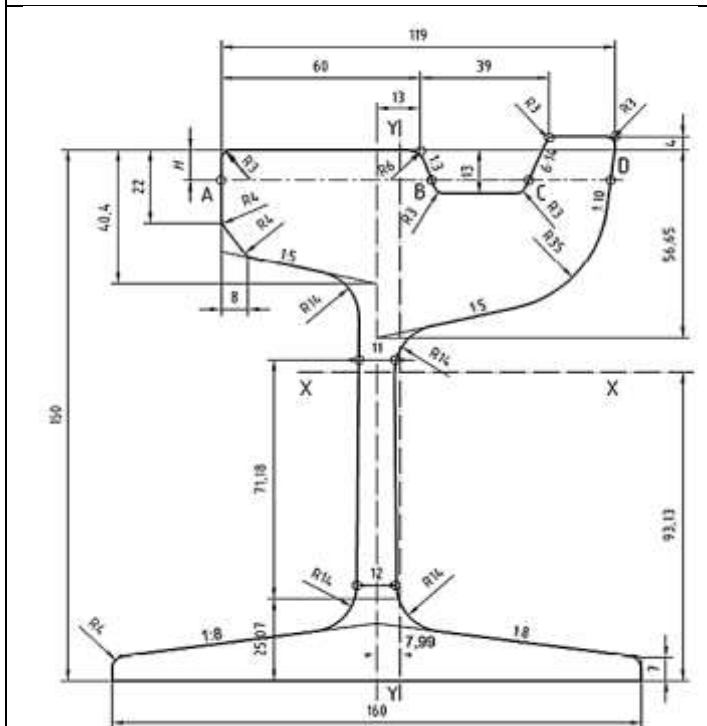


Рисунок 19 – Конструкционный профиль 61C1

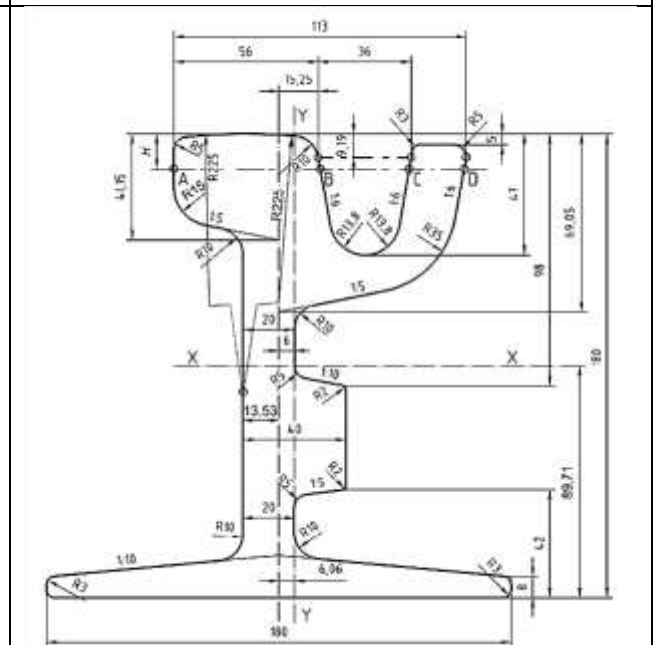


Рисунок 20 – Конструкционный профиль 75C1

РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТ ВНЕДРЕНИЯ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ АСИММЕТРИЧНЫХ РЕЛЬСОВ НА СТАНЕ ТАНДЕМ АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

 **ЕВРАЗ**

УТВЕРЖДАЮ

Начальник рельсобалочного цеха АО «ЕВРАЗ
Объединенный Западно-Сибирский
металлургический комбинат»

А.В. Лапченко

10 января 2020 г.

**Расчет экономической эффективности
от внедрения в промышленное производство результатов диссертации
Сметанина Сергея Васильевича
на соискание ученой степени доктора технических наук**

I. Расчет экономической эффективности от внедрения новой технологии прокатки
трамвайных рельсов на стане тандем

1. Внедрение новой технологии прокатки трамвайных рельсов по ГОСТ Р 55941-2014
«Рельсы трамвайные желобчатые».

1.1 Экономический эффект за счет увеличения производительности стана тандем на
10% при прокатке трамвайных рельсов по ГОСТ Р 55941-2014 составил 30 млн.руб.:

- производительность после внедрения составила 68,2 т/час (62 т/час – базовая
производительность на РТ62 с учетом увеличения на 10%);

- высвобождение фактического времени работы (ФРВ) стана после внедрения
составило: $5,4 \text{ тыс.т} / 62 \text{ т/час} - 5,4 \text{ тыс.т} / 68,2 \text{ т/час} = 7,9 \text{ час}$, где 5,4 тыс.т – объем
производства рельсов РТ62.

- дополнительное производство рельсов в высвобожденное время составило:

$7,9 \text{ час} \times 195 \text{ т/час} = 1\,541 \text{ т}$, где 195 т/час – производительность стана при
производстве железнодорожных рельсов;

- дополнительный маржинальный доход составил:

$1\,541 \times 19\,156 \text{ руб./т} = 30 \text{ млн руб.}$, где 19 156 руб./т – маржинальный доход.

© Акционерное общество «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»

© ш. Космическое (Заводской р-н), д. 16, г. Новокузнецк, Кемеровская область – Кузбасская область, Россия, 654043

© тел. (3843) 59-59-00, факс (3843) 59-59-59

© e-mail: zsmk@evraz.com © ОГРН 1024201670020, ОКПО 05757676, ИНН/КПП 4218000951/421801001 © <http://rus.evraz.com>



1.2 Экономический эффект от увеличения выхода годного с 74% до 97% составил 27 млн.руб.:

- увеличение выхода годного на 23% после внедрения позволило снизить расход металла на производство РТ62 на 230 кг/т.;

- снижение потребности во всаде составило 230 кг/т x 5,4 тыс.т = 1242 т.;

- снижение затрат на металл составило:

$1242 \text{ т} \times (39\,450 \text{ руб./т} - 17\,720 \text{ руб./т}) = 27 \text{ млн.руб.}$, где 39 450 руб./т – стоимость заготовки на рынке; 17 720 руб./т – стоимость металлолома.

1.3 Экономический эффект за счет увеличения межремонтного цикла оборудования прокатных клетей на 23% составил 24 млн.руб.:

- высвобождение ФРВ стана за счет сокращения простоев по выработке валков составил 6,5 часа (28,3 часа (простои по выработке при производстве РТ62) x 23%);

- дополнительное производство рельсов в высвобожденное время составило:

$6,5 \text{ час} \times 195 \text{ т/час} = 1\,268 \text{ т.}$;

- дополнительный маржинальный доход составил:

$1\,268 \times 19\,156 \text{ руб./т} = 24 \text{ млн.руб.}$

1.4 Экономический эффект за счет снижения расхода электроэнергии на 45 кВтч/т составил 1 млн.руб.: $45 \text{ кВтч/т} \times 5\,400 \times 2,7 \text{ руб./кВт} = 1 \text{ млн.руб.}$

где, 2,7 руб./кВт – тариф на эл.энергию.

1.5 Экономический эффект от повышения стойкости прокатных валков на 17% составил 0,3 млн.руб.:

- экономия прокатных валков составила 0,21 кг/т (при базовом расходе 1,24 кг/т);

- снижение затрат на валки составило:

$0,21 \text{ кг/т} \times 5\,400 \times (226\,203 \text{ руб./т} - 17\,720 \text{ руб./т}) = 0,3 \text{ млн.руб.}$,

где 226 203 руб./т – стоимость 1 т. прокатных валков.

Общий экономический эффект от внедрения в промышленное производство результатов исследований докторской диссертации Сметанина Сергея Васильевича – новой технологии прокатки трамвайных рельсов по ГОСТ Р 55941-2014 на рельсобалочном стане с группой тандем АО «ЕВРАЗ ЗСМК» составил 82 млн.руб./год.

Заместитель начальника
рельсобалочного цеха
по технологии АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Главный специалист отдела
финансового анализа и оценки
инвестиций АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

С.В. Дорофеев

М.В. Ощепкова