

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новокузнецк – 2022

Работа выполнена в АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк)

**Научный
консультант**

Заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор, профессор-
консультант кафедры «Обработка металлов давлением и
металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК» ФГБОУ ВО «Сибирский
государственный индустриальный университет»
Перетяtko Владимир Николаевич

**Официальные
оппоненты:**

Доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Обработка металлов давлением»
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»
Романцев Борис Алексеевич

Доктор технических наук, профессор,
Директор Научного центра качественных сталей
ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П.Бардина»
Филиппов Георгий Анатольевич

Доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением»
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»
Шварц Данил Леонидович

**Ведущая
организация**

ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»

Защита состоится «07» декабря 2022 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.078.02 (Д.002.060.02), созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д.49, БКЗ.

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

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

Автореферат разослан « » _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук



Андреев В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 клетей (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 клетей. 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 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.

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., Перетяцько 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., Перетяцько 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 ресурсосбережения технологии 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 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 клеток 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.

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), исключаяющих осевую пористость в черновых клетях и обеспечивающих требуемые размеры фланцев профиля в чистовой группе тандем; проектировании четырехвалковых калибров без осевых нагружений горизонтальных валков, позволяющих снизить неравномерность напряженно-

деформированного состояния металла на основе применения новых методов расчета, режимов и принципов прокатки рельсов.

2. Изучен процесс уширения и утяжки фланцев профиля при прокатке в четырехвалковых 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 так же 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 клетей (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 клетей: в первой клетке семь проходов в ящичных калибрах, при суммарных коэффициентах вытяжки 1,06 – 2,2; во второй клетке 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 клеток.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** к диссертации на основании Транспортной стратегии и Стратегии развития транспортного машиностроения Российской Федерации на период до 2030 года, возросшей необходимости в повышении качества наукоемкой продукции – асимметричных рельсовых профилей, получаемых с помощью горячей прокатки, обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, изложена научная новизна и практическая значимость работы, дано краткое описание содержания диссертации, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** «Современное состояние научной проблемы, постановка задач исследования» приведен краткий обзор литературы по теме, представлены этапы развития и современного состояния теории и практики прокатки асимметричных рельсовых профилей. Особое внимание уделено одному из самых сложных, с точки зрения получения готового профиля, процессу прокатки трамвайных рельсов. Трамвайный рельс – это не один профиль, а группа различных типоразмеров рельсов. В соответствии с ГОСТ предусмотрено 4 типа трамвайных рельсов и в соответствии с Европейским стандартом EN 20 типов трамвайных рельсов. Установлено, что результаты исследований напряженно-деформированного состояния металла и энергосиловых параметров прокатки трамвайных рельсов на станах с группой тандем отсутствуют.

Все прокатываемые рельсовые профили по геометрии поперечного сечения и ее симметрии, относительно своей вертикальной оси, можно разделить на две категории: симметричные и асимметричные (рисунок 1).

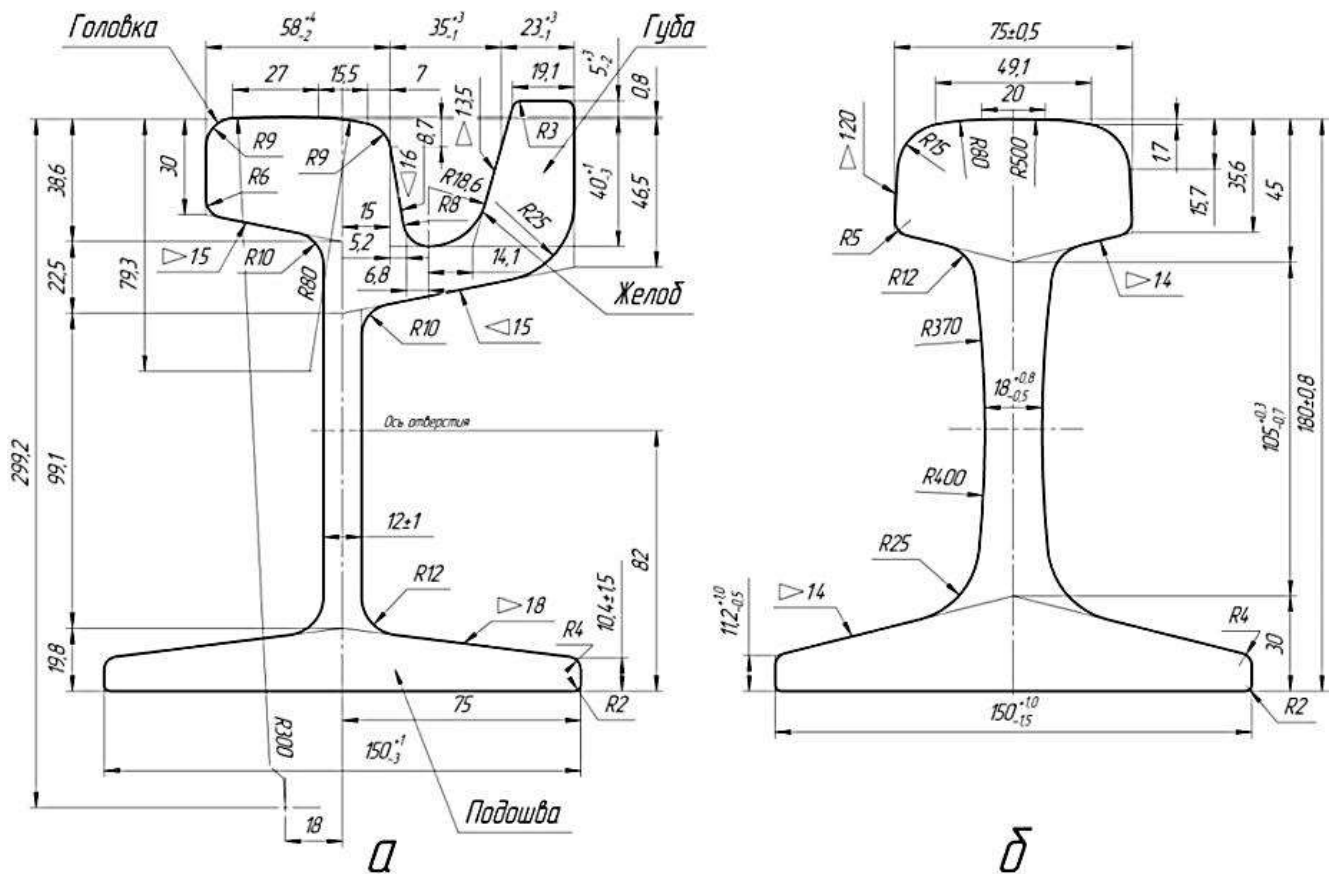


Рисунок 1 – Рельсовые профили: а – асимметричный профиль трамвайного рельса (РТ62); б – симметричный профиль железнодорожного рельса (Р65)

К асимметричным рельсовым профилям, прокатываемым на рельсобалочных станах, относятся: усовиковые рельсы УР65, УР50 (рисунок 2, в); остряковые рельсы ОР50, ОР65 (рисунок 2 а, б); рельсы контррельсовые (РК65, РК50); рельс заготовки безжелобчатой для трамвайных переводов трамвайных путей (ЗТ62); бесшечные трамвайные желобчатые рельсы (РТЖБ-58); трамвайные желобчатые рельсы (Т58, Т62, РТ58, РТ62, РТ60Е, РТ62Е) (рисунок 1, а).

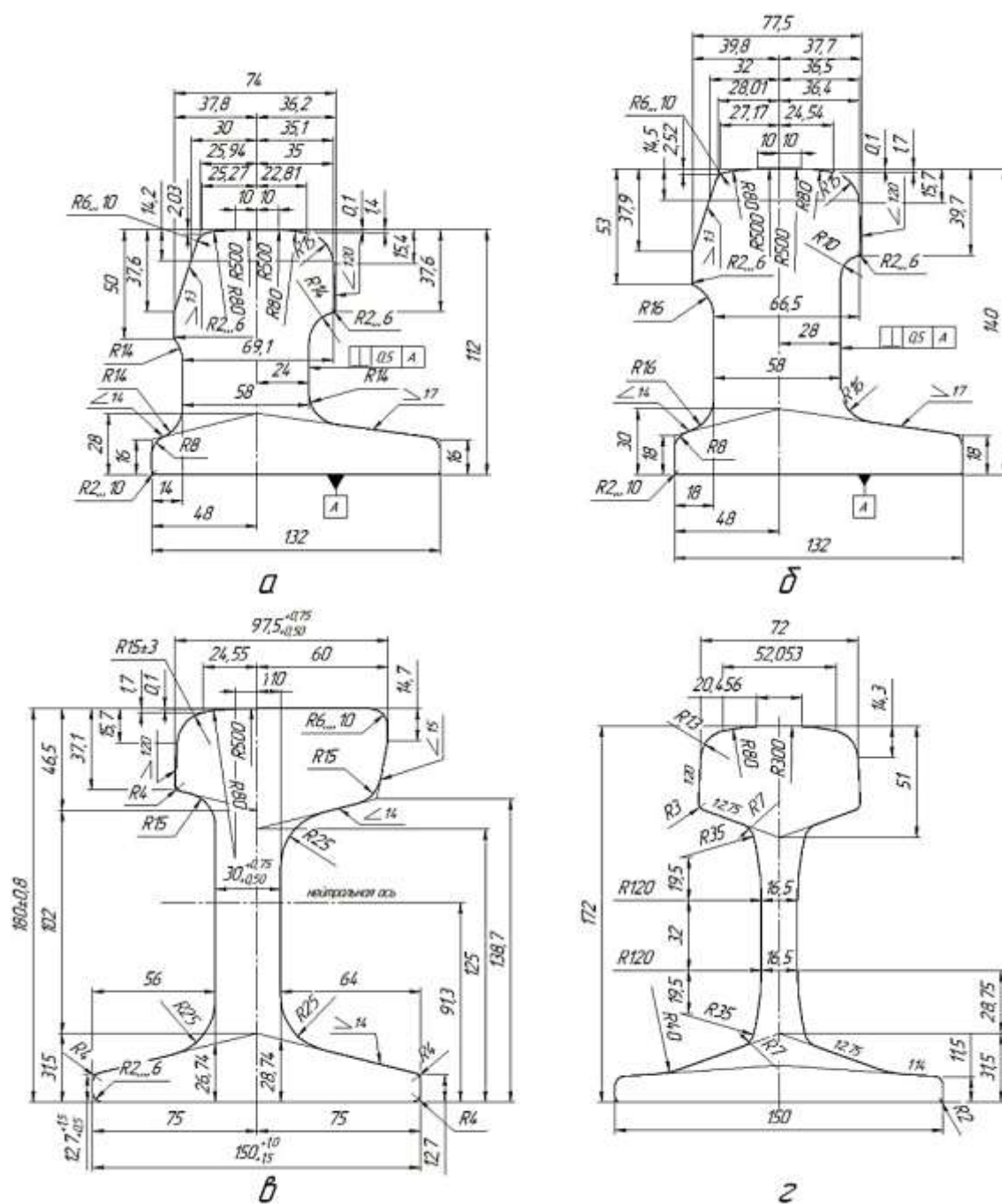


Рисунок 2 – Асимметричные и симметричные рельсовые профили: а – профиль острякового рельса ОР50; б – профиль острякового рельса ОР65; в – профиль усовикового рельса УР65; г – профиль рельса Виньоля тип 60Е1

Прокатка трамвайных рельсов, профиль которых выделяется из всех асимметричных рельсовых профилей, труднее, при этом требуются специальные предчистовые и чистовые четырехвалковые калибры, которые необходимы для получения сложной геометрии профиля трамвайного рельса. Профиль трамвайного рельса имеет свои характерные особенности: глубокий желоб, который разделяет головку от губы; сравнительно тонкая шейка; подошва с тонкими фланцами; значительная асимметрия профиля как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. Перечисленные особенности конфигурации трамвайного рельса значительно усложняют получение готового профиля. При этом технология прокатки является более трудоемкой и энергоемкой, по сравнению с прокаткой симметричных профилей, а результаты исследований по прокатке трамвайных рельсов практически отсутствуют. 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, как известно, сложно разработать ресурсосберегающую технологию прокатки.

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.

В результате масштабных реконструкций рельсовых производств на передовых металлургических комбинатах, которые произошли по всему миру, в том числе и в России, построены рельсобалочные прокатные станы с группой тандем. В связи с этим технология прокатки рельсовых профилей, а в особенности сложных асимметричных профилей, потребовала углубленного изучения. Это связано с тем, что при прокатке в непрерывной чистовой группе тандем, состоящей из трех клетей, формоизменение металла в четырехвалковых калибрах имеет свои особенности. Рельсобалочные станы с группой тандем дают возможность производить асимметричные профили более высокого качества с уменьшенными допусками на размеры профиля поперечного сечения, позволяют освоить прокатку трамвайных рельсов высокого качества в соответствии с требованиями ГОСТ и EN. Однако опыт работы на рельсобалочных станах с группой тандем, в состав которого входит непрерывная реверсивная чистовая группа клетей, до внедрения результатов диссертации в промышленное производство, для сложных асимметричных рельсовых профилей, таких как трамвайные рельсы, в научной литературе, полностью отсутствовал не только в России, но и в странах СНГ. Напряженно-деформированное состояние металла и энергосиловые параметры прокатки асимметричных рельсовых профилей на рельсобалочных станах с группой тандем в мировой практике изучены недостаточно.

Для разработки ресурсосберегающей технологии прокатки асимметричных рельсовых профилей высокого качества необходимы новые научные данные по распределению значений интенсивности деформаций и интенсивности

напряжений, по уравнениям, описывающим нахождение требуемых размеров фланцев в группе клетей 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 металла с валками в четырехвалковых калибрах.

Проблема несбалансированности горизонтальных сил, действующих при прокатке асимметричных рельсовых профилей в четырехвалковых калибрах, до настоящего времени полностью не решена. Для разработки ресурсосберегающей технологии прокатки в чистовой реверсивной группе тандем не определены эффективные скоростные режимы и действующие моменты при прокатке трамвайных рельсов.

Исходя из вышеизложенного, становится очевиден вывод о том, что из-за отсутствия научно обоснованных данных о напряженно-деформированном состоянии металла и энергосиловых параметрах прокатки, невозможно разработать технологию прокатки высококачественных асимметричных рельсовых профилей на стане с группой тандем.

В диссертации приводятся результаты моделирования методом конечных элементов и натурных исследований, целью которых было развить теоретические основы, разработать и внедрить энерго- и ресурсосберегающую технологию прокатки асимметричных рельсовых профилей на станах с группой тандем.

Во **второй главе** «Разработка и теоретическое обоснование технологии прокатки асимметричных рельсовых профилей на станах с группой тандем применяя моделирование методом конечных элементов» приведены результаты исследований, полученных с помощью моделирования методом конечных элементов, 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 тандем 55 % деформации от глубины образования желоба приходится на первый четырехвалковый калибр (рисунок 3). Установлено, что для первого четырехвалкового калибра значения интенсивности деформаций в поверхностных слоях металла по всему периметру желоба больше единицы $\varepsilon_e > 1$, 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 с минимальными значениями интенсивности деформаций ($\varepsilon_e = 1,17-1,55$), соответствует внутренним слоям металла, располагающимся по оси желоба.

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.

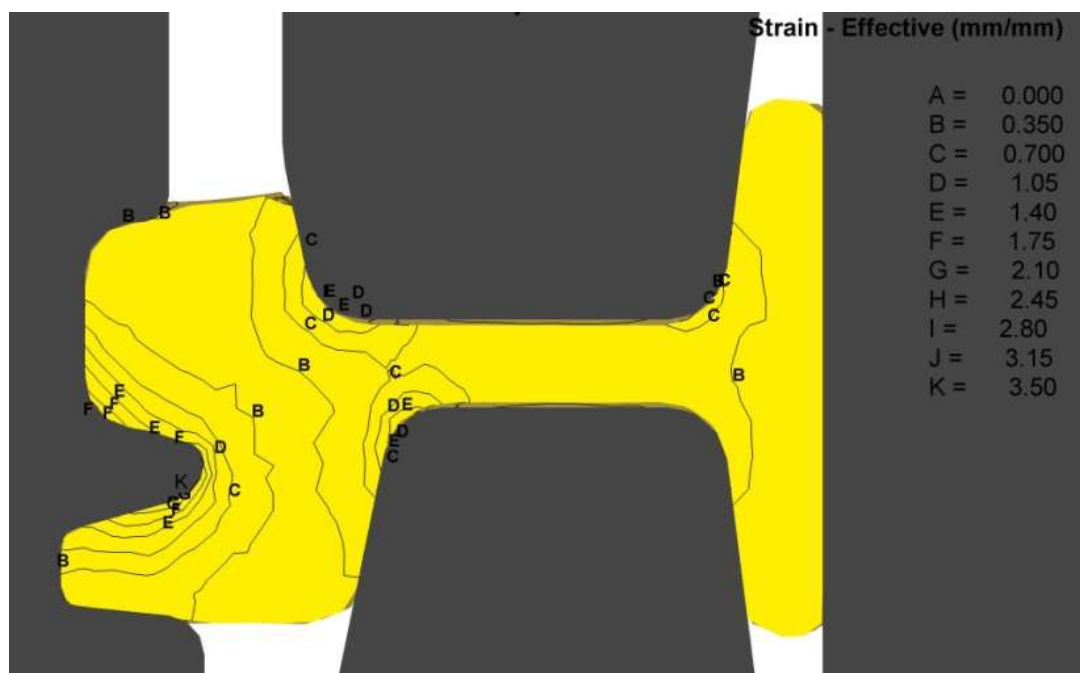


Рисунок 3 – Распределение полей интенсивности деформаций в первом четырехвалковом калибре

По итогам проведенного моделирования получены результаты исследований о распределении полей интенсивности напряжений в поперечном сечении раската при прокатке в первом четырехвалковом калибре (рисунок 4). 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.

С применением моделирования методом конечных элементов проведено исследование трансформации осевой пористости в непрерывнолитой заготовке

при ее прокатке в черновых клетях BD-1 и BD-2 (рисунок 5). 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.

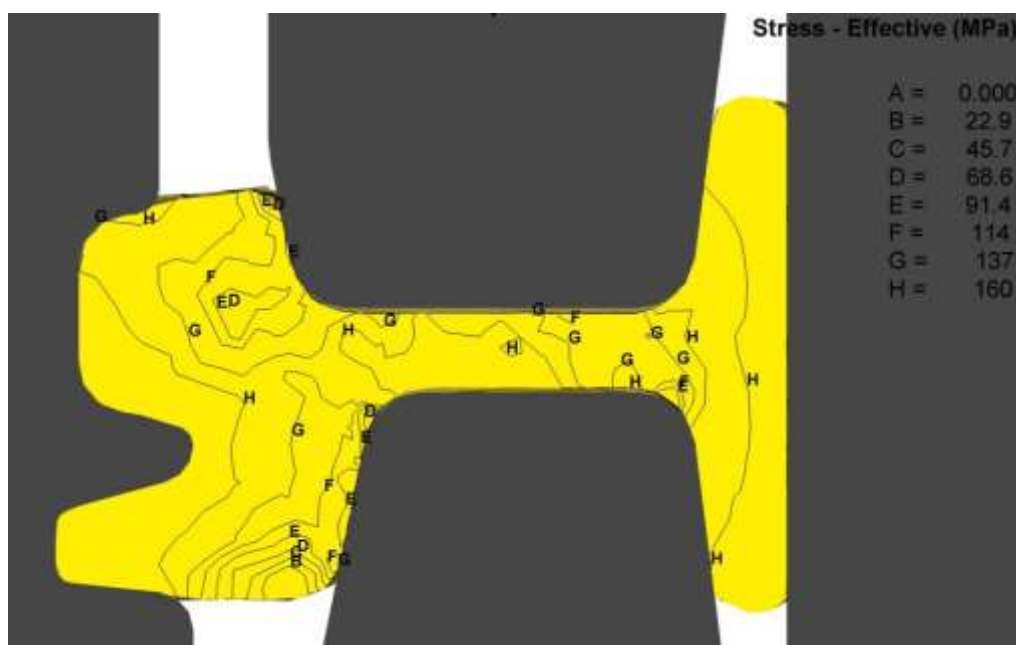


Рисунок 4 – Распределение полей интенсивности напряжений в первом четырехвалковом калибре

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, ресурс 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 BD-2, осевая

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

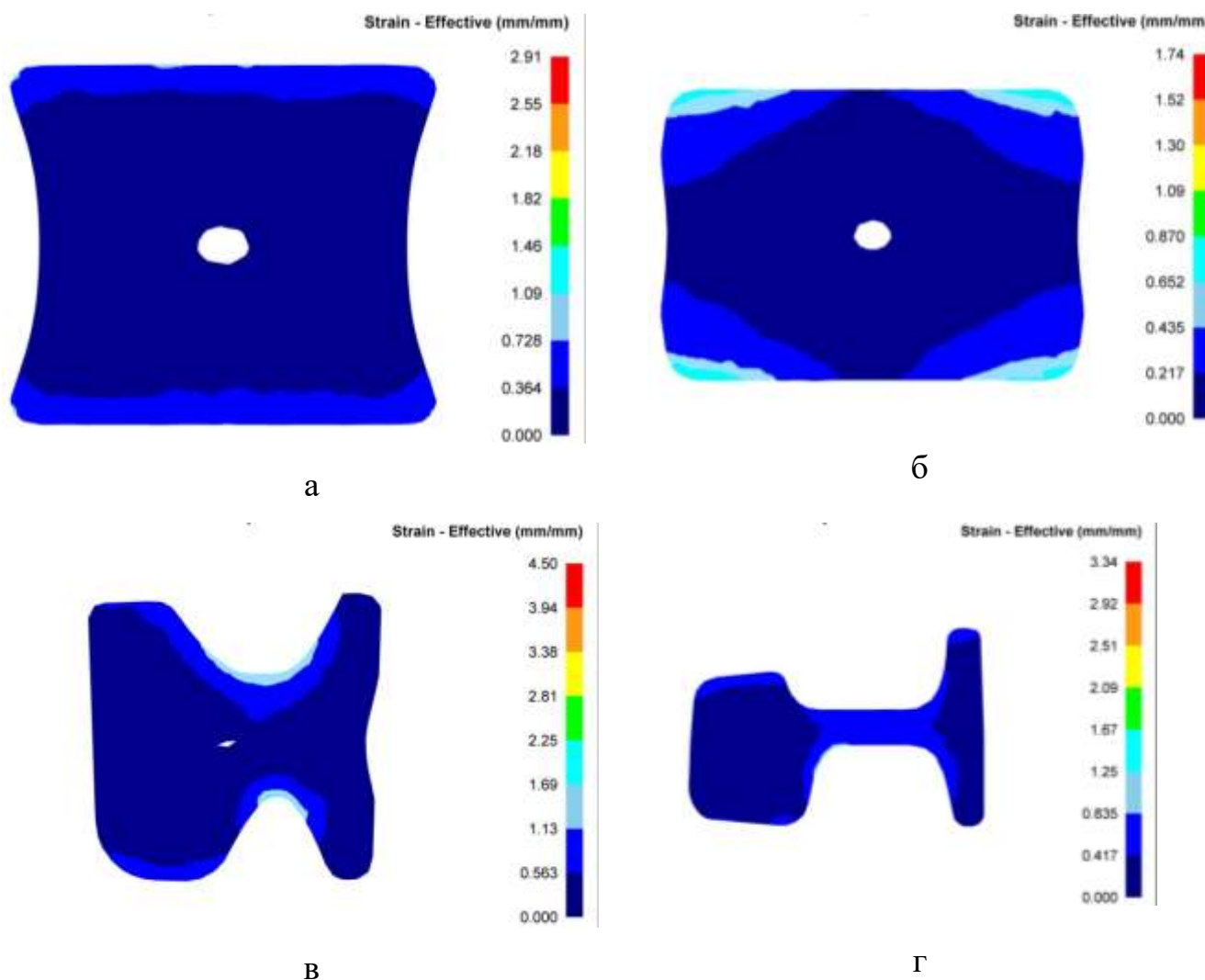


Рисунок 5 – Распределение полей интенсивности деформаций:
а – после второго прохода; б – после седьмого прохода; в – после девятого прохода; г – после двенадцатого прохода

С применением методики планирования многофакторного эксперимента и моделирования методом конечных элементов проведено исследование по нахождению требуемых 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 $\overline{\beta}_{23} = 1,11$, а максимальная склонность к утяжке $\overline{\beta}_{21} = 0,9$.

По итогам исследования получены уравнения регрессии для нахождения абсолютного:

$$\beta_{\Pi} = (0,99 + 0,49x_1 + 0,2x_3 + 0,03x_4 + 1,1x_6 - 0,014(x_1^2 - 34,98x_1 - 3,1713) - 0,02(x_3^2 - 26,56x_3 - 1,6875) - 0,3 \cdot 10^{-4}(x_4^2 - 624,5x_4 - 1520,44) + 0,04(x_1^3 + 2,31x_1^2 - 0,028x_1 + 0,4))/1 \cdot 10^5, R^2 = 0,998;$$

$$\beta_{\Gamma} = (1,01 + 0,52x_1 + 0,014x_3 + 0,03x_4 - 0,25x_6 - 0,02(x_1^2 - 34,98x_1 - 3,1713) - 0,02(x_3^2 - 26,56x_3 - 1,6875) - 0,4 \cdot 10^{-5}(x_4^2 - 624,5x_4 - 1520,44) + 0,04(x_1^3 + 2,31x_1^2 - 0,028x_1 + 0,4))/1 \cdot 10^5, R^2 = 0,998;$$

и относительного изменения размеров фланцев профиля при прокатке в четырехвалковых калибрах:

$$\begin{cases} \Delta B_{\Pi} = -0,0408\beta_{\Pi}^2 + 0,1798\beta_{\Pi} + 0,817; \\ \Delta B_{\Gamma} = 0,004\beta_{\Gamma}^2 + 0,0909\beta_{\Gamma} + 0,8054 \end{cases},$$

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

Предложен ресурсосберегающий способ прокатки в четырехвалковых калибрах, заключающийся в обеспечении равенства (минимального различия) сил прокатки в горизонтальной плоскости от обжатия вертикальными валками. При проведении моделирования прокатки трамвайных рельсов установлена закономерность для четырехвалковых калибров, заключающаяся в том, что равенство сил прокатки между вертикальными валками $P_{\Gamma}/P_{\Pi} = 0,85 \div 1,19$ обеспечивается при выполнении условия отношения смещаемых объемов металла от обжатия вертикальными валками, при котором $V_{\Gamma}/V_{\Pi} = 3,22 \div 4,44$, при этом изменения размеров фланцев головки и подошвы профиля составляют $\beta_{\Pi} = \beta_{\Gamma} = 0,99 \div 1,01$.

Площадь контактной поверхности необходима для расчета важнейшей характеристики процесса прокатки – силы прокатки. Как известно, сила прокатки является одной из основополагающих величин, с помощью которой производится расчет энергосиловых параметров прокатки и прочностных расчетов станины, прокатных валков, шпинделей, выбор главного двигателя 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.

В настоящее время площадь контактной поверхности металла с валками определяется графически, аналитически или графоаналитически, так же существует ряд формул, предложенных Дроздом В.Г., Смирновым В.С., Зюзиным В.И., Кривенцовым А.М., Динником А.А., Синельниковым Ю.И., Цоухар Г., или метод Симпсона, однако они не дают требуемой точности при расчете площади контактной поверхности металла с валками в калибрах сложной формы – четырехвалковых калибрах для прокатки асимметричных рельсов. Для таких калибров формулы расчета площади контактной поверхности металла с валками отсутствуют.

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.

Предложен новый 3D-метод расчета контактных площадей металла с валками, который, в сравнении с известными методами (графическим, аналитическим и графоаналитическим) позволяет уменьшить временные затраты на расчет и повысить точность расчета силы прокатки.

Основные отличия и преимущества предложенного метода заключается в том, что 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); рассчитать смещаемые объемы металла; снизить время расчетов по сравнению с существующими в 30 раз.

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

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

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 (рисунок 6).

Разработаны новые эффективные скоростные режимы прокатки в чистовой непрерывно-реверсивной группе клетей. Предлагается способ прокатки, в котором во всех проходах и во всех клетях захват раската осуществляется при постоянной частоте вращения горизонтальных валков. При прокатке полосы в первом и втором проходах диаграммы скоростей имеют две ступени с постоянной частотой вращения валков: пониженную и максимальную рабочую n_n . При пониженной постоянной частоте $(0,42 \div 0,51)n_n$ 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 частоты вращения валков n_n , и далее осуществляется прокатка при максимальной рабочей скорости. При третьем проходе захват раската валками, прокатка и выход раската осуществляются при постоянной частоте вращения валков равной $(0,6 \div 0,7)n_n$. Предложенный скоростной режим, в котором захват металла осуществляется при постоянной частоте вращения горизонтальных валков, позволяет, в момент захвата металла, исключить влияние динамического момента вращающихся частей прокатного стана. А движение полосы с линейной скоростью, равной окружной скорости вращения валков, обеспечивает отсутствие динамических ударов при захвате полосы и повышает надежность оборудования главной линии прокатного стана. Применение разработанных эффективных

скоростных режимов позволяет увеличить производительность прокатного стана, повысить стойкость прокатных валков и увеличить межремонтный цикл оборудования прокатного стана.

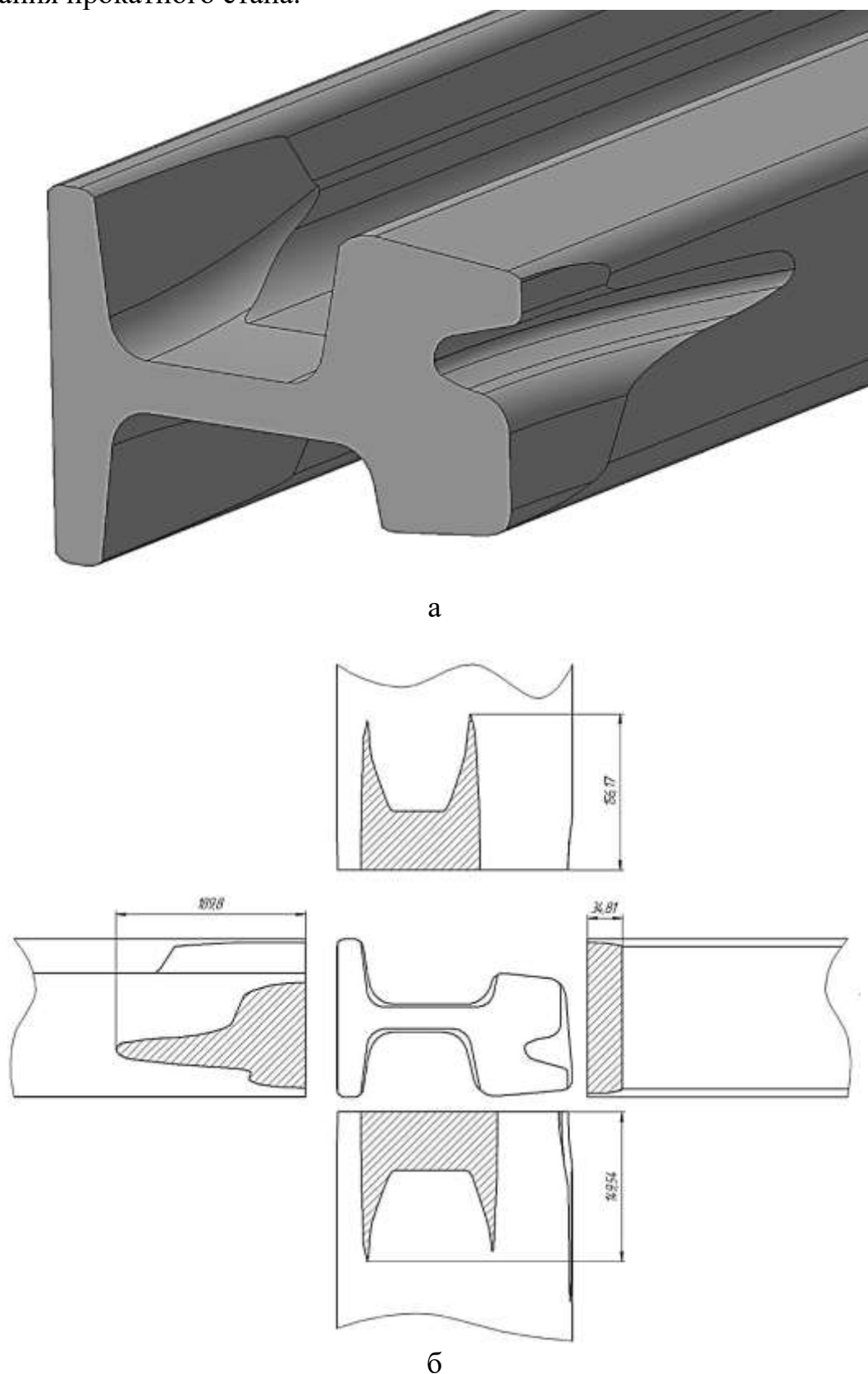


Рисунок 6 – Поперечное сечение раската по оси валков с геометрическим очагом деформации: а – 3-D модель с геометрическим очагом деформации; б – проекции геометрического очага деформации (штриховкой показаны контактные площади металла с валками)

В третьей главе «Исследование процесса прокатки асимметричных рельсовых профилей на стане с группой тандем применяя натурные исследования» приведено описание технологии производства трамвайных рельсов на стане с группой тандем АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (рисунок 7): тип стана – с последовательным расположением клеток, включающий непрерывную чистовую группу; количество групп клеток – три; число клеток – шесть, в том числе черновая группа – две клетки BD-1 и BD-2; чистовая группа – три клетки (UR, ER, UF); отдельно стоящая клетка U0.

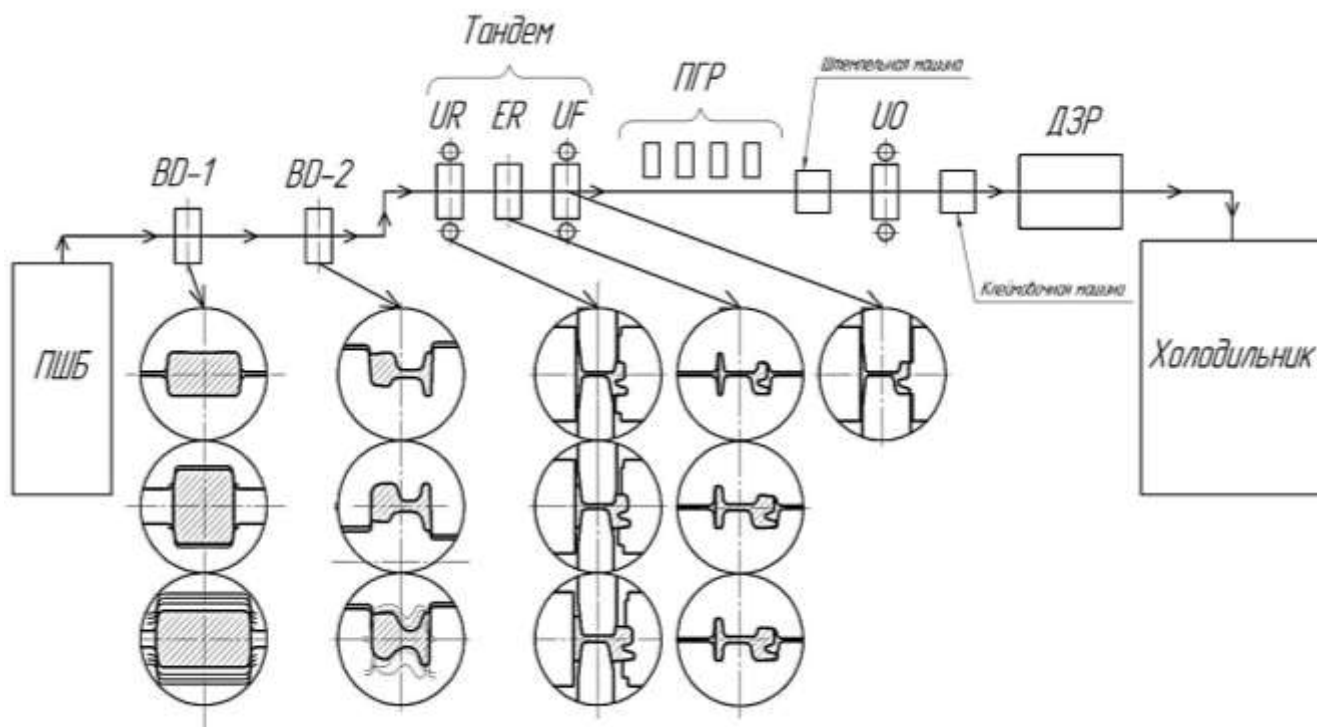


Рисунок 7 – Схема расположения основного оборудования на участке нагревательная печь – холодильник

Проведена разработка эффективной технологии прокатки трамвайных рельсов с помощью метода планирования эксперимента в четырехвалковых калибрах чистовой непрерывно-реверсивной группы клеток. По итогам моделирования методом конечных элементов проведены промышленные эксперименты, по результатам которых установлено, что 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 и равенство сил прокатки $P_p/P_r = 0,85 \div 1,19$.

Для проверки адекватности моделирования методом конечных элементов процесса прокатки трамвайных рельсов в уравновешенных четырехвалковых калибрах проведены промышленные прокатки (рисунок 8), при проведении которых экспериментально подтверждено равенство сил прокатки между вертикальными валками в зависимости от смещаемых объемов металла в очаге деформации четырехвалковых калибров.

По итогам промышленного эксперимента подтверждена ранее установленная, при моделировании методом конечных элементов, закономерность сил прокатки, смещаемых объемов металла и требуемых размеров фланцев профиля. 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 $V_p/V_r = 3,22 \div 4,44$). Отношение сил прокатки между вертикальными валками при проведении промышленного эксперимента составили $P_p/P_r = 1,1$, при моделировании методом конечных элементов $P_p/P_r = 0,85 \div 1,19$, фактическое изменение размеров фланцев составило $\beta_{\Pi} = \beta_r = 0,98 \div 1,1$, при теоретическом $\beta_{\Pi} = \beta_r = 0,99 \div 1,01$. Выявленная закономерность объясняется тем, что характер течения металла в зоны отстаивания и опережения сильно зависит от геометрических факторов калибра, что позволяет получить равенство (минимальное различие) сил прокатки в горизонтальном направлении.

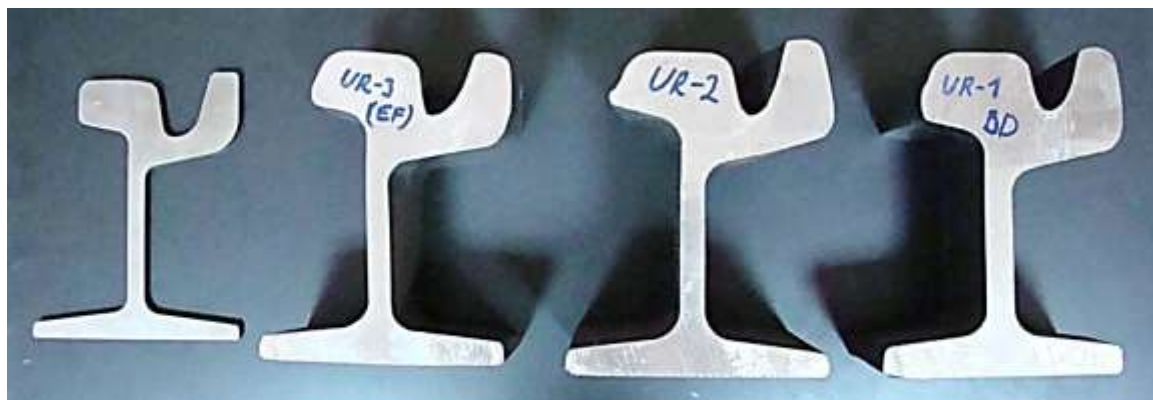


Рисунок 8 – Темплеты очага деформации калибров чистовой группы клетей

Полученные данные промышленного эксперимента с высокой схожимостью совпадают с данными моделирования методом конечных элементов, что позволяет сделать вывод об адекватности проведенного исследования.

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 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» с отбором проб 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 компьютерного моделирования. Установлено, что геометрические размеры поперечного сечения темплетов, полученных в промышленном эксперименте, с высокой схожимостью соответствуют поперечному сечению 3-D моделей, полученных при проведении моделирования методом конечных элементов процесса прокатки в

соответствующих калибрах (рисунок 9). По результатам обмеров готового профиля экспериментальных прокаток трамвайных рельсов, все рельсы признаны годными.

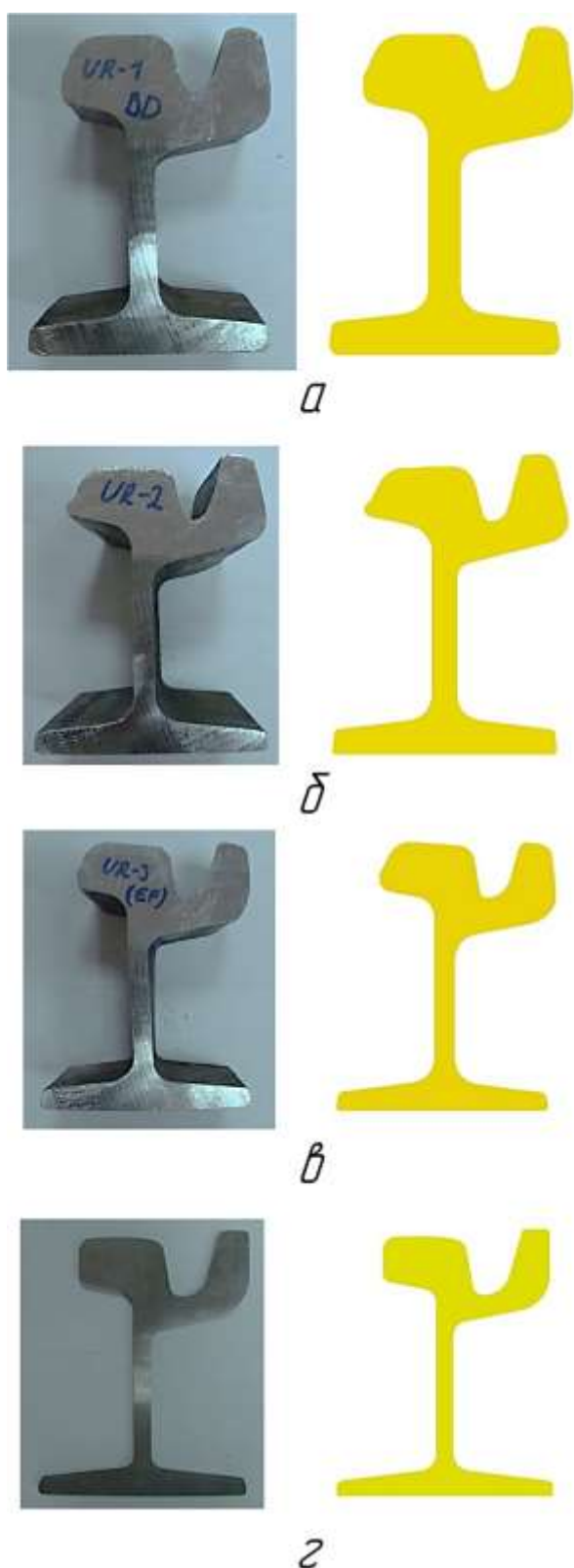


Рисунок 9 – Поперечные сечения профиля, полученного в промышленном эксперименте и моделировании методом конечных элементов после калибров:
а – UR-1; б – UR-2; в – UR-3; г – UF

По итогам моделирования методом конечных элементов проведены промышленные эксперименты по трансформации осевой пористости 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.

Макроструктуру поперечного сечения раската выявляли глубоким травлением поверхности отрезанных темплетов после второго, седьмого и девятого проходов в клетях BD-1 и BD-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 выработку осевой пористости 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 выработка 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 (рисунок 10). 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 хорошую сходимость с результатами компьютерного моделирования.

По итогам всех проведенных промышленных экспериментов на стане с группой тандем, с применением разработанной ресурсосберегающей технологии прокатки трамвайных рельсов, отбирались рельсовые пробы. Установлено, что полученная геометрия профиля, механические и прочностные характеристики трамвайных рельсов 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.

В четвертой главе «Внедрение ресурсосберегающей технологии прокатки асимметричных рельсовых профилей на станах с группой тандем»» приведено описание разработанной ресурсосберегающей технологии прокатки трамвайных рельсов, применение которой позволило сократить расход электроэнергии, улучшить качество прокатанной продукции, повысить производительность прокатного стана с группой тандем. По расходу электроэнергии разработанная ресурсосберегающая технология прокатки трамвайных рельсов, в сравнении с прокатными станами, в состав которых входили клетки трио, обеспечила снижение на 55 кВт·ч/т, в сравнении с проектной калибровкой снижение составило 45 кВт·ч/т.

Повысилось качество трамвайных рельсов. На прокатных станах, в состав которых входили клетки трио, с чистовой клетью дуо, все трамвайные рельсы прокатывались по ТУ, в связи с тем, что не удавалось получить профиль в соответствии с требованиями ГОСТ. Выход трамвайных рельсов первого сорта по проектной технологии на прокатном стане с группой тандем составлял 74 % (по ТУ), после внедрения ресурсосберегающей технологии выход первого сорта составил 97 % (по ГОСТ).

Повысилась производительность стана с группой тандем. Производительность прокатного стана, в состав которого входят 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 стана с группой тандем составляет 68,2 т/час.



Рисунок 10 – Темплет поперечного сечения трамвайного рельса после прокатки НЛЗ с максимальной осевой пористостью

Разработаны и внедрены в промышленное производство новые эффективные скоростные режимы прокатки трамвайных рельсов в чистовой непрерывно-реверсивной группе клеток стана тандем, согласно которым 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) (рисунок 11).

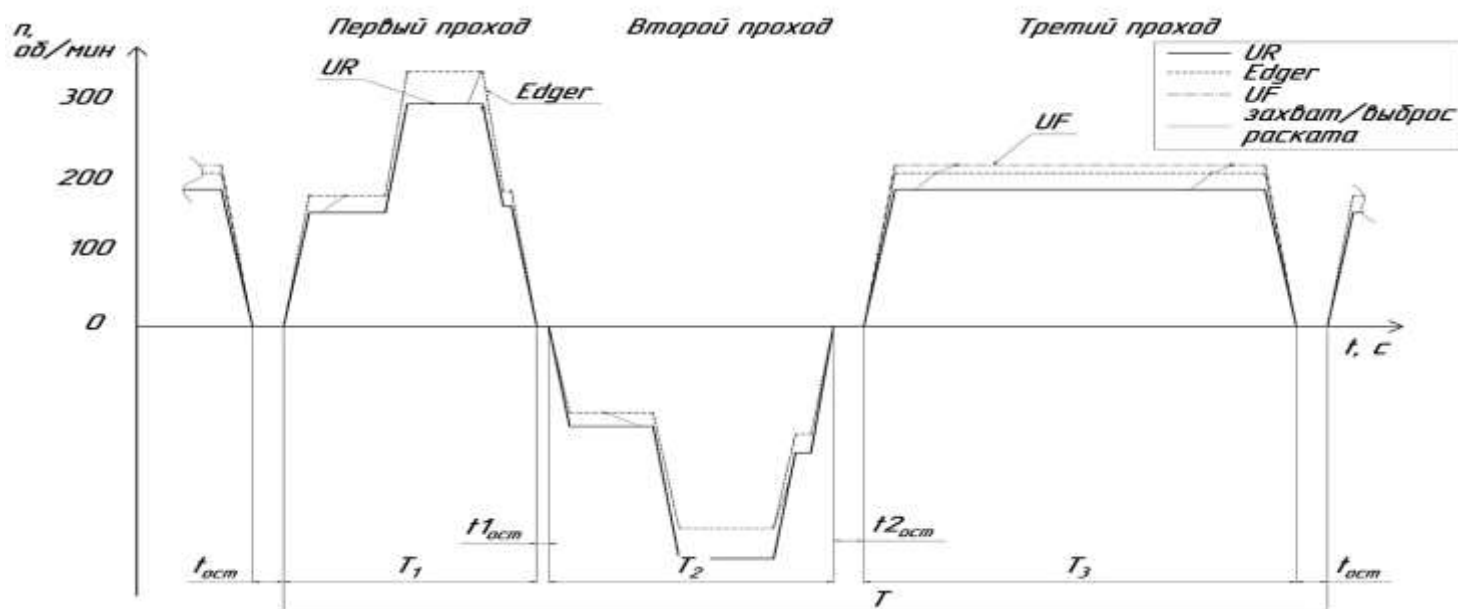


Рисунок 11 – Диаграмма скоростных режимов для прокатки в чистовой непрерывной группе клеток стана тандем

Прокатка в первом проходе. При подходе металла к чистовой непрерывной группе клеток автоматически запускаются главные двигатели универсальной клетки UR и вспомогательной двухвалковой клетки ER. Передаточное отношение шестеренных клеток тандем группы составляет $i = 5,3$. Разгон вала главного двигателя клетки UR происходит от 0 до 152 об/мин с ускорением 74,15 об/мин·с. Разгон вала 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 при постоянной частоте вращения валков: для клетки UR при оборотах вала главного двигателя 152 об/мин, для клетки ER при 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 постоянство секундных объемов и вытяжку от обжатия в предшествующем калибре. 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 главного 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. Торможение валков клеток UR и ER производится за два этапа. Для клетки UR на первой ступени торможения вала главного двигателя происходит снижение оборотов от 297,55 до 161,49 об/мин, после чего валки вращаются с постоянной частотой. На второй

ступени торможения происходит снижение оборотов вала главного двигателя от 161,49 до 0 об/мин. Для клетки ER на первой ступени производится торможение и число оборотов вала главного 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 главного 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 клеток 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 клеток автоматически во всех трех клетях одновременно начинают разгоняться прокатные валки. В клетях UR разгон валков происходит при вращении вала главного двигателя от 0 до 183,44 об/мин с ускорением 73,38 об/мин·с. В клетях ER разгон валков происходит при вращении вала главного двигателя от 0 до 204,02 об/мин с ускорением 82,14 об/мин·с. В клетях UF разгон валков происходит при вращении вала главного двигателя от 0 до 216,77 об/мин с ускорением 86,71 об/мин·с. Затем приводные валки всех трех клеток вращаются с постоянной частотой. Захват металла производится при постоянной частоте вращения валков. В клетях UR захват раската происходит при постоянной частоте вращения валков, при этом вал главного двигателя вращается 183,44 об/мин. В клетях ER захвата раската происходит при частоте вращения вала главного двигателя 204,02 об/мин и в клетях UF при частоте вращения вала главного двигателя 216,77 об/мин. Далее валки клеток UR-ER-UF в течение некоторого времени прокатывают металл с постоянной скоростью. Выход металла производится при постоянной частоте вращения валков всех клеток: из клетки UR на постоянной частоте вращения вала главного двигателя равной 183,44 об/мин; ER при частоте вращения вала главного двигателя 204,02 об/мин; UF при частоте вращения вала главного двигателя 216,77 об/мин. После выхода металла валки клеток UR, ER и UF вращаются некоторое время с постоянной частотой вращения. Затем происходит одновременное торможение вала главного двигателя 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 клеток устанавливаются в калибры UR-1, клеть ER смещается на исходную позицию калибра ER-1, а валки клетки UF разводятся, после чего непрерывно-реверсивная группа клеток готова к прокатке следующей полосы.

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 ($M_{\text{дин. стана}}$) (рисунок 12).

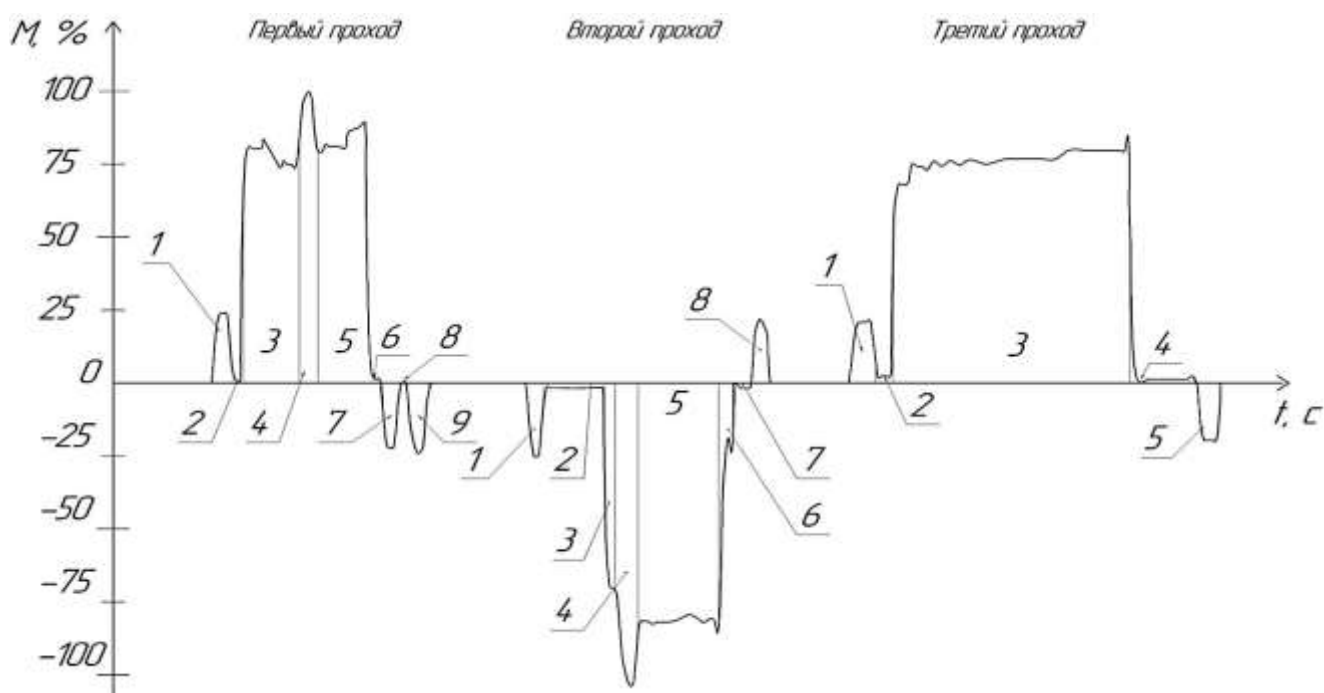


Рисунок 12 – Диаграмма моментов (фактическая) при прокатке в клети UR непрерывной группы клетей тандем

По предложенной технологии прокатки захват металла валками 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 повышение динамического момента от вертикальных валков ($M_{\text{дин. верт}}$) и динамического момента полосы ($M_{\text{дин. полосы}}$) является незначительным. Установлено, что величина момента холостого хода при прокатке трамвайных рельсов составляет $1,5 \div 2$ % от $M_{\text{ст}}$. С повышением скорости прокатки в два раза величина статического момента $M_{\text{ст}}$ возрастает на 6,5 % (таблица 1 – 5). Разработанные эффективные скоростные режимы прокатки трамвайных рельсов в непрерывно-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.

Таблица 1 – 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	$M_{\text{дин1}}$	$M_{\text{хол}}$	$M_{\text{ст}}$	$M_{\text{ст}} + M_{\text{дин}}$	$M_{\text{ст}}$	$M_{\text{хол}}$	$M_{\text{дин.т}}$	$M_{\text{хол}}$	$M_{\text{дин.т}}$
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

Таблица 2 – 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

Таблица 3 – 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

Таблица 4 – 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

Таблица 5 – 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

В четырехвалковых калибрах чистовой группы клетей внедрен предложенный способ прокатки трамвайных рельсов, 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 P_p и подошвы P_r профиля, были равны между собой $P_p \approx P_r$ (рисунок 13). 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. Предложенный способ прокатки позволяет исключить осевые усилия на горизонтальные валки, а

четырёхвалковый 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 с подшипниками горизонтальных валков и повышение производительности прокатного стана в связи с уменьшением количества перевалок клетей, связанных с выработками калибров из-за действия осевых сил на горизонтальные валки. Новизна разработанного способа прокатки рельсовых профилей в четырёхвалковых калибрах защищена патентом РФ №2595082.

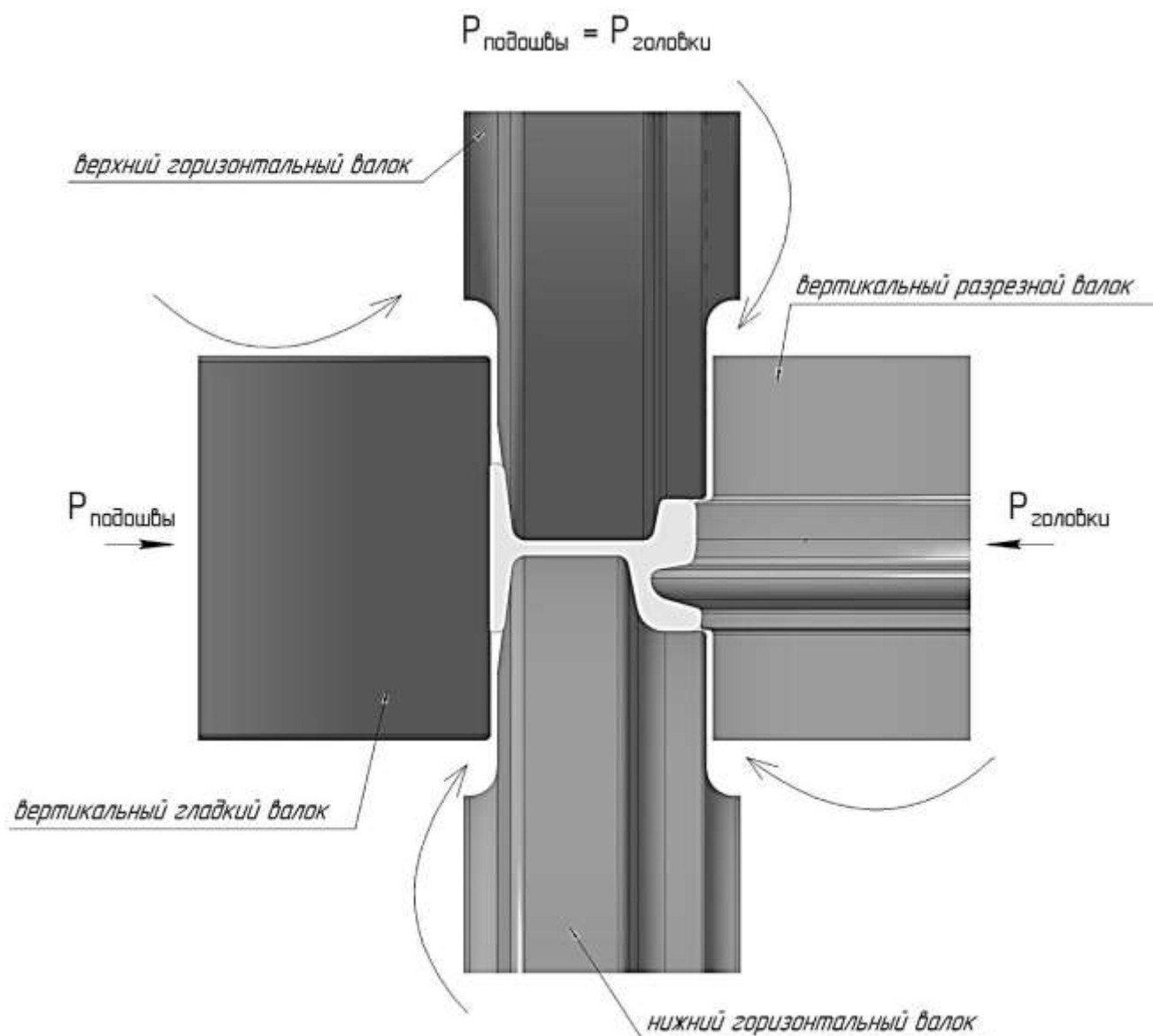


Рисунок 13 – 3-D модель четырёхвалкового калибра, уравновешенного по силам прокатки в горизонтальной плоскости

По итогам проведенных исследований разработана и внедрена в промышленное производство на рельсобалочном стане с группой тандем АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

новая ресурсосберегающая технология прокатки трамвайных рельсов по ГОСТ Р 55941-2014 «Рельсы трамвайные желобчатые» (рисунок 14).

На основании теоретических и практических результатов исследований, изложенных в диссертации, полученных на примере сложного асимметричного профиля трамвайного рельса, разработаны технологии прокатки более простых по геометрии асимметричных рельсовых профилей – остряковых (ОР50, ОР65) и усовиковых рельсов (УР65).

С применением разработанного метода расчета проекций контактных поверхностей металла с валками получены расчетные силы прокатки. Разработаны технологии прокатки с уравновешенными по силам прокатки в горизонтальной плоскости четырехвалковыми калибрами (рисунок 15).

Далее, в соответствии с разработанной методикой, проведены компьютерные моделирования, по результатам которых получены значения интенсивности деформаций и интенсивности напряжений, а также произведены исследования по трансформации и выработке осевой пористости, после чего осуществлены промышленные эксперименты, которые подтвердили адекватность проведенного исследования.

Разработанная ресурсосберегающая технология прокатки для асимметричных рельсовых профилей – трамвайных, остряковых и усовиковых рельсов внедрена в производственный процесс на стане с группой тандем АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

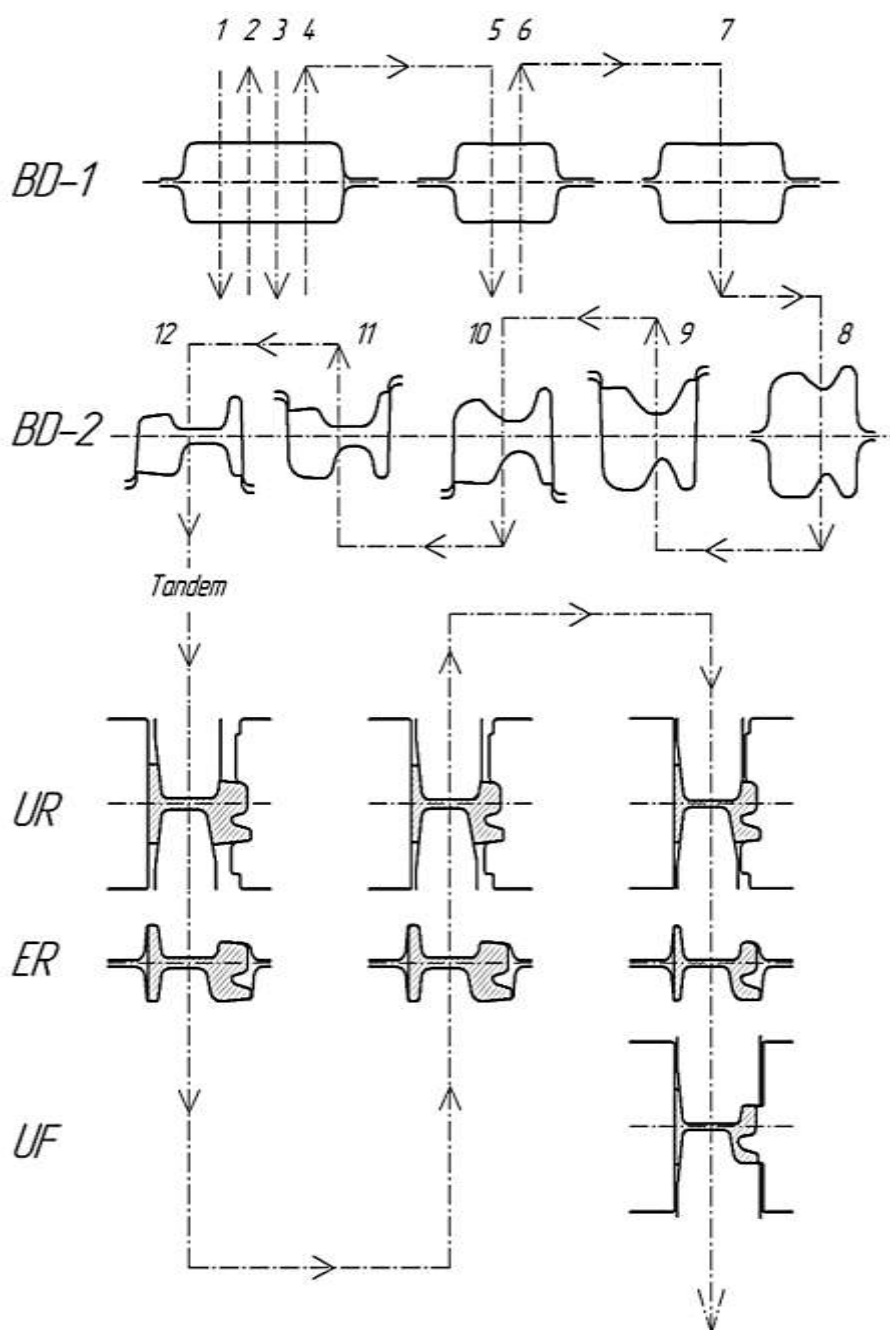


Рисунок 14 – Схема прокатки трамвайных рельсов по разработанной технологии

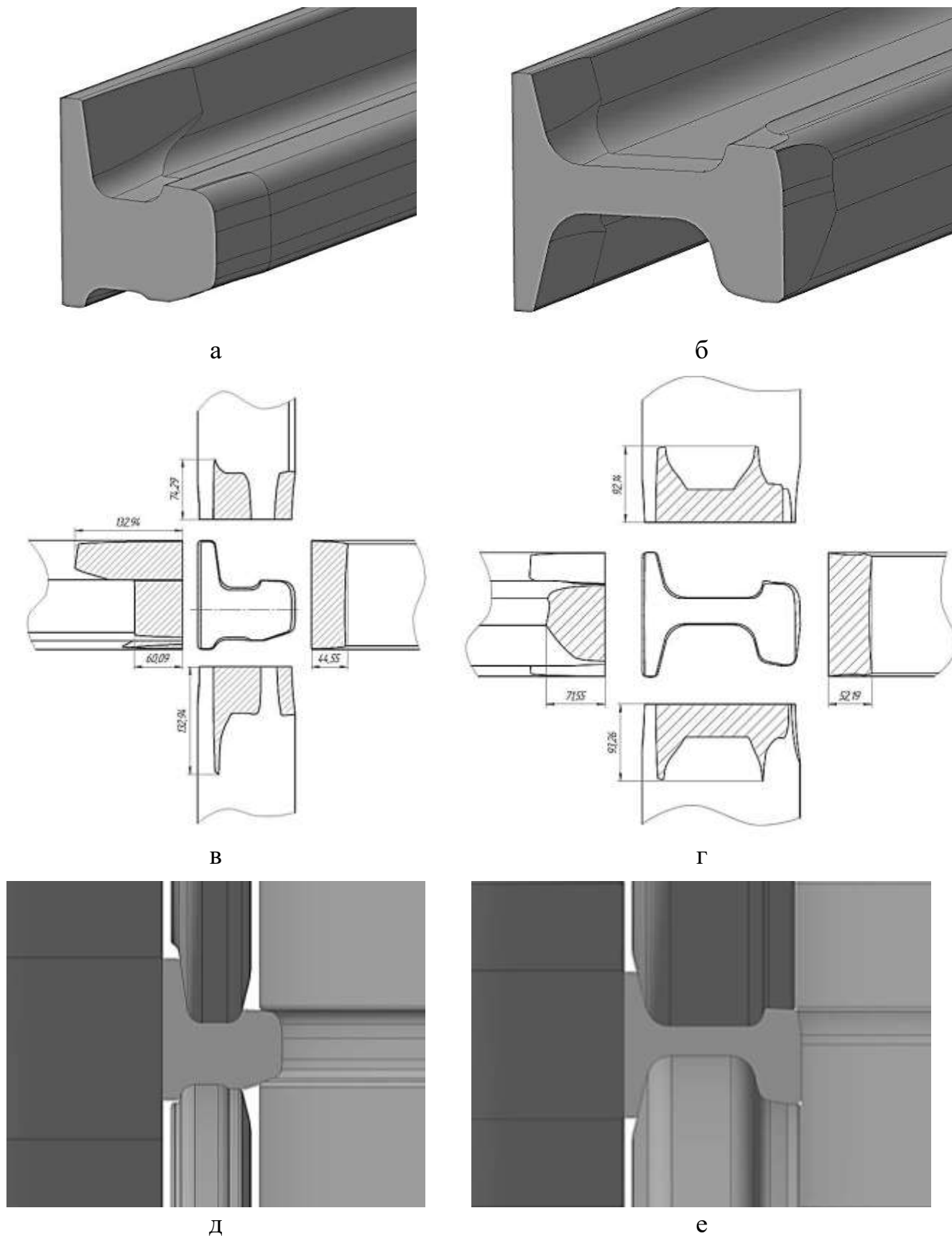


Рисунок 15 – Компьютерное моделирование уравновешенного четырехвалкового калибра для ОР50 и УР65: а, б – 3-D модель геометрических очагов деформации; в, г – проекции контактных поверхностей металла с валками; д, е – 3-D модели уравновешенных четырехвалковых калибров

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 вала, 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 натурных исследований.

3. Разработан 3D-метод, позволяющий с высокой точностью рассчитать, применяя системы трехмерного твердотельного моделирования, площадь контактной поверхности металла с вальками, 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.

6. Исследовано с помощью компьютерного моделирования и натурных 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 $\sigma_e = 162 \text{ МПа}$, ресурс 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 $\Sigma\lambda_{1-10} = 4,13$. 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 $0,6 \div 0,7$ 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 усиковые 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 усиковых 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 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.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В НАУЧНЫХ ЖУРНАЛАХ И ИЗДАНИЯХ

Монографии:

1. Сметанин, С. В. Энергосиловые параметры прокатки трамвайных рельсов [Текст] / С. В. Сметанин, В. Н. Перетяtko; Монография // Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2017. – 268 с. ISBN 978-5-7806-0481-5.
2. Сметанин, С. В. Прокатка трамвайных рельсов [Текст] / С. В. Сметанин, В. Н. Перетяtko, А. Б. Юрьев, М. В. Филиппова; АО «ЕВРАЗ Объед. Зап.-Сиб. металлург. комбинат», Мин-во науки и высш. обр. РФ, ФГБОУ ВПО «Сибирский гос. индустр. ун-т». – Новосибирск : Издательство СО РАН, 2018. – 408 с. ISBN 978-5-7692-1585-8.

Статьи в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК:

3. Перетяtko, В. Н. Деформация металла в чистовом разрезном калибре при прокатке трамвайных желобчатых рельсов [Текст] / В. Н. Перетяtko, С. В. Сметанин, М. В. Филиппова // Известия вузов. Черная металлургия. – 2008. – № 10. – С. 68–69.
4. Сметанин, С. В. Исследование технологии прокатки и напряженно-деформированного состояния трамвайных желобчатых рельсов [Текст] / С. В. Сметанин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – № 4. – С. 35–38.
5. Сметанин, С. В. Исследование напряженно-деформированного состояния металла при прокатке трамвайных рельсов в универсальном четырехвалковом калибре [Текст] / С. В. Сметанин, В. Н. Перетяtko, К. В. Волков // Сталь. – 2014. – № 7. – С. 36–39.
6. Перетяtko, В. Н. Исследование деформированного состояния металла при прокатке в универсальных клетях [Текст] / В. Н. Перетяtko, С. В. Сметанин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2014. – № 11. – С. 29–33.
7. Перетяtko, В. Н. Исследование напряженного состояния металла при прокатке в четырехвалковых разрезных калибрах [Текст] / В. Н. Перетяtko, С. В. Сметанин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2015. – № 1. – С. 28–34.
8. Перетяtko, В. Н. Новая технология прокатки трамвайных желобчатых рельсов [Текст] / В. Н. Перетяtko, С. В. Сметанин, М. В. Филиппова // Известия вузов. Черная металлургия. – 2015. – № 5. – С. 328–335.
9. Перетяtko, В. Н. Энергоэффективная технология прокатки металла в четырехвалковых разрезных калибрах [Текст] / В. Н. Перетяtko, С. В. Сметанин // Производство проката. – 2015. – № 7. – С. 20–27.
10. Перетяtko, В. Н. Исследование пластических деформаций при прокатке рельсов [Текст] / В. Н. Перетяtko, С. В. Сметанин // Производство проката. – 2015. – № 10. – С. 10–17.
11. Перетяtko, В. Н. Прокатка фланцевых профилей в чистовых калибрах [Текст] / В. Н. Перетяtko, С. В. Сметанин // Производство проката. – 2015. – № 12. – С. 29–37.

12. Перетяtko, В. Н. Энергоэффективная технология прокатки рельсов в четырехвалковых калибрах [Текст] / В. Н. Перетяtko, С. В. Сметанин // Металлург. – 2016. – № 7. – С. 54–59.
13. Перетяtko, В. Н. Энергоэффективная технология прокатки металла в четырехвалковых разрезных калибрах [Текст] / В. Н. Перетяtko, С. В. Сметанин // Сталь. – 2015. – № 9. – С. 32–36.
14. Перетяtko, В. Н. Контактная площадь и усилия при горячей прокатке сложных профилей [Текст] / В. Н. Перетяtko, С. В. Сметанин, М. В. Филиппова // Производство проката. – 2016. – № 2. – С. 16–21.
15. Перетяtko, В. Н. Силы и контактные площади при горячей прокатке сложных профилей [Текст] / В. Н. Перетяtko, С. В. Сметанин, М. В. Филиппова // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – № 2. – С. 26–32.
16. Перетяtko, В. Н. Оптимизация прокатки рельсов в четырехвалковых калибрах методом планирования эксперимента [Текст] / В. Н. Перетяtko, С. В. Сметанин, М. В. Филиппова // Проблемы черной металлургии и металловедения. – 2015. – № 4. – С. 39–48.
17. Перетяtko, В. Н. Исследование закономерностей прокатки трамвайных рельсов в четырехвалковых калибрах [Текст] / В. Н. Перетяtko, С. В. Сметанин // Черные металлы. – 2016. – № 3. – С. 49–57.
18. Перетяtko, В. Н. Повышение качества трамвайных рельсов [Текст] / В. Н. Перетяtko, С. В. Сметанин, Е. В. Полевой, М. В. Филиппова // Производство проката. – 2016. – № 8. – С. 26–29.
19. Перетяtko, В. Н. Повышение эксплуатационных характеристик трамвайных рельсов [Текст] / В. Н. Перетяtko, С. В. Сметанин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – № 10. – С. 28–32.
20. Перетяtko, В. Н. Исследование закономерностей приращения и утяжки фланцев трамвайного рельса при прокатке в четырехвалковых калибрах [Текст] / В. Н. Перетяtko, С. В. Сметанин, А. Б. Юрьев // Черные металлы. – 2016. – № 10. – С. 44–49.
21. Сметанин, С. В. Особенности прокатки асимметричных профилей в четырехвалковых калибрах [Текст] / С. В. Сметанин, В. Н. Перетяtko // Производство проката. – 2016. – № 12. – С. 17–28.
22. Перетяtko, В. Н. Особенности прокатки трамвайных желобчатых рельсов в четырехвалковых калибрах [Текст] / В. Н. Перетяtko, С. В. Сметанин // Бюллетень Черная металлургия. – 2016. – № 10. – С. 47–52.
23. Сметанин, С. В. Скоростные условия прокатки трамвайных рельсов в непрерывной реверсивной группе "тандем" [Текст] / С. В. Сметанин, В. Н. Перетяtko, А. Б. Юрьев, М. В. Филиппова // Сталь. – 2017. – № 3. – С. 30–32.
24. Сметанин, С. В. Разработка скоростных режимов прокатки трамвайных рельсов в непрерывной реверсивной группе клетей [Текст] / С. В. Сметанин, В. Н. Перетяtko // Металлург. – 2017. – № 9. – С. 78–81.
25. Сметанин, С. В. Режимы прокатки трамвайных рельсов в непрерывной реверсивной группе клетей [Текст] / С. В. Сметанин, В. Н. Перетяtko // Бюллетень Черная Металлургия. – 2017. – № 2. – С. 59–63.
26. Сметанин, С. В. Исследование крутящих моментов при прокатке трамвайных рельсов в непрерывной реверсивной группе клетей [Текст] / С. В. Сметанин, В. Н. Перетяtko // Черные металлы. – 2017. – № 7. – С. 35–40.

27. Сметанин, С. В. Нагрузочные диаграммы при прокатке трамвайных рельсов в непрерывной реверсивной группе клетей [Текст] / С. В. Сметанин, В. Н. Перетяtko, А. Б. Юрьев, М. В. Филиппова // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2017. – № 2. – С. 20–27.

28. Сметанин, С. В. Скоростные режимы и действующие моменты при прокатке трамвайных рельсов в непрерывной реверсивной группе клетей [Текст] / С. В. Сметанин, В. Н. Перетяtko // Производство проката. – 2017. – № 7. – С. 29–36.

29. Сметанин, С. В. Прогрессивная энергоэффективная технология прокатки трамвайных рельсов на современном универсальном рельсобалочном стане [Текст] / С. В. Сметанин // Бюллетень Черная металлургия. – 2017. – № 8. – С. 74–82.

30. Сметанин, С. В. Прокатка трамвайных рельсов. Часть 1. [Текст] / С. В. Сметанин // Производство проката. – 2017. – № 11. – С. 9–23.

31. Сметанин, С. В. Прокатка трамвайных рельсов. Часть 2. [Текст] / С. В. Сметанин // Производство проката. – 2017. – № 11. – С. 22–24.

32. Сметанин, С. В. Прокатка трамвайных рельсов. Часть 3. [Текст] / С. В. Сметанин // Производство проката. – 2018. – № 1. – С. 30–39.

33. Сметанин, С. В. Современная технология прокатки трамвайных желобчатых рельсов [Текст] / С. В. Сметанин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2018. – № 1. – Т. 16. – С. 31–37.

34. Сметанин, С. В. Современная технология прокатки трамвайных желобчатых рельсов (Продолжение) [Текст] / С. В. Сметанин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2018. – № 2. – Т. 16. – С. 74–82.

35. Сметанин, С. В. Внедрение новой энергоэффективной технологии прокатки трамвайных рельсов на современном рельсобалочном стане [Текст] / С. В. Сметанин // Производство проката. – 2018. – № 10. – С. 17–23.

36. Сметанин, С. В. Ресурсосберегающая технология прокатки железнодорожных рельсов Виньоля на универсальном рельсобалочном стане [Текст] / С. В. Сметанин, В. Н. Перетяtko, А. Б. Юрьев, В. В. Дорофеев, М. В. Филиппова // Производство проката. – 2019. – № 7. – С. 21–27.

37. Сметанин, С. В. Разработка ресурсосберегающей технологии прокатки остряковых рельсов на универсальном рельсобалочном стане [Текст] / С. В. Сметанин, В. Н. Перетяtko, В. В. Дорофеев, А. Б. Юрьев, М. В. Филиппова // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2019. – № 2. – С. 5–12.

38. Сметанин, С. В. Разработка прогрессивных калибровок остряковых и усовиковых рельсов на универсальном рельсобалочном стане [Текст] / С. В. Сметанин, А. Б. Юрьев, В. В. Дорофеев, В. Н. Перетяtko, А. В. Добрянский // Металлург – 2019. – № 6. – С. 35–39.

39. Сметанин, С. В. Ресурсосберегающая технология прокатки асимметричных рельсовых профилей на стане тандем [Текст] / С. В. Сметанин, В. Н. Перетяtko, А. Б. Юрьев, В. В. Дорофеев // Технология металлов – 2020. – № 1. – С. 55–64.

Статьи в зарубежных журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science:

40. Peretyat'ko, V. N. Energy-Efficient Four-Roll Rail Rolling Technology [Text] / V. N. Peretyat'ko, S. V. Smetanin // Metallurgist. – 2016. – Vol. 60. – No. 7 – P. 699–705.

41. Peretyat'ko, V. N. New rolling technology for streetcar girder rail [Text] / V. N. Peretyat'ko, S. V. Smetanin, M. V. Filippova // Steel in Translation. – 2015. – Vol. 45. – No. 5 – P. 312–317.

42. Peretyat'ko, V. N. Energy-Efficient Rolling in Four-Roller Grooves [Text] / V. N. Peretyat'ko, S. V. Smetanin // Steel in Translation. – 2015. – Vol. 45 – No. 9. – P. 693–697.

43. Smetanin, S. V. Developing High-Speed Rolling Schedules for Tramrails in Continuous Reversing Train [Text] / S. V. Smetanin, V. N. Peretyat'ko // Metallurgist. – 2018. – Vol. 61. – No. 1. – P. 794–799.

44. Smetanin, S. V. Development of Advanced Calibrations for Point and Wing Rails in a Universal Rail and Structural Steel Mill [Text] / S. V. Smetanin, A. B. Yur'ev, V. V. Dorofeev, V. N. Peretyat'ko, A. V. Dobryanskii // Metallurgist. – 2019. – Vol. 63. – No 5. – P. 566–572.

Патенты:

45. Пат. 2403108 РФ. МПК В21/В 31/00. Кассета универсальной четырехвалковой клетки для прокатки трамвайных рельсов / Юрьев А. Б., Степанов С. В., Дорофеев В. В., Перетяtko В. Н., Сметанин С. В. – № 2009101561/02; заявл. 19.01.2009; опубли. 10.11.2010. Бюл. № 31.

46. Пат. 2595082 РФ. МПК В21В 1/08. Способ прокатки рельсов / Перетяtko В. Н., Сметанин С. В., Юрьев А. Б., Темлянцев М. В., Филиппова М. В. – № 2015116829/02; заявл. 30.04.2015; опубли. 20.08.2016. Бюл. № 23.

47. Пат. 2604076 РФ. МПК В21/В 31/02. Способ прокатки трамвайных желобчатых рельсов и чистовой четырехвалковый калибр для прокатки трамвайных желобчатых рельсов / Перетяtko В. Н., Сметанин С. В., Юрьев А. Б., Темлянцев М. В., Филиппова М. В. – № 2015118469/02; заявл. 18.05.2015; опубли. 10.12.2016. Бюл. № 34.

Публикации в других изданиях:

48. Перетяtko, В. Н. Исследование технологии прокатки трамвайных рельсов в рельсобалочном цехе ОАО «НКМК» [Текст] / В. Н. Перетяtko, С. В. Сметанин, В. В. Дорофеев; Сиб. гос. индустр. ун-т // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии: сб. науч. тр. – Вып. 21 – Новокузнецк, 2008. – С. 78–82.

49. Перетяtko, В. Н. Совершенствование технологии прокатки трамвайных желобчатых рельсов на основе анализа напряженно-деформированного состояния [Текст] / В. Н. Перетяtko, С. В. Сметанин // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. Вып. 23. / Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк, 2009. – С. 94–101.

50. Сметанин, С. В. Компьютерное моделирование выработки осевой пористости при прокатке рельсов [Текст] / С. В. Сметанин, М. В. Филиппова, В. Н. Перетяtko // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии – 2015. – № 34. – С. 49–57.

51. Сметанин, С. В. Анализ деформированного состояния металла при прокатке рельсов [Текст] / С. В. Сметанин // Наука и мир. Международный научный журнал – 2015. – №9 (25), Том 1. – С. 54–55.

52. Сметанин, С. В. Возможности современных расчетных модулей по трехмерному моделированию процессов обработки металлов давлением [Текст] / С. В. Сметанин, Н. С. Большаков // Машиностроение. Материалы семнадцатой науч.-практ. конф. по проблемам механики и машиностроения / под ред. Л. Т. Дворникова, Э. Я. Живаго ; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк, 2007. – С. 97–102.

53. Сметанин, С. В. Универсальная клеть. Разрезной ролик [Текст] / С. В. Сметанин // Тезисы 45-й научно-технической конференции молодых специалистов. – Новокузнецк, 2006. – С. 52–53.

54. Сметанин, С. В. РБЦ. Участок стана. Универсальная клеть. Разрезной ролик [Текст] / С. В. Сметанин // Тезисы V-й совместной науч.-техн. конф. молодых специалистов. – Новокузнецк, 2006. – С. 32.

55. Сметанин, С. В. Непрерывная чистовая группа клетей [Текст] / С. В. Сметанин // Тезисы 46-й науч.-техн. конф. молодых специалистов. – Новокузнецк, 2007. – С. 26.

56. Сметанин, С. В. РБЦ. Участок стана. Непрерывная чистовая группа клетей [Текст] / С. В. Сметанин // Тезисы VI-й совместной науч.-техн. конф. молодых специалистов. – Новокузнецк, 2007. – С. 22.

57. Сметанин, С. В. Исследование напряженно-деформированного состояния при прокатке трамвайных рельсов [Текст] / С. В. Сметанин, М. В. Филиппова // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Труды всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2008. – С. 250–253.

58. Перетяtko, В. Н. Исследование напряженно-деформированного состояния металла при прокатке в четырехвалковых разрезных калибрах [Текст] / В. Н. Перетяtko, С. В. Сметанин, К. В. Волков // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: Сб. научных докладов по материалам юбилейного 130-го заседания НП "Рельсовая комиссия" (7-9 октября 2014 г., г. Новокузнецк). – Санкт-Петербург, 2015. – С. 211–220.

59. Перетяtko, В. Н. Определение контактной поверхности металла с валками и усилия при горячей прокатке сложных профилей [Текст] / В. Н. Перетяtko, С. В. Сметанин, М. В. Филиппова // Ползуновский альманах. XVI Международная научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штамповочного производств» – Барнаул: АлтГТУ им. И. И. Ползунова. – 2015. – С. 111–121.

60. Перетяtko, В. Н. Метод определения контактной площади и усилия при горячей прокатке сложных профилей [Текст] / В. Н. Перетяtko, С. В. Сметанин // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений (по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» 24–25 сентября 2015 г.): Сборник научных докладов. – Екатеринбург: ОАО «УИМ». – 2016. – С. 119–129.

61. Сметанин, С. В. Математическое моделирование прокатки трамвайных рельсов в четырехвалковых калибрах [Текст] / С. В. Сметанин, В. Н. Перетяtko // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений (по

материалам заседания НП «Рельсовая комиссия» 7–9 сентября 2016 г.): Сборник научных докладов. – Екатеринбург: ОАО «УИМ». – 2016. – С. 157–171.

62. Сметанин, С. В. Разработка энергоэффективных технологий прокатки асимметричных рельсовых профилей на основе анализа напряженно-деформированного состояния металла [Текст] / С. В. Сметанин // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. Сборник материалов XXII международной научно-практической конференции (13 нояб. 2015 г.). – Новосибирск, 2015. – С. 124–129.

63. Сметанин, С. В. Оптимизация прокатки рельсов методом планирования эксперимента [Текст] / С. В. Сметанин // Новое слово в науке и практике: гипотезы и апробация результатов исследований. Сборник материалов XX Международной научно-практической конференции – Новосибирск, 2015. – С. 61–65.

64. Сметанин, С. В. Новый подход в определении контактной площади и усилия при горячей прокатке сложных профилей [Текст] / С. В. Сметанин // Проблемы внедрения результатов инновационных разработок. Сборник статей международной научно-практической конференции / в 2 ч., Ч. 1. – 2015. – С. 52–55.

65. Сметанин, С. В. Новые технологии прокатки асимметричных рельсовых профилей [Текст] / С. В. Сметанин // Традиционная и инновационная наука: история, современное состояние, перспективы: сборник статей Международной научно-практической конференции (25 декабря 2015 г., г. Пермь) / в 5 ч., Ч. 3. – 2015. – С. 92–94.

66. Сметанин, С. В. Разработка прогрессивных способов прокатки рельсов методом планирования эксперимента [Текст] / С. В. Сметанин // Прорывные научные исследования как двигатель науки: сборник статей Международной научно-практической конференции (15 декабря 2015 г. г. Самара) в 3 ч., Ч. 2. – 2015. – С. 93–95.

67. Сметанин, С. В. Исследование структуры рельсов в зависимости от технологии прокатки и последующей термообработки [Текст] / С. В. Сметанин // Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом: сборник статей Международной научно-практической конференции (10 января г. Самара). – 2015. – С. 158–160.

68. Сметанин, С. В. Усилия при горячей прокатке сложных профилей [Текст] / С. В. Сметанин // Роль инновации в трансформации современной науки: сборник статей Международной научно-практической конференции (15 января г. Тюмень). / в 3 ч., Ч. 2. – 2016. – С. 69–70.

69. Сметанин, С. В. Регрессионная математическая модель прокатки рельсов в четырехвалковых калибрах [Текст] / С. В. Сметанин // Наука третьего тысячелетия: сборник статей Международной научно-практической конференции (20 января 2016 г., г. Курган) в 4 ч., Ч. 4 – 2016. – С. 79–81.

70. Сметанин, С. В. Исследование макроструктуры и механических свойств трамвайных желобчатых рельсов [Текст] / С. В. Сметанин // Современные технологии в мировом научном пространстве: сборник статей Международной научно-практической конференции (25 января 2016 г., г. Томск). / в 3 ч., Ч. 1. – 2016. – С. 85–87.

71. Сметанин, С. В. Исследование макроструктуры и микроструктуры трамвайных желобчатых рельсов [Текст] / С. В. Сметанин // Интеллектуальный и научный потенциал XXI века: сборник статей Международной научно-практической конференции (1 февраля, 2016 г., г. Уфа), в 4 ч., Ч. 4. – 2016. – С. 73–74.

72. Перетятыко, В. Н. Энергоэффективная технология прокатки трамвайных рельсов в четырехвалковых калибрах [Текст] / В. Н. Перетятыко, С. В. Сметанин, М. В. Филиппова // Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах: труды IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. в 2 ч., Ч. 1. / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей редакцией В. П. Цымбала, Т. В. Киселевой. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2016. – С. 235–240.

73. Сметанин, С. В. Исследование динамических характеристик непрерывной реверсивной группы клетей при прокатке трамвайных рельсов [Текст] / С. В. Сметанин // Интеллектуальный и научный потенциал XXI века: сборник статей Международной научно-практической конференции (20 декабря 2016 г. г. Казань) в. 6 ч., Ч. 4. – 2016. – С. 191–192.

74. Сметанин, С. В. Действительные крутящие моменты при прокатке трамвайных рельсов [Текст] / С. В. Сметанин // В мире науки и инноваций: сборник статей Международной научно-практической конференции (25 декабря 2016 г., г. Пермь). в 8 ч., Ч. 4. – 2016. – С. 170–172.

75. Сметанин, С. В. Снижение динамических моментов и повышение надежности оборудования главной линии прокатного стана [Текст] / С. В. Сметанин, В. Н. Перетятыко, А. Б. Юрьев, М. В. Филиппова // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2017. – №1(8). – С. 21–28.

76. Сметанин, С. В. Исследования, разработки и промышленное освоение новой энергоэффективной технологии прокатки трамвайных рельсов на современном рельсобалочном стане с использованием непрерывной реверсивной группы клетей [Текст] / С. В. Сметанин // Инновации, технологии, наука: сборник статей Международной научно-практической конференции (25 января 2017 г., г. Пермь). В 4 ч., Ч. 3. – 2017. – С. 139–141.

77. Сметанин, С. В. Прокатка трамвайных рельсов [Текст] / С. В. Сметанин // Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом: сборник статей Международной научно-практической конференции (13 февраля 2017 г., г. Челябинск). – 2017. – С. 100–102.

78. Сметанин, С. В. Разработка скоростных режимов прокатки трамвайных рельсов в непрерывной чистовой группе клетей [Текст] / С. В. Сметанин // Концепции фундаментальных и прикладных научных исследований: сборник статей Международной научно-практической конференции (20 февраля 2017 г., г. Казань). В 4 ч., Ч.2. – 2017. – С. 54–56.

79. Сметанин, С. В. Прокатка сложных фланцевых профилей [Текст] / С. В. Сметанин // Теория и практика высоких технологий в промышленности: сборник статей Международной научно-практической конференции (13 марта 2017 г., г. Уфа). – 2017. – С. 79–81.

80. Сметанин, С. В. Прогрессивная энергоэффективная технология прокатки трамвайных рельсов [Текст] / С. В. Сметанин // Новые задачи технических наук и

пути их решения: сборник статей Международной научно-практической конференции (13 мая 2017 г., г. Самара). – 2017. – С. 211–213.

81. Сметанин, С. В. Прокатка трамвайных рельсов на современном рельсобалочном стане [Текст] / С. В. Сметанин // Фундаментальные проблемы науки: сборник статей Международной научно-практической конференции (20 июня 2017 г., г. Казань). В 4 ч., Ч. 3. – 2017. – С. 133–135.

82. Сметанин, С. В. Разработка скоростных режимов прокатки трамвайных рельсов в непрерывной реверсивной группе клетей [Текст] / С. В. Сметанин, В. Н. Перетятко // Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XX Международной научно-практической конференции: в 2 ч., Ч. 2 / под ред. Е. В. Протопопова; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2017. – С. 211–216.

83. Сметанин, С. В. Скоростные режимы и действующие моменты при прокатке трамвайных рельсов в непрерывной реверсивной группе клетей [Текст] / С. В. Сметанин, В. Н. Перетятко // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: Сб. научных докладов по материалам 133-го заседания НП "Рельсовая комиссия" (4 – 6 октября 2017г. г.Актобе, Казахстан) – Екатеринбург: ОАО «УИМ», 2018. – С. 135–149.

84. Smetanin, S. V. Development of high-speed rolling modes of trim rails in the continuous reverse train [Text] / S. V. Smetanin V. N. Peretyatko, V. V. Dorofeev, A. G. Nikitin, E. Ya. Zhivago // The 20th International Scientific and Research Conference "Metallurgy: Technologies, Innovation, Quality. Metallurgy-2017 (15–16 November 2017, Novokuznetsk, Russia) – IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Published online – 19 October 2018. – Volume 411 – 012071.