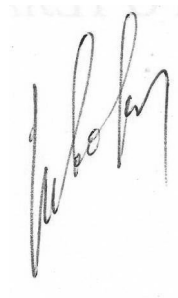


На правах рукописи



ШВАРЦ Данил Леонидович

**Разработка теоретических основ и обоснование основных технологических
решений процесса прокатки железнодорожных рельсов на универсальных
рельсобалочных станах**

05.16.05 – Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Екатеринбург – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Официальные оппоненты:

ДОРОФЕЕВ Владимир Викторович, доктор технических наук, АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат», г. Новокузнецк, главный калибровщик рельсобалочного цеха;

СИДЕЛЬНИКОВ Сергей Борисович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, заведующий кафедрой обработки металлов давлением;

ЛЕХОВ Олег Степанович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный профессионально-педагогический университет», г. Екатеринбург, профессор кафедры инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск

Защита состоится «23» мая 2019 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.04 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=288774>

Автореферат разослан « » _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Селиванова Ольга Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Для обеспечения постоянно растущего спроса на железнодорожные перевозки, в соответствии со «Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года», необходимо увеличить объем грузовых перевозок до 3300 млрд. тонно-км, пассажирооборот - до 231 млрд. пасс.-км., повысить ресурс рельсов на прямолинейных участках пути до 1500 млн.т груза брутто, увеличить маршрутные скорости движения пассажирских поездов на высокоскоростных магистралях до 250-350 км/ч.

До недавнего времени металлургические предприятия России и стран СНГ не имели технической возможности производить рельсы, отвечающие требованиям современных железных дорог, а их качество значительно уступало лучшим зарубежным аналогам (рельсам японских, французских, австрийских и др. производителей).

Поэтому для достижения требуемых эксплуатационных показателей железнодорожных рельсов осуществлена коренная реконструкция рельсового производства на ОАО «ЕВРАЗ-НКМК» г. Новокузнецк (2013 г.), введен в эксплуатацию новый рельсобалочный цех в ОАО «МЕЧЕЛ» г. Челябинск (2013 г.), построен новый рельсобалочный цех ТОО «Актюбинский рельсобалочный завод» в Республике Казахстан, г. Актобе (2015 г.).

Все три указанных предприятия реализуют современную схему производства железнодорожных рельсов, которая включает: нагрев непрерывнолитого блюма в методических печах с шагающим подом (балками); удаление первичной окалины; прокатку чернового рельсового профиля в одной или двух реверсивных клетях дуо; удаление вторичной окалины; прокатку готового рельса в непрерывно-реверсивных группах универсальных четырехвалковых клетей; дифференцированную термическую обработку с прокатного нагрева; охлаждение готовых рельсов на холодильнике; правку; проведение неразрушающего контроля в потоке прокатного стана и окончательную отделку (торцовку, резку, сверление отверстий и т.д.).

Непрерывно-реверсивные группы универсальных четырехвалковых клетей (группы тандем) применены впервые в практике отечественного прокатного производства.

Последнее обстоятельство делает **актуальным** проведение исследований, направленных на создание научных основ, разработку и научное обоснование основных технологических решений процесса прокатки железнодорожных рельсов на современных универсальных рельсобалочных станах.

Диссертационная работа выполнена в рамках следующих проектов и программ:

– «Разработка новой комплексной металлургической технологии производства высококачественных стальных изделий массового назначения» (в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на

2009-2013 годы, Государственный контракт от 15 июня 2009 г. № 02.740.11.0152, № гос. регистрации 01200905641);

– «Разработка научных основ физики и механики обработки металлов давлением с целью создания энерго– и ресурсосберегающих инновационных технологий производства металлургической продукции ответственного назначения» (государственное задание в сфере научной деятельности №11.1369.2014/К от 18.07.2014, № гос. регистрации 114122470051);

– «Инновационные технологические процессы обработки металлов давлением» (Президентская программа повышения квалификации инженерных кадров, № гос. рег. 55–2013–3–ЭФ, приказ по Минобрнауки России № 328 от 30.04.2013);

– «Разработка методики расчета рациональных калибровок валков и технологических режимов прокатки рельсов с применением универсальных клетей» (Хозяйственный договор между ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ» и ОАО «НТМК» №1443/08/0415);

– «Разработка и освоение технологии прокатки рельса Р65 на универсальном рельсобалочном стане ТОО «АРБЗ» (Хозяйственный договор между ФГАОУ ВПО УрФУ и ТОО «Актюбинский рельсобалочный завод №31/15/Н.977.210.013/15, от 19 февраля 2015 г.).

Степень разработанности темы исследования. Вопросам проектирования калибровок валков и разработки технологических режимов для прокатки рельсов посвящены работы В.Е. Грум-Гржимайло, И.И. Кучко, Б.П. Бахтинова, М.М. Штернова, Б.М. Илюковича, П.И. Полухина, И.С. Тришевского, П.А. Александрова, А.П. Чекмарева, Б.В. Мерекина, Б.Б. Диомидова, Н.В. Литовченко, В.Н. Перетяцько, В.В. Дорофеева и других ученых. Однако практически все известные методы расчета калибровок и технологических параметров разработаны применительно к способам прокатки рельсов в двухвалковых калибрах и базируются на обобщении практически освоенных режимов деформации раската на линейных рельсобалочных станах.

Теория прокатки рельсовых профилей в универсальных клетях развита недостаточно. Для расчета режимов прокатки и энергосиловых параметров в универсальных калибрах используют эмпирические формулы и эвристические приемы, установленные практикой, а также методы соответственной полосы. Научно обоснованной методики расчета калибровок валков и технологических параметров прокатки рельсов в универсальных калибрах до настоящего времени не создано.

Выше сказанное позволяет сформулировать **цель диссертационной работы:** используя вариационные принципы механики деформируемого тела и современные вычислительные и программные средства, разработать математическую модель процесса прокатки рельсового профиля в универсальных калибрах и на ее основе создать научно обоснованную методику проектирования калибровок валков и технологических режимов прокатки железнодорожных рельсов на современных универсальных рельсобалочных станах.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи**:

- выполнить постановку и решить вариационную задачу по определению формоизменения металла и энергосиловых параметров деформации при прокатке рельсового профиля в универсальном четырехвалковом калибре;

- по результатам численного решения указанной задачи определить закономерности изменения характеристик деформаций и энергосиловых параметров в зависимости от исходных параметров, определяющих условия прокатки рельсов на универсальном рельсобалочном стане. Получить систему инженерных формул для расчета коэффициентов деформации элементов профиля и энергосиловых параметров в процессе прокатки;

- с применением системы полученных формул создать математическую модель расчета калибровки валков и технологических режимов прокатки железнодорожных рельсов на типовом универсальном рельсобалочном стане;

- разработать методику расчета рациональных скоростных режимов прокатки по разработанной калибровке с оптимизацией технологического процесса по быстрдействию (производительности);

- разработать методику компьютерного моделирования температурных режимов прокатки рельсов на универсальном рельсобалочном стане с определением закономерностей изменения температурного и напряженно-деформированного состояния рельсового раската по длине и элементам профиля;

- составить общий алгоритм проектирования технологического режима прокатки заданного профиля рельса на современном универсальном рельсобалочном стане;

- применить созданную методику в целом для разработки технологических процессов прокатки наиболее востребованных железнодорожных рельсов Р65 на существующих и вновь создаваемых прокатных станах.

Научную новизну и теоретическую ценность представляют следующие разработки диссертации:

- впервые разработанная математическая модель формоизменения и энергосиловых параметров при прокатке рельсового профиля в универсальном четырехвалковом калибре;

- закономерности формоизменения металла и силовых воздействий при равномерной деформации профиля рельсового раската в универсальном четырехвалковом калибре. Установленные закономерности описаны инженерными формулами;

- научно обоснованный метод расчета формоизменения металла при прокатке в рельсовых калибрах;

- математически сформулированные условия захвата рельсового раската валками универсальной клетки;

- математическая модель и методика расчета рационального скоростного режима прокатки в непрерывно-реверсивных группах клетей современных универсальных рельсобалочных станов;

- методика моделирования температурного и напряженного состояния при прокатке длинномерных рельсов и закономерности изменения температуры металла по длине и элементам прокатываемого рельса;

- методика расчета энергосиловых параметров прокатки рельсов в универсальных калибрах.

Практическую значимость диссертации определяют следующие результаты:

- новая методика проектирования калибровок валков и технологических режимов при прокатке железнодорожным рельсов в универсальных калибрах, обеспечивающая получение равномерной деформации прокатываемого профиля и высокое качество рельсов;

- алгоритм расчета калибровок валков для прокатки рельсов на современном универсальном рельсобалочном стане с определением скоростного и температурного режимов, расчетом энергосиловых параметров прокатки и проверкой ограничений режимов деформации;

- математическая модель расчета температуры элементов рельсового профиля по длине чистового раската, позволяющая оперативно рассчитывать температуру любого элемента по длине полосы с целью управления режимом последующей термообработки, а также новый способ термообработки длинномерных рельсов, позволяющий повысить прямолинейность закаленного рельса;

- новый способ прокатки рельсов в универсальных калибрах, позволяющий улучшить условия захвата, стабилизировать положение полосы в валках, устранить искривления полосы при входе в очаг деформации, а также снизить расход электроэнергии на прокатку;

- калибровка валков, рациональный скоростной режим и силовые параметры процесса прокатки на универсальном рельсобалочном стане запроектированные в рамках технологического задания на реконструкцию рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ-НТМК»;

- калибровка валков, рациональные технологические режимы прокатки, а также комплекты рабочей технической документации, включающие чертежи всех калибров, монтажные чертежи рабочих валков, чертежи шаблонов и контршаблонов ручье калибров и комплект технической документации на узлы привалковой арматуры, разработанные для ТОО «Актюбинский рельсобалочный завод».

Методы исследования: вариационные принципы механики деформируемого твердого тела; анализ и обобщение опыта применения промышленных рельсовых калибровок; методы планирования рационального вычислительного эксперимента; статистическая обработка результатов вычислительного эксперимента с использованием аппарата корреляционно-регрессионного анализа; методы МКЭ-моделирования процесса прокатки рельсов в универсальных калибрах в программном комплексе Deform-3D.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель формоизменения и энергосиловых параметров при прокатке рельсового профиля в универсальном четырехвалковом калибре;
- закономерности формоизменения металла и силовых воздействий при прокатке рельсов;
- методика расчета формоизменения металла при прокатке в универсальных рельсовых калибрах;
- новый способ прокатки рельсов;
- математическая модель и методика расчета рационального скоростного режима прокатки в непрерывно-реверсивных группах клетей современных универсальных рельсобалочных станов;
- закономерности изменения температуры металла по длине и элементам прокатываемого рельса;
- методика расчета энергосиловых параметров прокатки рельсов в универсальных калибрах;
- алгоритм проектирования калибровки валков и технологического режима прокатки рельсов на универсальном рельсобалочном стане.

Достоверность основных положений и выводов диссертационной работы определяется применением современных методик теоретического исследования формоизменения металла и энергосиловых параметров процессов прокатки, а также проверкой полученных результатов по опытным данным других авторов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международная научно-техническая конференция «Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов». СПбГПУ: - г. Санкт-Петербург 2007; Международные научно-технические конференции «Современные металлические материалы и технологии» (СММТ' 09, 11). СПбГПУ: - г. Санкт-Петербург, 2009, 2011 г.; VII, IX и XI Международные конгрессы прокатчиков Москва (2007), Череповец (2013), Магнитогорск (2017); Международная конференция «Трансмет – 2007» «Современные технологии производства транспортного металла», Екатеринбург, 2007); Международная научно-практическая конференция «Инженерные системы – 2009». РУДН, Москва, 2009 г.; Международная конференция «Форсирование индустриально-инновационного развития металлургии». Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатаева, Алматы, 2010; XV Международная научная конференция «Новые технологии и достижения в металлургии и инженерии материалов и процессов»: - г. Ченстохова (Польша), 2014; I Международная интерактивная научно-практическая конференция «Инновации в материаловедении и металлургии», Екатеринбург, УрФУ, 2012; Международный научно-технический конгресс «ОМД-2014.

Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии»: -г. Москва, 2014; Международная молодежная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении»: - г. Екатеринбург, УрФУ, 2014.

По результатам диссертационной работы **опубликованы** 20 статей, из которых 13 статей опубликованы в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ, 5 статей вошли в базу данных SCOPUS и 2 – в базу WEB OF SCIENCE; получено три патента РФ на изобретения; в сборниках трудов международных конференций опубликовано 15 статей.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, восьми глав, заключения по диссертации, списка литературы, включающего 207 работ отечественных и зарубежных авторов, и четырех приложений. Диссертация изложена на 301 странице машинописного текста, содержит 91 рисунок и 25 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении на основе сведений о стратегическом развитии железнодорожного транспорта в Российской Федерации, возрастающих требований к качеству железнодорожных рельсов обоснована значимость и актуальность темы диссертации. Определена необходимость разработки научно обоснованных методик и алгоритмов расчета калибровок валков и технологических параметров прокатки рельсов в универсальных калибрах. Сформулированы основные научные проблемы, определены конкретные задачи, которые необходимо решить в диссертационной работе. Отражены научная новизна, ценность для науки и практики, достоверность основных положений и выводов диссертации. Дана общая характеристика работы.

В первой главе представлен аналитический обзор по тематике научно-технической проблемы, решаемой в рамках диссертационной работы. Выполнен анализ состояния и развития теории и технологии производства железнодорожных рельсов на современных рельсобалочных станах, а также методов расчета технологических параметров прокатки рельсов. На основе проведенного анализа сформулирована цель работы и определены задачи, которые необходимо решить для ее достижения.

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию процесса прокатки рельсового профиля в универсальных калибрах. На основе применения вариационного принципа минимума полной мощности и современных программно-вычислительных средств поставлена и решена задача по определению параметров формоизменения металла (обжатие и приращение-утяжка фланцев головки и подошвы), кинематики процесса и энергозатрат (опережение металла при прокатке, крутящий момент деформации).

Формоизменение металла при прокатке рельсового профиля в универсальном калибре однозначно характеризовали следующими безразмерными независимыми параметрами

(рисунок 1): $1/\eta_{ш} = d'/d$ – коэффициент обжатия шейки профиля; $1/\eta_{па} = a'_п/a_п$ и $1/\eta_{га} = a'_г/a_г$ – коэффициенты бокового обжатия подошвы и головки; φ – угол наклона внутренних граней фланцев (обычно одинаковый у головки и подошвы); $h_п/a_п$ и $h_г/a_г$ – относительная высота фланцев подошвы и головки; $l_{ш}/d$ – относительная длина шейки; $A = R_г/d$ – приведенный диаметр горизонтальных валков.

Как показали экспериментальные исследования и моделирование процесса прокатки рельсов, под действием обжатия шейки и фланцев профиля наблюдается неравномерное по ширине изменение высоты подошвы и головки: на контакте с вертикальными валками получается приращение фланцев, а в месте контакта с боковой поверхностью горизонтального валка наблюдается утяжка. При этом контур свободной поверхности фланцев имеет криволинейную форму (см. кривые $m_п$ и $m_г$ на рисунке 1). Для упрощения задачи указанный криволинейный контур заменили усредненным прямолинейным контуром $q_п$ и $q_г$, соблюдая при этом равенство площади фланцев. Тогда изменение высоты фланцев будет характеризоваться величиной приращения – утяжки подошвы $\Delta h_п$ и головки $\Delta h_г$.

В качестве критерия равномерности деформации рельсового профиля приняли равенство коэффициентов вытяжки шейки $\lambda_{ш}$, подошвы $\lambda_п$ и головки $\lambda_г$:

$$\lambda_{ш} = \lambda_п = \lambda_г. \quad (1)$$

Таким образом, задачей теоретического решения является определение таких коэффициентов обжатия $1/\eta_{ш}$, $1/\eta_{па}$ и $1/\eta_{га}$, а также таких значений приращения – утяжки $\Delta h_п$ и $\Delta h_г$, при которых достигается условие равенства вытяжек (1).

Для решения поставленной задачи применили вариационный принцип минимума полной мощности. При решении задачи этим методом необходимо с точностью до неизвестных (варьируемых) параметров описать геометрическую модель очага деформации, построить кинематически возможное поле скоростей течения металла, определить граничные условия, составить систему основных уравнений и решить ее численным методом.

Геометрическая модель очага деформации

При постановке задачи принята геометрическая модель процесса прокатки, изображенная на рисунке 1. Ввиду симметрии процесса относительно горизонтальной оси рассматривали половину очага деформации. Весь рельсовый профиль разбили на пять характерных участков. Далее рассматривали каждый выделенный участок.

Шейка (см. участок I, рисунок 1) деформируется между двумя горизонтальными валками в условиях плоского деформированного состояния ($l'_{ш} = l_{ш}$), поскольку отсутствует перетекание металла между элементами профиля. Уравнение контактной поверхности представили в следующем виде

$$d_x = d + R_г - \sqrt{R_г^2 - x^2}. \quad (2)$$

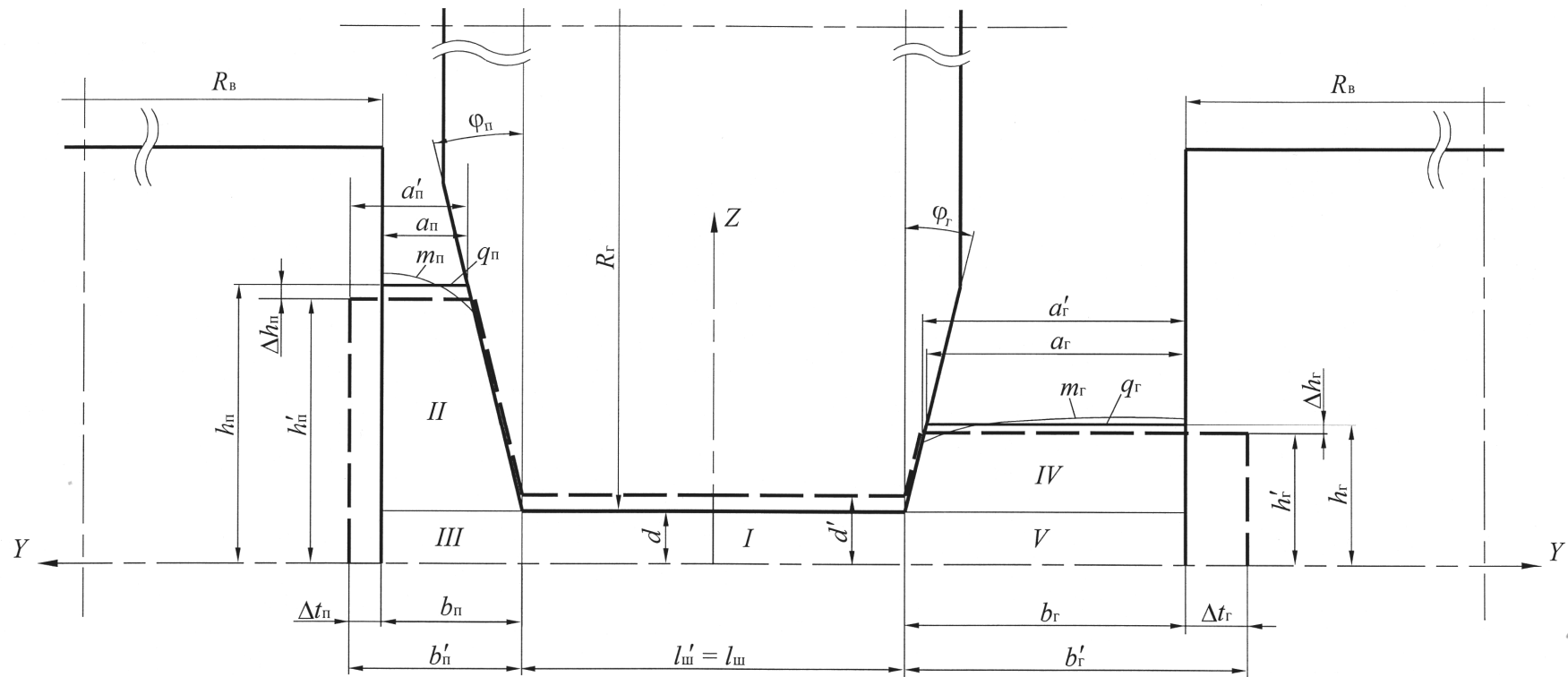


Рисунок 1 – Схема прокатки рельсового профиля в универсальном калибре (пунктирными линиями показан контур задаваемой полосы): m и q – фактический и усредненный контур свободной поверхности раската

Участок II подошвы деформируется между неприводным вертикальным валком и горизонтальным валком переменного радиуса R_{II} , который определили следующим выражением

$$R_{\text{II}} = R_{\text{I}} + d - z. \quad (3)$$

Толщина подошвы как до, так и после прокатки зависит от угла наклона ее внутренней грани и координаты Z , а абсолютное обжатие Δt_{II} остается постоянным по всей высоте. Полагали, что уклон внутренней грани в процессе прокатки не изменяется

$\varphi_{\text{II}} = \varphi_{\text{II}}' = \frac{b_{\text{II}}' - a_{\text{II}}'}{h_{\text{II}}' - d'}$. Тогда толщину подошвы до и после прохода можно описать уравнениями

$$t_{\text{II}}' = a_{\text{II}}' + (h_{\text{II}}' - d' - z) \operatorname{tg} \varphi_{\text{II}}', \quad t_{\text{II}} = t_{\text{II}}' - \Delta t_{\text{II}}, \quad (4)$$

а контактную поверхность раската с вертикальным валком уравнением

$$t_{\text{II}} = t_{\text{II}} + R_{\text{B}} - \sqrt{R_{\text{B}}^2 - x^2}. \quad (5)$$

С учетом выражений (4) определили толщину подошвы после прохода:

у основания $b_{\text{II}} = b_{\text{II}}' - \Delta t_{\text{II}}$; у вершины $a_{\text{II}} = b_{\text{II}}' - (h_{\text{II}}' - d' + \Delta h_{\text{II}}) \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\text{II}}' - \Delta t_{\text{II}}$,

а абсолютное обжатие подошвы Δt_{II} определяли из выражения (учитывая, что должно быть выполнено условие $\lambda_{\text{III}} = \lambda_{\text{II}}$ или $\omega_{\text{III}}'/\omega_{\text{III}} = \omega_{\text{II}}'/\omega_{\text{II}}$):

$$\frac{d'}{d} = \frac{0.5(a_{\text{II}}' + b_{\text{II}}')(h_{\text{II}}' - d') + b_{\text{II}}' d'}{0.5(2b_{\text{II}}' - (h_{\text{II}}' - d' + \Delta h_{\text{II}}) \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\text{II}}' - 2\Delta t_{\text{II}})(h_{\text{II}}' - d' + \Delta h_{\text{II}}) + (b_{\text{II}}' - \Delta t_{\text{II}}) d'}. \quad (6)$$

Функцию, описывающую изменение высоты подошвы, представили в виде

$$h_{\text{III}x} = (h_{\text{II}}' - d') \cdot \sqrt{\beta_{\text{II}}^2 - (\beta_{\text{II}}^2 - 1) \left(\frac{x^3}{l_{\text{II}}^3} \right) \left(10 - 15 \frac{x}{l_{\text{II}}} + 6 \frac{x^2}{l_{\text{II}}^2} \right)}, \quad (7)$$

где β_{II} – коэффициент приращения подошвы $\beta_{\text{II}} = 1 + \Delta h_{\text{II}} / (h_{\text{II}}' - d')$; l_{II} – длина очага деформации подошвы $l_{\text{II}} = \sqrt{2R_{\text{B}}\Delta t_{\text{II}} - \Delta t_{\text{II}}^2}$.

Предполагали, что при деформации участка III подошвы течение металла в направлении оси Z отсутствует. На указанном участке подошва обжимается на величину Δt_{II} неприводным вертикальным валком, и уравнение контактной поверхности записали в следующем виде

$$t_{\text{III}} = b_{\text{II}} + R_{\text{B}} - \sqrt{R_{\text{B}}^2 - x^2}. \quad (8)$$

Деформация участков IV и V головки аналогична по характеру деформации участков II и III подошвы соответственно. Поэтому геометрическую модель очага деформации на этих участках описали выражениям (3) – (8), заменив в них индекс «п» на «г».

Кинематически возможное поле скоростей течения металла

При построении кинематически возможного поля скоростей полагали, что все элементы профиля выходят из очага деформации со скоростью V_1 , которую представили в виде:

$$V_1 = v \cdot V_{\text{вг}}, \quad (9)$$

где v – коэффициент опережения по шейке; $V_{\text{вг}}$ – скорость вращения горизонтального вала на участке шейки.

Поле скоростей течения металла для каждого элемента профиля определяли с учетом гипотезы плоских сечений и гипотезы прямых вертикалей. Из условия постоянства секундных объемов имеем:

$$V_{\text{хш}} = V_1 \frac{d}{d_x}, \quad V_{\text{хп}} = V_1 \frac{\omega_{\text{п}}}{\omega_{\text{хп}}}, \quad V_{\text{хг}} = V_1 \frac{\omega_{\text{г}}}{\omega_{\text{хг}}}, \quad (10)$$

где $V_{\text{хш}}$, $V_{\text{хп}}$ и $V_{\text{хг}}$ – продольные составляющие скорости течения металла для шейки, подошвы и головки рельса соответственно; $\omega_{\text{ш}}$, $\omega_{\text{п}}$ и $\omega_{\text{г}}$ – площади поперечного сечения элементов профиля в плоскости выхода из валков; $\omega_{\text{хш}}$, $\omega_{\text{хп}}$ и $\omega_{\text{хг}}$ – текущие вдоль оси X площади поперечного сечения элементов профиля.

Поскольку шейка, участок III подошвы и участок V головки деформируются в условиях плоского течения, то $V_{y\text{ш}} = 0$, $V_{y\text{пIII}} = 0$ и $V_{z\text{гV}} = 0$, а для определения оставшейся проекции достаточно использовать условие несжимаемости

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0. \quad (11)$$

Подставив выражения (10) в (11), получили

$$V_{z\text{ш}} = -z \frac{\partial V_{\text{хш}}}{\partial x}; \quad V_{y\text{пIII}} = -y \frac{\partial V_{\text{хп}}}{\partial x}; \quad V_{y\text{гV}} = -y \frac{\partial V_{\text{хг}}}{\partial x}.$$

При определении проекций V_y и V_z на участке II подошвы и участке IV головки наряду с условием несжимаемости использовали кинематическое граничное условие, которое состоит в том, что полный вектор скорости течения металла на поверхности раската $\vec{V}_n = (V_{nx}, V_{ny}, V_{nz})$ лежит в касательной плоскости к этой поверхности, вследствие чего имеем

$$V_{nyi} = V_{nxi} \frac{\partial t_i}{\partial x} + V_{nzi} \frac{\partial t_i}{\partial z}, \quad (12)$$

где t_i – уравнение поверхности раската для соответствующего участка ($i = \text{II}, \text{IV}$).

С учетом изложенного получили

$$V_{yi} = V_{nyi} \frac{y}{t_i}. \quad (13)$$

$$V_{zi} = -\frac{1}{t_i} \int \frac{\partial}{\partial x} (V_{xi} t_i) dz. \quad (14)$$

Таким образом, геометрическая модель очага деформации и кинематически возможное поле скоростей течения металла построены с точностью до трех неизвестных

величин: коэффициента опережения ν , приращения (утяжки) подошвы $\Delta h_{\text{п}}$ и приращения (утяжки) головки $\Delta h_{\text{г}}$, которые необходимо определить в результате решения задачи.

Граничные условия

Принято допущение, что на всех контактных поверхностях происходит скольжение металла относительно валков, и среднее напряжение трения равно $\bar{\tau}_{\text{тр}} = \psi \tau_s$, где ψ - показатель трения, τ_s - сопротивление металла на сдвиг. Известно, что напряжения трения в зонах отставания и опережения распределяются неравномерно, причем в зоне отставания они обычно больше, чем в зоне опережения. Чтобы это учесть, приняли гипотезу, согласно которой средние напряжения трения в зонах отставания $\bar{\tau}_{\text{тр.от}i}$ и опережения $\bar{\tau}_{\text{тр.оп}i}$ распределяются пропорционально средним скоростям скольжения в этих зонах $\vec{V}_{\text{ск.от}i}$ и $\vec{V}_{\text{ск.оп}i}$, а в каждой зоне полные напряжения трения постоянны (здесь индекс i - соответствует номеру рассматриваемого участка рельсового профиля).

Границей раздела контактной поверхности на зоны отставания и опережения является нейтральная линия, уравнение которой для приводного горизонтального вала определяется из условия равенства нулю проекции полной скорости скольжения на касательную к окружности вала $V_{\text{ск}i}^*$.

С учетом принятых гипотез для участка I (шейки) нейтральная линия представляет собой прямую параллельную оси Y, а координата ее $x_{\text{шш}}$ определяется уравнением:

$$V_{\text{ск}I}^* = 0 \text{ или } V_{\text{ск.ш}x} \cdot \cos \alpha_x + V_{\text{ск.ш}z} \cdot \sin \alpha_x = 0, \quad (15)$$

здесь $V_{\text{ск.ш}x}$ и $V_{\text{ск.ш}z}$ - проекции полной скорости скольжения на координатные оси:

$$V_{\text{ск.ш}x} = V_{\text{шш}} - V_{\text{вг}x}, \quad V_{\text{ск.ш}z} = V_{\text{шш}} - V_{\text{вг}z}; \quad (16)$$

α_x - текущий центральный угол горизонтального вала, $\sin \alpha_x = x/R_{\text{г}}$.

На поверхности контакта подошвы и головки с горизонтальным валком (участки II и IV) нейтральная линия имеет более сложный характер, а именно, ее координата $z_{\text{гв}i}$ является функцией координаты x . Эту функцию необходимо найти из условия

$$V_{\text{ск.гв}ix} \cdot \cos \alpha_{xz} + V_{\text{ск.гв}iz} \cdot \sin \alpha_{xz} = 0; \quad (i = \text{II}, \text{IV}) \quad (17)$$

здесь α_{xz} - текущий центральный угол горизонтального вала, $\sin \alpha_{xz} = \frac{x}{R_{\text{гп}}}$, где $R_{\text{гп}}$

описывается выражением (3); $V_{\text{ск.гв}ix}$ и $V_{\text{ск.гв}iz}$ - проекции полной скорости скольжения на рассматриваемом участке, например для участка II:

$$V_{\text{ск.гв}IIx} = V_{\text{шп}} - V_{\text{вгп}x}, \quad V_{\text{ск.гв}IIz} = V_{\text{шп}} - V_{\text{вгп}z}; \quad (18)$$

$V_{\text{вгп}x}$ и $V_{\text{вгп}z}$ - проекции окружной скорости вращения вала, $V_{\text{вгп}} = V_{\text{вг}} \frac{R_{\text{гп}}}{R_{\text{г}}}$.

Численным решением установили, что нейтральная линия на участках II и IV имеет вид, представленный на рисунке 2. Для определения положения точек M и M_1 , уравнение (17) решали относительно координаты x при $z = d_x$ и $z = h_{ix}$. Таким образом, верхнюю границу зоны отставания на контактной поверхности участков II и IV с горизонтальным валком описали следующим образом

$$z_{от.гвi} = \begin{cases} z_{нвгi} & \text{при } x_M < x < x_{M_1} \\ h_{ix} & \text{при } x_{M_1} < x < l_i \end{cases}, \quad (19)$$

а нижнюю границу зоны опережения

$$z_{оп.гвi} = \begin{cases} d_x & \text{при } 0 < x < x_M \\ z_{нвгi} & \text{при } x_M < x < x_{M_1} \end{cases}, \quad (20)$$

при этом нижней границей зоны отставания будет являться функция d_x , а верхней границей зоны опережения – функция h_{ix} .

Нейтральная линия на контактной поверхности вертикальных валков с подошвой и головкой рельса представляет собой прямую параллельную оси Z , а поскольку валки являются неприводными, координата $x_{нвгi}$ ($i = \text{II, III, IV}$ и V) ее равна половине длины очага деформации (принято, что затраты мощности на преодоление сил трения в шейках валков значительно меньше мощности деформации, и этими затратами можно пренебречь).

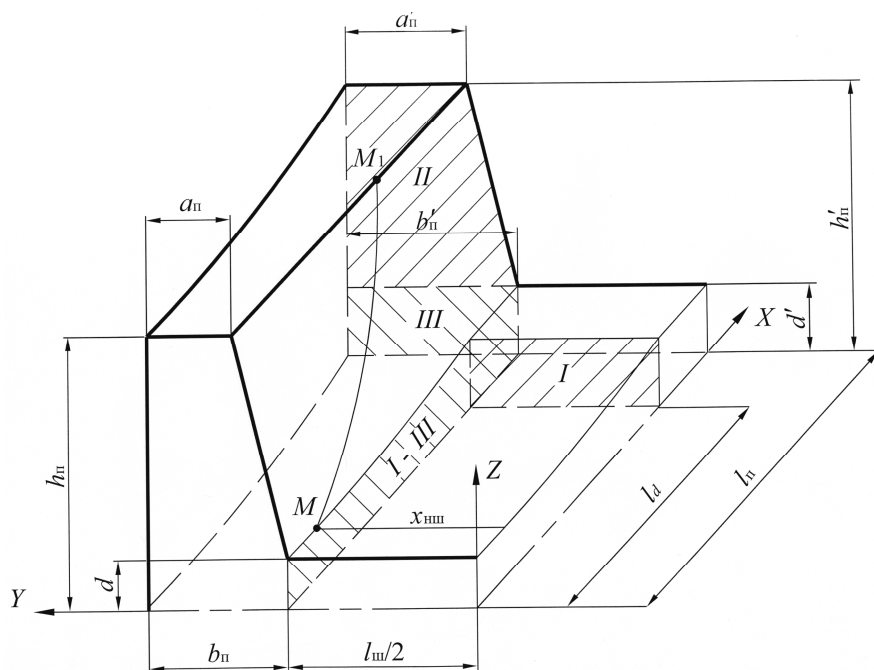


Рисунок 2 – Нейтральные линии $x_{нш}$ и z_n на контактных поверхностях и плоскости среза (отмечены штриховкой) в очаге деформации при прокатке рельсового профиля в универсальном калибре

Основная система уравнений

Принято, что деформируемый металл обладает свойствами жестко-пластической среды. Для определения неизвестных параметров коэффициента опережения ν , приращения (утяжки) подошвы Δh_n и головки Δh_r использовали:

функционал принципа минимума полной мощности

$$J(v, \Delta h_{\text{п}}, \Delta h_{\text{г}}) = \sum_{i=1}^V N_{\text{вн}i} - \sum_{i=1}^V N_{\text{ск}i} - \sum_{i=1}^V N_{\text{вал}i} + \sum N_{\text{ср}}, \quad (21)$$

и три уравнения:

$$\text{уравнение баланса мощности} - J(v, \Delta h_{\text{п}}, \Delta h_{\text{г}}) = 0; \quad (22)$$

условия минимума функционала

$$\frac{\partial J(v, \Delta h_{\text{п}}, \Delta h_{\text{г}})}{\partial \Delta h_{\text{п}}} = 0 \text{ и } \frac{\partial J(v, \Delta h_{\text{п}}, \Delta h_{\text{г}})}{\partial \Delta h_{\text{г}}} = 0. \quad (23)$$

Составляющие функционала (21) (мощность внутренних сил $N_{\text{вн}i}$, мощность напряжений трения на скоростях скольжения $N_{\text{ск}i}$, мощность, подводимая валками $N_{\text{вал}i}$ и мощность сил среза $N_{\text{ср}i}$) определяли по известным в механике ОМД соотношениям.

Комплекс полученных выше уравнений (1) – (23) представляет математическую модель процесса равномерной деформации (вытяжки) элементов рельсового профиля при прокатке в универсальном калибре. Сформированная модель характеризуется весьма высокой степенью сложности и может быть практически реализована численным методом с использованием современных вычислительных средств. В настоящей работе для решения использовали программный комплекс MathCAD 14. При этом использовали следующий комплекс исходных безразмерных параметров, характеризующих реальные условия прокатки рельсов на современных универсальных рельсобалочных станах: приведенный диаметр горизонтальных валков $A = D_{\text{г}}/d = 42 \div 67$; приведенная длина шейки рельсового профиля $\tilde{l} = l/d = 3,7 \div 5,8$; относительная высота фланцев подошвы $\tilde{h}_{\text{п}} = h_{\text{п}}/b_{\text{п}} = 1,6 \div 3,1$ и головки $\tilde{h}_{\text{г}} = h_{\text{г}}/b_{\text{г}} = 0,5 \div 1,1$; коэффициент обжатия шейки $1/\eta_{\text{ш}} = d'/d$, принимаемый, по условию задачи, равным коэффициенту вытяжки шейки $\lambda_{\text{ш}} = 1,100 \div 1,350$; уклон внутренних граней фланцев $\text{tg}\varphi = 0,25$; показатель трения $\psi = 0,6 \div 1,0$. Указанный диапазон изменения исходных параметров соответствует деформации рельсового раската в универсальных калибрах от разрезной заготовки до чистового рельса.

Для указанных условий был составлен план проведения численных расчетов по решению вариационных задач при изменении каждого из исходных параметров на трех уровнях. В целом расчеты были проведены при 46-ти различных сочетаниях исходных параметров, в каждом из которых при заданном коэффициенте вытяжки $\lambda_{\text{ш}} = 1/\eta_{\text{ш}}$ были определены коэффициенты обжатия подошвы $1/\eta_{\text{п}}$ и головки $1/\eta_{\text{г}}$, коэффициенты приращения (или утяжки) фланцев $\beta_{\text{п}}$ и $\beta_{\text{г}}$, а также коэффициент опережения v . Таким образом, в результате решения получили массив расчетных данных, выражающих зависимости $1/\eta_{\text{п}}, 1/\eta_{\text{г}}, \beta_{\text{п}}, \beta_{\text{г}}, v = f(1/\eta_{\text{ш}}, A_{\text{г}}, \tilde{h}_{\text{п}}, h_{\text{г}})$.

Анализ полученных расчетных данных позволил определить закономерности формоизменения металла при равномерной деформации элементов рельсового профиля в универсальных калибрах.

В результате анализа установлено, что коэффициенты обжатия фланцев подошвы и головки существенно зависят от геометрических параметров очага деформации. Увеличение коэффициента обжатия шейки приводит к практически пропорциональному и вполне объяснимому увеличению коэффициентов обжатия фланцев (рисунок 3): для сохранения постоянной по шейке и фланцам вытяжки требуется определенное количество металла, смещаемого по толщине подошвы и головки. Изменение приведенного диаметра горизонтальных валков A оказывает обратное влияние (см. рисунок 3): с увеличением A коэффициенты обжатия подошвы и головки уменьшаются.

Зависимость коэффициентов обжатия подошвы и головки от относительной высоты фланцев \tilde{h}_n и \tilde{h}_r представлена на рисунке 4. С ростом \tilde{h}_n и \tilde{h}_r коэффициенты бокового обжатия фланцев уменьшаются при любых коэффициентах обжатия шейки $1/\eta_{ш}$: более высокие и тонкие фланцы для обеспечения постоянства вытяжки по элементам профиля требуют меньших обжатий по толщине. Именно поэтому коэффициенты обжатия фланцев подошвы всегда получаются меньше коэффициентов обжатия головки. Характер влияния относительной высоты фланцев на коэффициент их обжатия сохраняется одинаковым при любом значении приведенного диаметра валков.

Установлено, что при прокатке с одинаковыми коэффициентами вытяжки по элементам рельсового профиля при любых сочетаниях геометрических параметров наблюдается утяжка фланцев подошвы по усредненному контуру (контур q на рисунке 1) и приращение фланцев головки, (см. рисунок 5). С ростом коэффициента обжатия шейки $1/\eta_{ш}$ увеличивается утяжка подошвы и приращение головки. Аналогичное влияние на течение металла при высотной деформации подошвы и головки оказывает изменение приведенного диаметра валков.

С ростом приведенной высоты фланцев \tilde{h}_n и \tilde{h}_r коэффициенты приращения-утяжки уменьшаются (см. рисунок 5), что объясняется увеличением высоты контактной поверхности фланцев раската с вертикальными валками и боковыми гранями горизонтальных валков. Соответственно этому увеличивается сопротивление течению металла по высоте фланцев.

На формоизменение фланцев существенное влияние оказывает показатель трения ψ . Увеличение его также приводит к уменьшению коэффициентов приращения – утяжки фланцев.

Результаты решения позволили выявить закономерности изменения крутящего момента в зависимости от основных технологических параметров прокатки. Так увеличение коэффициента обжатия, показателя трения и суммарной толщины фланцев подошвы и головки вызывает пропорциональный рост крутящего момента деформации.

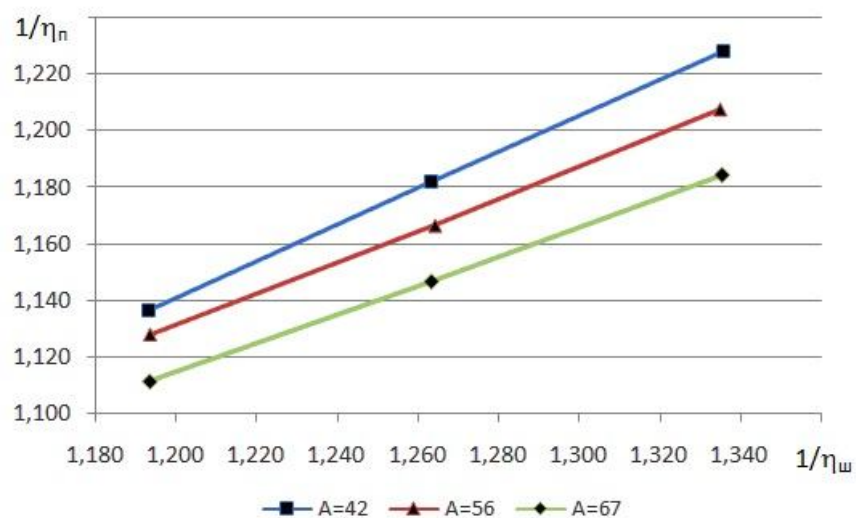


Рисунок 3 – Зависимость коэффициентов обжатия подошвы от коэффициента обжатия шейки и приведенного диаметра валков

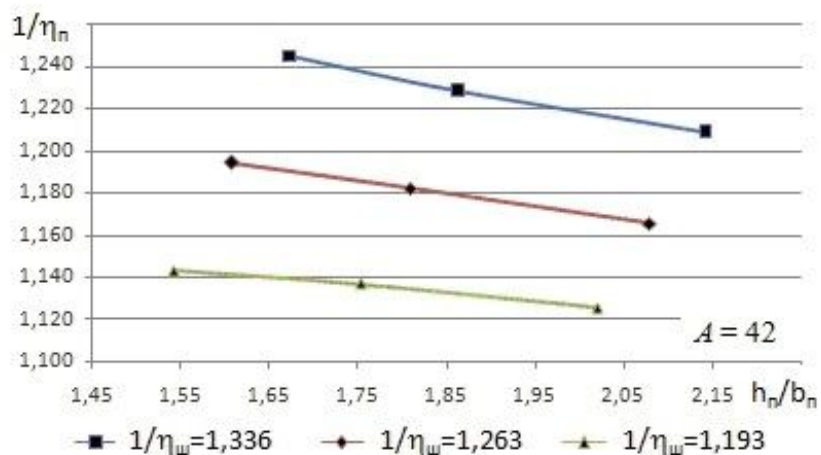


Рисунок 4 – Зависимость коэффициентов обжатия подошвы от относительной высоты фланцев при различных значениях коэффициента обжатия шейки

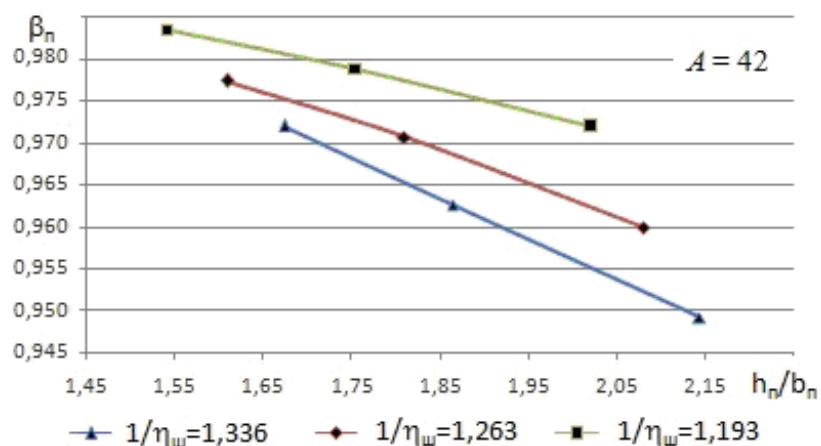


Рисунок 5 – Зависимость коэффициентов приращения (утяжки) подошвы от относительной высоты фланцев при различных значениях коэффициента обжатия шейки

С целью практического использования в инженерных расчетах результаты теоретического решения аппроксимированы в виде следующих формул для определения:

коэффициентов обжатия фланцев подошвы и головки

$$1/\eta_{nb} = 1 + 0,583(1/\eta_{ш} - 1)^{0,96} A^{0,125} \tilde{h}_n^{-0,588} \psi^{-0,085}, \quad (24)$$

$$1/\eta_{rb} = 1 + 0,493(1/\eta_{ш} - 1)^{1,022} A^{0,153} \tilde{h}_r^{-0,407} \psi^{-0,051}, \quad (25)$$

коэффициентов приращения фланцев подошвы и головки

$$\beta_n = 1 - 0,614(1/\eta_{ш} - 1)^{1,028} A^{-0,703} \tilde{h}_n^{1,594} \psi^{1,129}, \quad (26)$$

$$\beta_r = 1 + 0,229(1/\eta_{ш} - 1)^{1,376} (A/100)^{3,69} \tilde{h}_r^{-5,018} \psi^{-1,197}, \quad (27)$$

коэффициента опережения

$$\nu = 1 + 0,0917(1/\eta_{ш} - 1)^{1,177} A^{-0,161} \tilde{b}_\phi^{-1,53} \psi^{0,855}, \quad (28)$$

коэффициента крутящего момента деформации

$$n_{вал} = 0,0677(1/\eta_{ш} - 1)^{0,947} A^{2,756} \tilde{b}_\phi^{1,75} \psi^{0,331}, \quad (29)$$

при этом крутящий момент деформации необходимо определять по выражению

$$M_{вал} = \sigma_S d_1^3 n_{вал}. \quad (30)$$

Третья глава посвящена разработке методики расчета формоизменения металла при прокатке рельсов. Проанализированы известные промышленные калибровки валков для прокатки железнодорожных рельсов Р50, Р65 и Р75, а также их зарубежные аналоги с позиций их состава, структуры и функционального назначения различных калибров. На основе анализа установлено, что практически все известные калибровки можно описать с использованием одной и той же блочной структурной схемы (таблица 1). Структурная схема рельсовой калибровки состоит из пяти блоков калибров. В состав каждого из блоков входят калибры с одинаковым функциональным назначением в калибровке, причем, возможный состав каждого из блоков ограничен уже известными калибрами.

Выполнен анализ указанных калибров с позиций стабильности процесса прокатки в них, получения точных размеров, начальных и эксплуатационных затрат. Выявлены преимущества и недостатки отдельных калибров и их сочетаний. Показано, что предложенная структурная схема позволяет формировать множество различных вариантов схем калибровок. Сформулированы рекомендации по выбору рациональной схемы в зависимости от состава оборудования стана и требований, предъявляемых к технологическому процессу.

С использованием регрессионных формул, полученных в главе 2, разработана научно обоснованная методика расчета формоизменения металла при прокатке в универсальных рельсовых калибрах, обеспечивающая равномерную деформацию металла по всем элементам профиля.

Таблица 1 – Обобщенная блочная схема калибровки рельсов

Порядковый номер блока калибров	Тип, наименование калибров составляющих блок	Виды калибров, применяемых в блоке	Назначение калибров и блока в целом
1	Вытяжные	Ящичные	Вытяжка поперечного сечения заготовки
2	Подготовительные	Пластовые, тавровые, трапециевидные	Придание поперечному сечению несимметричности
3	Разрезные	Открытые разрезные, закрытые разрезные, диагональные.	Деление поперечного сечения на элементы, образующие черновой профиль
4	Формообразующие	Открытые, закрытые и наклонные двухвалковые рельсовые, 4-х валковые	Формирование геометрии и размеров предчистового профиля
5	Чистовые	Закрытые или полузакрытые двухвалковые, универсальные 3-х валковые	Доводка геометрии и размеров сечения до чистового профиля

По формулам (24) - (27) рассчитывают коэффициенты обжатия фланцев подошвы и головки у основания $1/\eta_{pb}$ и $1/\eta_{gb}$, а также коэффициенты их приращения β_{Π} и β_{Γ} . Коэффициенты обжатия подошвы и головки у вершины могут быть определены из геометрических соотношений:

$$\frac{1}{\eta_{pa}} = \frac{a'_{\Pi}}{a_{\Pi}} = \frac{\frac{1}{\eta_{pb}} - \frac{h_{\Pi}}{\beta_{\Pi} b_{\Pi}} \operatorname{tg} \varphi_{\Pi}}{1 - \frac{h_{\Pi}}{b_{\Pi}} \operatorname{tg} \varphi_{\Pi}}; \quad \frac{1}{\eta_{ga}} = \frac{a'_{\Gamma}}{a_{\Gamma}} = \frac{\frac{1}{\eta_{gb}} - \frac{h_{\Gamma}}{\beta_{\Gamma} b_{\Gamma}} \operatorname{tg} \varphi_{\Gamma}}{1 - \frac{h_{\Pi}}{b_{\Pi}} \operatorname{tg} \varphi_{\Gamma}}. \quad (31)$$

Используя формулы (24), (25) и (31) и принимая изменение коэффициента обжатия шейки по проходам, можно при заданных размерах чистового профиля определить размеры фланцев подошвы и головки в каждом проходе против направления прокатки:

$$a'_{\Pi} = (1/\eta_{pa}) a_{\Pi}; \quad a'_{\Gamma} = (1/\eta_{ga}) a_{\Gamma}; \quad b'_{\Pi} = (1/\eta_{pb}) b_{\Pi}; \quad b'_{\Gamma} = (1/\eta_{gb}) b_{\Gamma}; \quad (32)$$

$$h'_{\Pi} = h_{\Pi} / \beta_{\Pi}; \quad h'_{\Gamma} = h_{\Gamma} / \beta_{\Gamma}. \quad (33)$$

Общий коэффициент обжатия шейки в универсальных калибрах целесообразно определять, исходя из условия, что толщина шейки чернового профиля, поступающего из двухвалкового калибра в первый универсальный калибр, должна составлять 40 – 50 % высоты головки этого профиля, которая приближенно равна высоте головки готового рельса $H_{\Gamma 1}$, так как уширение фланцев в процессе прокатки в универсальных калибрах компенсируется их обжатием во вспомогательных калибрах. Таким образом, общий коэффициент обжатия шейки в универсальных калибрах составит

$$1/\eta_{\Sigma\Pi} = (0,4 \div 0,5) H_{\Gamma 1} / d_1. \quad (34)$$

Для распределения коэффициентов обжатия шейки между универсальными калибрами получено следующее уравнение

$$1/\eta_{ш} = 0,978 + 0,039N_{кр} + 0,006N_{кр}^2, \quad (35)$$

где $N_{кр}$ – номер универсального рельсового калибра против направления прокатки.

Для расчета закрытых рельсовых калибров против направления прокатки необходимы следующие коэффициенты и абсолютные показатели деформации (рисунок 6): $1/\eta_{ш} = d'/d$ – коэффициент обжатия шейки; $1/\eta_{опа} = a'_{зп}/a_{оп}$ и $1/\eta_{опб} = b'_{зп}/b_{оп}$ – коэффициенты бокового обжатия открытого фланца подошвы у вершины и основания соответственно; $1/\eta_{зпа} = a'_{оп}/a_{зп}$ и $1/\eta_{зпб} = b'_{оп}/b_{зп}$ – коэффициенты бокового обжатия закрытого фланца подошвы у вершины и основания соответственно; $1/\eta_{ога} = a'_{зг}/a_{ог}$ и $1/\eta_{огб} = b'_{зг}/b_{ог}$ – коэффициенты бокового обжатия открытого фланца головки у вершины и основания соответственно; $1/\eta_{зга} = a'_{ог}/a_{зг}$ и $1/\eta_{згб} = b'_{ог}/b_{зг}$ – коэффициенты бокового обжатия закрытого фланца головки у вершины и основания соответственно; $\Delta h_{зп}$ и $\Delta h_{он}$ – утяжка закрытого и приращение открытого фланца подошвы; $\Delta h_{зг}$ и $\Delta h_{ог}$ – утяжка закрытого и приращение открытого фланца головки; $\Delta B = B - B'$ – уширение рельсового профиля.

В результате статистического анализа данных по формоизменению фланцев в действующих калибровках установили, что изменение коэффициентов обжатия фланцев подошвы и головки по проходам подчиняется одинаковому закону и с достаточной точностью описывается в зависимости от номера рельсового калибра $N_{кр}$ против направления прокатки общим уравнением

$$1/\eta_{ф} = n + m \cdot \ln N_{кр}, \quad (36)$$

в котором коэффициенты n и m принимают численные значения в зависимости от элемента фланца (таблица 2).

Статистический анализ формоизменения шейки в действующих калибровках валков позволил получить следующее уравнение регрессии:

$$1/\eta_{ш} = 1,046 + 0,209 \ln N_{кр}. \quad (37)$$

Для определения утяжки и приращения фланцев головки и подошвы целесообразно применять известные формулы Б.П. Бахтинова:

$$\Delta h_3 = h_3^2 / (D_{ш} - h_3), \quad \Delta h_o = h_o d / (D_{ш} + d), \quad (38)$$

где $D_{ш}$ – диаметр валков по шейке профиля.

Уширение профиля рекомендуется рассчитывать в зависимости от номера прохода против направления прокатки $n_{пр}$:

$$\Delta B = 0,01B_1 + (n_{пр} - 1). \quad (39)$$

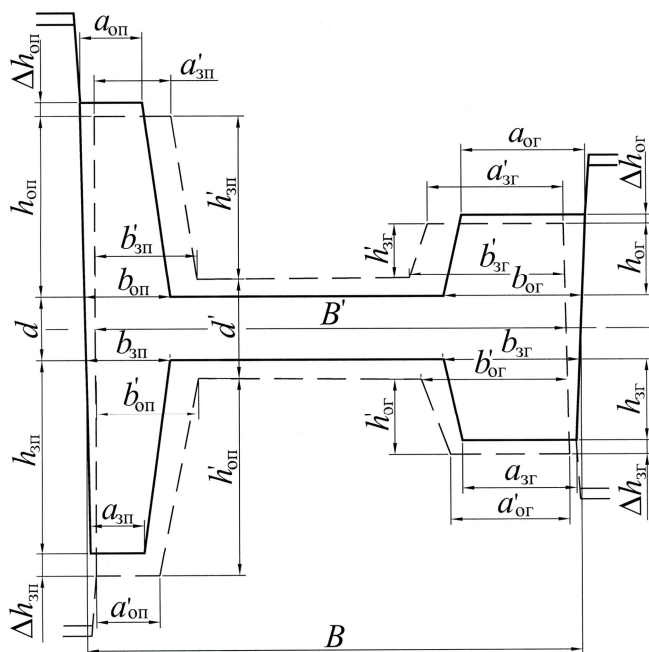


Рисунок 6 – Схема прокатки в закрытом рельсовом калибре (пунктирными линиями показаны контуры задаваемого профиля)

Таблица 2 – Численные значения коэффициентов в уравнении (36)

Коэффициент	1/η _φ							
	1/η _{опа}	1/η _{опб}	1/η _{зпа}	1/η _{зпб}	1/η _{ога}	1/η _{огб}	1/η _{зга}	1/η _{згб}
<i>n</i>	1,084	1,054	0,930	1,020	1,010	1,010	0,988	1,000
<i>m</i>	0,0925	0,0672	0,0275	0,0379	0,0705	0,0975	0,0556	0,0691

При расчете двухвалковых калибров против хода прокатки за исходный профиль принимают черновой рельсовый профиль, полученный в результате расчета универсальных калибров. Рассчитав по формулам (36) и (37) коэффициенты деформации, можно определить толщину шейки и фланцев предыдущего по ходу прокатки раската:

$$\left. \begin{aligned} d' &= (1/\eta_{ш})d, & a'_{зп} &= (1/\eta_{опа})a_{оп}, & b'_{зп} &= (1/\eta_{опб})b_{оп}, \\ a'_{оп} &= (1/\eta_{зпа})a_{зп}, & b'_{оп} &= (1/\eta_{зпб})b_{зп}, & a'_{зг} &= (1/\eta_{ога})a_{ог}, \\ b'_{зг} &= (1/\eta_{огб})b_{ог}, & a'_{ог} &= (1/\eta_{зга})a_{зг}, & b'_{ог} &= (1/\eta_{згб})b_{зг}. \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

Определив по (38) приращение и утяжку фланцев, можно рассчитать высоту фланцев предыдущего по ходу прокатки раската:

$$\left. \begin{aligned} h'_{зп} &= h_{оп} - \Delta h_{оп}, & h'_{оп} &= h_{зп} + \Delta h_{зп}, \\ h'_{зг} &= h_{ог} - \Delta h_{ог}, & h'_{ог} &= h_{зг} + \Delta h_{зг}. \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

Таким образом, идя от чернового рельсового профиля против направления прокатки, рассчитывают формоизменение во всех двухвалковых рельсовых калибрах.

На основе обобщения опыта прокатки рельсовых профилей на отечественных рельсобалочных станах сформулированы рекомендации по расчету и конструированию подготовительных тавровых калибров.

В четвертой главе представлены результаты исследования некоторых характерных особенностей прокатки рельсового профиля в универсальном калибре.

С использованием программного комплекса Deform-3D, выполнено моделирование процесса входа рельсового раската в универсальный калибр. Представлена методика моделирования, включающая особенности построения твердотельных моделей рельсового раската и валков универсальной клетки, формирования начальных и граничных условий.

По результатам исследований установлено, что ввиду разновременности захвата элементов рельсового профиля валками универсального калибра происходит изгиб заднего конца полосы в сторону подошвы. Такой изгиб обусловлен разностью длин очагов деформации шейки, головки и подошвы, вызванной необходимостью применения по головке значительно больших обжатий с целью соблюдения равенства коэффициентов вытяжки по элементам профиля.

Применение вводных направляющих линеек обеспечивает устойчивый прямолинейный вход раската в валки в начальный момент захвата и в установившемся процессе прокатки. При этом силы, с которыми взаимодействуют раскат и линейки, могут достигать значений 100 – 300 кН, а мощность необходимая на преодоление сопротивления входу раската в валки, создаваемого этими силами, составляет 10 - 15 % от общей мощности, подводимой валками.

Выполнено теоретическое исследование условий входа рельсового раската в универсальных калибр, по результатам которого сформулированы математически условия захвата рельсового раската валками универсальной клетки. Математическую формулировку этого ограничения получили, исходя из условия равновесия сил в очаге деформации. Показано, что из-за тормозящего действия вертикальных неприводных валков допустимый угол захвата снижается на величину, зависящую от обжатия головки и подошвы профиля этими вертикальными валками:

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{ш}} < f_{\text{ш}} - \frac{1}{2 - \frac{\Delta h_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}}}} \left[\sqrt{\frac{2\Delta h_{\text{г}}}{R_{\text{в}}}} + \sqrt{\frac{2\Delta h_{\text{п}}}{R_{\text{в}}}} + f_{\text{ц}} \frac{r}{R_{\text{в}}} \left(2 - \frac{\Delta h_{\text{г}}}{R_{\text{в}}} - \frac{\Delta h_{\text{п}}}{R_{\text{в}}} \right) \right], \quad (42)$$

где $\Delta h_{\text{ш}}$, $\Delta h_{\text{г}}$ и $\Delta h_{\text{п}}$ – абсолютные обжатия шейки, головки и подошвы, $f_{\text{ш}}$ и $f_{\text{ц}}$ – коэффициенты трения на бочке горизонтальных валков и в цапфах вертикальных валков.

Рекомендовано при проектировании режимов прокатки рельсов учитывать сформулированное ограничение по условиям захвата раската в универсальных клетях.

Исследования условий входа рельсового раската в универсальный калибр и условий захвата позволили разработать новый способ прокатки рельсов. Разработанный способ отличается от известных тем, что прокатка в универсальных калибрах ведется с последовательно расширяющейся шейкой (см. рисунок 7).

Показано, что соответствующим подбором величины расширения шейки и обжатий головки и подошвы вертикальными валками можно выровнять длины очагов деформации, при соблюдении равенства коэффициентов вытяжки по всем элементам профиля.

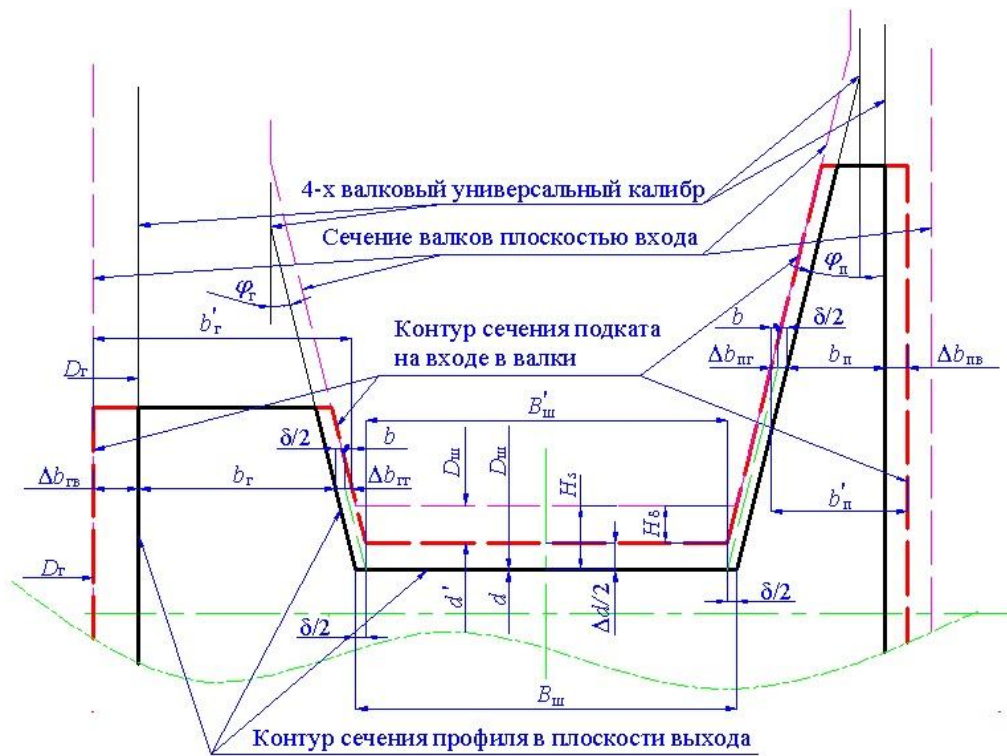


Рисунок 7 – Схема деформирования раската в универсальном рельсовом калибре с переменной величиной шейки профиля

Получены формулы для расчета величины расширения шейки δ и обжатий головки $\Delta b_{ГВ}$ и подошвы $\Delta b_{ПВ}$, позволяющие обеспечить указанные условия деформации:

$$\delta = \frac{\Delta d}{d} \left(\frac{8b_{Г}R_{Г}}{4R_{Ш} + R_{Г}} - d \right); \quad (43)$$

$$\Delta b_{ГВ} = 4 \frac{\Delta d}{d} \frac{b_{Г}R_{Ш}}{4R_{Ш} + R_{Г}}; \quad (44)$$

$$\Delta b_{ПВ} = \frac{\Delta d}{d} \left(b_{П} - \frac{b_{Г}R_{Ш}}{4R_{Ш} + R_{Г}} + \frac{d}{8} \right). \quad (45)$$

Показано, что сконструированные таким образом универсальные калибры позволяют улучшить условия захвата, стабилизировать положение полосы в валках, устранить искривления полосы при входе в очаг деформации, а также снизить расход электроэнергии на прокатку. Разработанный способ прокатки рельсов защищен патентом РФ на изобретение № 2668626.

Выполнено исследование формоизменения металла при прокатке рельсового профиля в универсальном калибре с использованием программного комплекса Deform-3D. Для этого был проведен полнофакторный вычислительный эксперимент по моделированию процесса прокатки при изменении каждого из безразмерных независимых параметров на трех уровнях: $A=40 \div 60 \div 80$; $\tilde{h}_{П} = 1,9 \div 2,2 \div 2,5$; $\tilde{h}_{Г} = 0,6 \div 0,7 \div 0,8$; $1/\eta_{Ш} = 1,04 \div 1,22 \div 1,40$; $1/\eta_{Пд} = 1,06 \div 1,35 \div 1,64$ и $1/\eta_{Га} = 1,04 \div 1,25 \div 1,45$.

Для совокупности безразмерных параметров моделировали процесс прокатки полос в универсальных рельсовых калибрах. На рисунке 8 показана модель рельсового профиля после прокатки. На полученных в результате расчетов моделях измеряли высоту подошвы и головки в характерных точках по ширине фланцев: на контакте с вертикальными и горизонтальными валками, по середине фланца и в точке максимального приращения (см. размеры П1–П4 и Г1–Г4 на рисунке 8).

Анализ полученных данных показал, что высота подошвы и головки в средней части фланцев (т.е. размеры П2 и П3, Г2 и Г3) отличаются незначительно и достигают максимальных значений. Поэтому при дальнейшем анализе рассматривали три характерных значения высоты П1-П3-П4 и Г1-Г3-Г4. Для описания свободной поверхности фланцев их характерные высоты представили в функции безразмерной координаты $\tilde{y} = y/a_{\text{п}}$ для подошвы и $\tilde{y} = y/a_{\text{г}}$ для головки: $\tilde{y} = 0 \div 0,5 \div 1,0$ (см. рисунок 8).

Полученные в результате проведенного вычислительного эксперимента значения высоты подошвы и головки позволили рассчитать коэффициенты приращения-утяжки фланцев в характерных точках \tilde{y} : $\beta_{\text{п}i} = \Pi_i/H_{\text{п}}$ и $\beta_{\text{г}i} = \Gamma_i/H_{\text{г}}$ ($i = 1, 3, 4$).

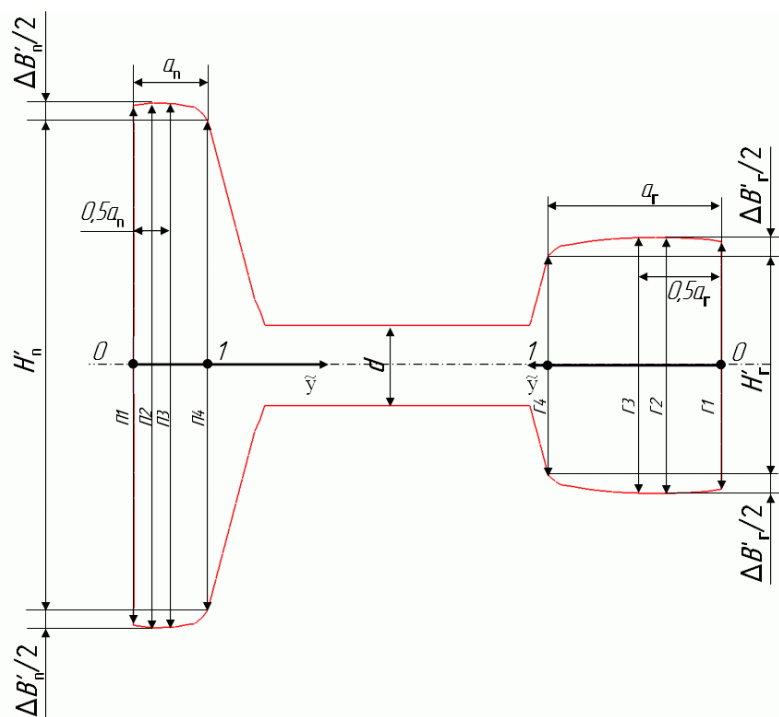


Рисунок 8 – Схема измерения высоты подошвы и головки рельсового профиля

Статистической обработкой результатов вычислительного эксперимента получены аналитические зависимости, описывающие криволинейную форму головки и подошвы рельсового профиля:

$$\beta_{\text{п}} = C_0(1/\eta_{\text{ш}} - 1)^{C_1} A^{C_2} \tilde{H}_{\text{п}}^{C_3}, \quad \beta_{\text{г}} = C_4(1/\eta_{\text{ш}} - 1)^{C_5} A^{C_6} \tilde{H}_{\text{г}}^{C_7}, \quad (46)$$

где коэффициенты $C_0 \div C_7$ рассчитывают в зависимости от текущего значения \tilde{y} по формулам:

$$\begin{aligned} C_0 &= -0,339\tilde{y}^2 + 0,203\tilde{y} + 1,057, & C_4 &= -0,510\tilde{y}^2 + 0,279\tilde{y} + 1,088; \\ C_1 &= -0,047\tilde{y}^2 + 0,030\tilde{y} + 0,005, & C_5 &= -0,116\tilde{y}^2 + 0,086\tilde{y} + 0,001; \\ C_2 &= 0,010\tilde{y}^2 - 0,002\tilde{y} - 0,007, & C_6 &= 0,015\tilde{y}^2 + 0,014\tilde{y} - 0,022; \\ C_3 &= 0,096\tilde{y}^2 - 0,063\tilde{y} - 0,007, & C_7 &= 0,141\tilde{y}^2 - 0,122\tilde{y} + 0,021. \end{aligned}$$

С учетом этих зависимостей сформулированы рекомендации по назначению обжатий во вспомогательных двухвалковых калибрах.

В пятой главе представлена математическая модель и методика расчета рационального скоростного режима прокатки в непрерывно-реверсивных группах клеток современных универсальных рельсобалочных станков.

При разработке методики расчета рационального скоростного режима прокатки ориентировались на типовой состав группы «тандем» (рисунок 9, а), прокатка в которой ведется по схеме, представленной на рисунке 9, б. Эта схема выбрана в связи с тем, что позволяет рассмотреть все возможные случаи прокатки, т.е. с использованием одной, двух и всех трех клеток группы (см. рисунок 9, соответственно проходы II, I и III). Типовая диаграмма скоростного режима прокатки для выбранной схемы показана на рисунке 10.

Для расчета рационального скоростного режима прокатки рельсов в рассматриваемой непрерывно-реверсивной группе клеток применили основные положения методики В.А. Тягунова. При этом учли следующие особенности, связанные с непрерывной прокаткой:

1. Для всех рабочих клеток непрерывной группы ($i = 1, 2, 3$) на характерных участках скоростной диаграммы (рисунок 10): ускорения валков с полосой τ_y , прокатки с постоянной скоростью τ_n , замедления валков с раскатом τ_z – должно выполняться условие постоянства секундных объемов $V_i \omega_i = const$ (V_i – скорость прокатки, ω_i – поперечное сечение раската), вследствие чего частота вращения валков каждой последующей ($i + 1$ -ой) клетки и предыдущей (i -ой) клетки связаны соотношением

$$n_{i+1} = n_i \frac{D_{ki}}{D_{k(i+1)}} \lambda_{i+1}, \quad (47)$$

где D_k – катающий диаметр валков; λ_{i+1} – коэффициент вытяжки. Катающий диаметр валков необходимо определять с учетом опережения металла

$$D_{ki} = D_{\Gamma i} v_i, \quad (48)$$

здесь $D_{\Gamma i}$ – диаметр горизонтального вала по его бочке, v_i – коэффициент опережения, рассчитываемый по формуле (28).

2. Передний конец раската должен проходить межклетевые расстояния L_k с постоянной, заправочной скоростью прокатки, соответствующей моменту времени окончания разгона валков τ_p и начала захвата металла валками при частоте вращения валков n_{yi} . Это позволит

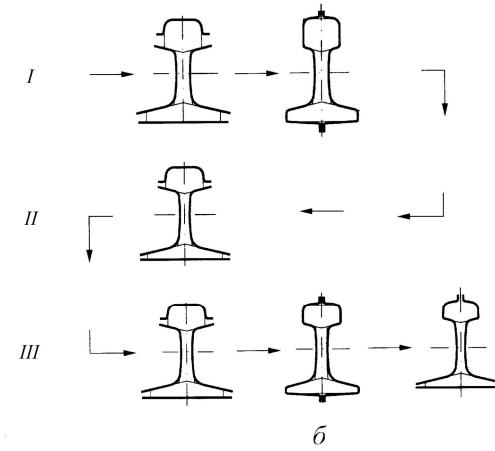
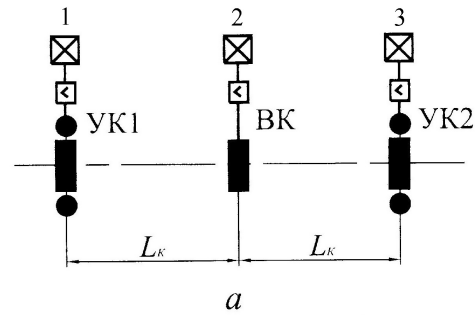


Рисунок 9 – Типовой состав группы «тандем» (а) и схема прокатки рельсов (б) в непрерывно-реверсивной группе современного рельсобалочного стана: 1 – 3 – номера клеток; I – III – номера проходов

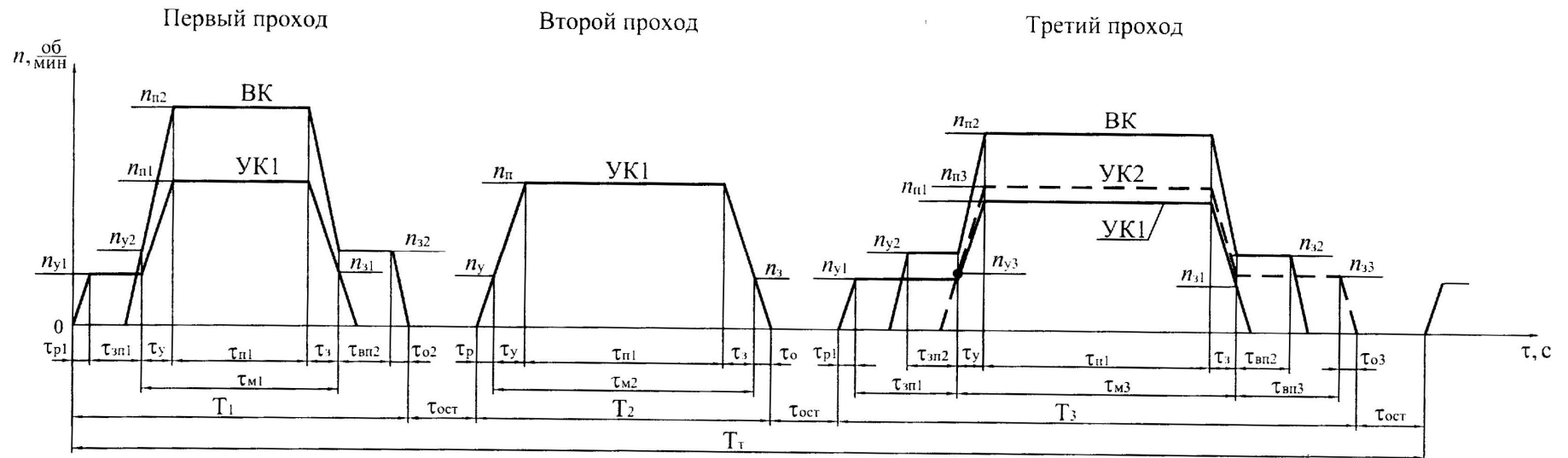


Рисунок 10– Типовая диаграмма скоростного режима прокатки в непрерывно-реверсивной группе клеток

облегчить условия захвата и снизить динамические нагрузки при входе раската в непрерывную группу клетей. Ускорение валков с полосой начинается одновременно во всех клетях группы после того, как передний конец раската на заправочной скорости пройдет все межклетевые промежутки и достигнет последней клетки. Замедление валков с полосой также должно начинаться одновременно во всех клетях группы после окончания прокатки с постоянной скоростью в первой клетки.

3. Продолжительность ускорения валков с раскатом τ_y от n_{yi} до постоянной частоты вращения $n_{\pi i}$ во всех клетях непрерывной группы ($i = 1, 2, 3$) должна быть одинаковой и определяется по первой клетки группы:

$$\tau_y = \tau_{y1} = (n_{\pi 1} - n_{y1})/a_1 . \quad (49)$$

При этом значения ускорения a_i в остальных клетях группы ($i = 2, 3$) следует рассчитывать по формуле

$$a_i = (n_{\pi i} - n_{yi})/\tau_y . \quad (50)$$

Аналогично продолжительность торможения валков с раскатом τ_3 и замедление b_i нужно определять по формулам

$$\tau_3 = \tau_{31} = (n_{\pi 1} - n_{31})/b_1 \text{ и } b_i = (n_{\pi i} - n_{3i})/\tau_3 . \quad (51)$$

4. Поскольку время $\tau_{\pi 1}$ совместной прокатки с постоянной скоростью в двух или трех клетях группы определяется по 1-ой клетки, то для обеспечения прокатки более длинной полосы во 2-й и 3-й клетях потребуется выход раската из валков при постоянной частоте вращения n_{32} или n_{33} в течение времени $\tau_{\text{вп}2}$ и $\tau_{\text{вп}3}$ соответственно (см. рисунок 10, первый и третий проходы).

5. Длительность паузы $\tau_{\text{ост}}$ для остановки всей группы клетей между реверсивными проходами зависит от быстродействия механизма перемещения вспомогательной клетки при выводе на линию прокатки нужного калибра и составляет обычно $\tau_{\text{ост}} = 4 \div 6$ с. Поэтому известное тройное условие В.А. Тягунова (равенство времени срабатывания рольгангов, нажимных винтов и реверса электродвигателей) следует дополнить минимально возможным временем срабатывания механизма перемещения клетки.

Разработанная математическая модель расчета рационального скоростного режима прокатки была введена в систему автоматического управления электроприводом непрерывно-реверсивной группы клетей при освоении нового универсального рельсобалочного стана на ОАО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат». Опыт производства рельсов на УРБС ОАО «ЕВРАЗ-ЗСМК» показал работоспособность разработанной модели в производственных условиях.

Шестая глава посвящена исследованиям температурных режимов и энергосиловых параметров прокатки с применением универсальных рабочих клетей. Разработана методика моделирования температурного поля и напряженного состояния при прокатке длинномерных

рельсов в программном комплексе Deform-3D. Определены закономерности изменения температуры металла (рисунок 11) и интенсивности напряжений по длине и элементам прокатываемого рельса. Установлено, что неравномерность температурного поля и напряженного состояния возрастает по мере формирования элементов рельсового профиля и создает возможность продольного изгиба и скручивания раската вокруг его продольной оси.

Разработана математическая модель, позволяющая оперативно рассчитывать температуру любого элемента рельсового профиля по длине чистового раската с целью управления режимом последующей термообработки. Текущая температура головки t_{Γ} , подошвы t_{Π} и шейки $t_{\text{Ш}}$ рельса по длине полосы могут быть определены по выражениям

$$t_{\Gamma} = t_{\text{ПКГ}}(1 - 0,0603m + 0,0118m^2), \quad (52)$$

$$t_{\Pi} = t_{\text{ПКП}}(1 + 0,0040m - 0,0484m^2), \quad (53)$$

$$t_{\text{Ш}} = t_{\text{ПКШ}}(1 + 0,0010m - 0,0632m^2), \quad (54)$$

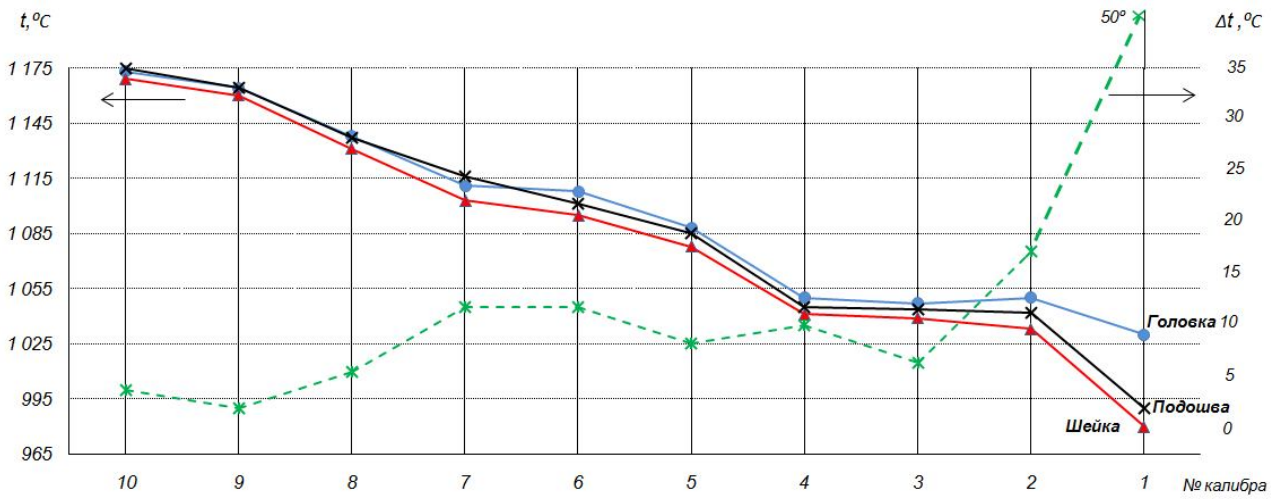
где $t_{\text{ПКГ}}$, $t_{\text{ПКП}}$, $t_{\text{ПКШ}}$ – температура переднего конца раската по каждому элементу рельса, $m = l/l_{\text{к}}$ – приведенная длина полосы, указывающая место определения температуры (l и $l_{\text{к}}$ – текущая и конечная длина рельса).

Полученные выражения (52) – (54) удобны тем, что замерив или рассчитав температуру переднего конца по каждому элементу чистового раската, можно оперативно рассчитать температуру головки, подошвы и шейки по всей длине рельса и соответственно этому определить режим охлаждения каждого участка при дифференцированном термоупрочнении рельсов.

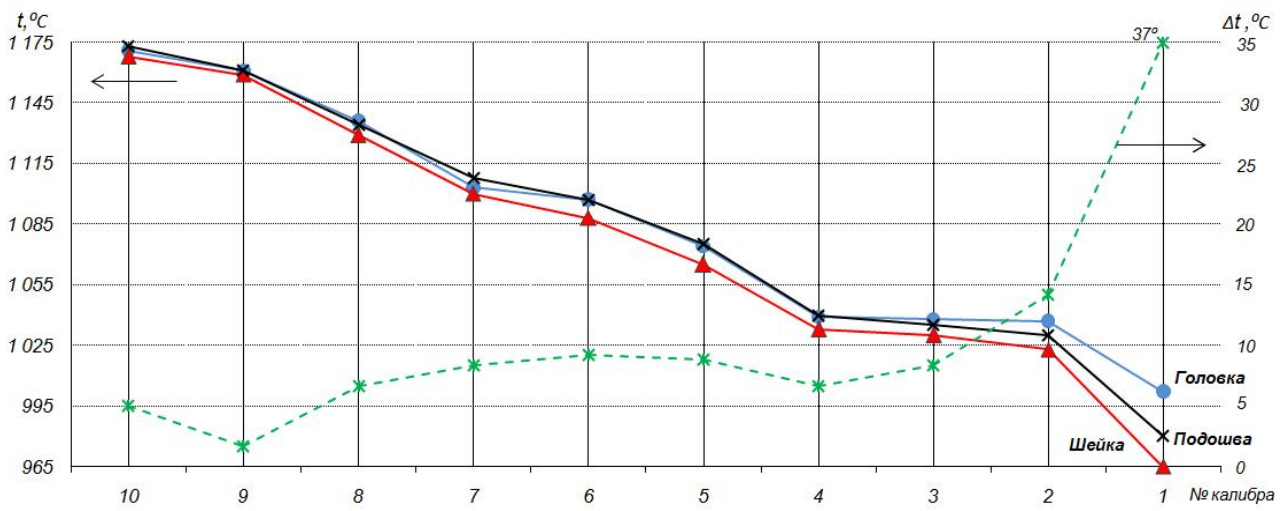
По результатам исследований на уровне изобретения (патент РФ № 2518207) предложен новый способ термообработки длинномерных рельсов. Предложенный способ позволит существенно снизить или исключить искривление и коробление концов рельса, которые вызваны неравномерностью температурного поля по сечению рельсового профиля.

Для этого предложено перед охлаждением концы рельса закрепить от поперечного перемещения в клещевых зажимах и растягивать рельс в продольном направлении.

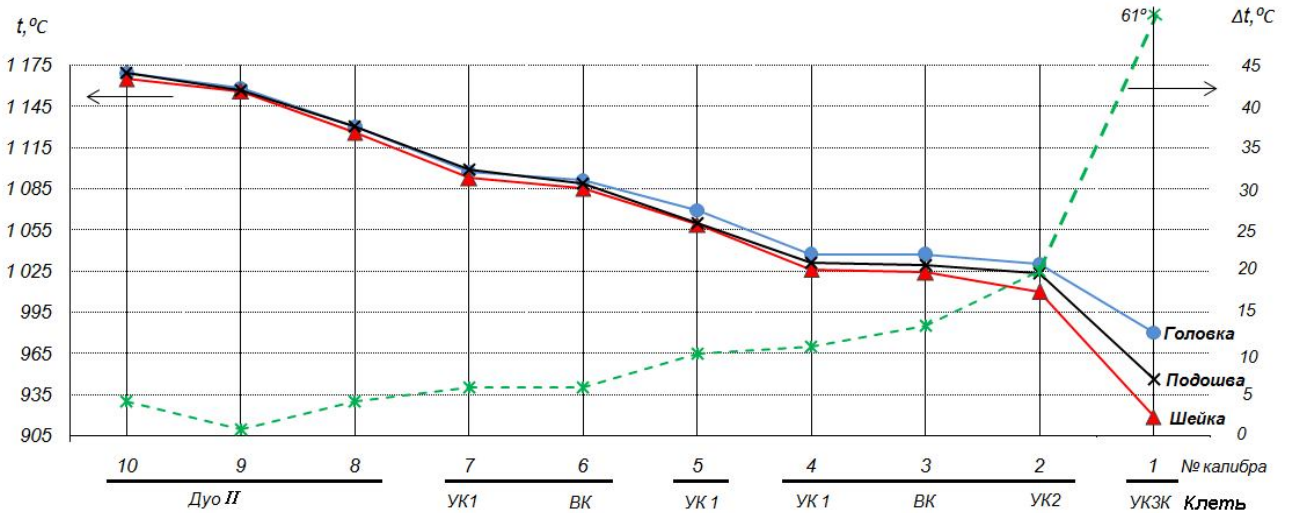
Выполнено исследование энергосиловых параметров прокатки рельсового профиля в универсальном калибре по традиционному (с постоянной шириной шейки) и разработанному (с переменной шириной шейки) способам. Для этого по разработанным методикам рассчитали формоизменение металла при прокатке рельса Р65 для типового универсального рельсобалочного стана, включающего нерерывно-реверсивную группу тандем в составе двух универсальных четырехвалковых клеток УК1 и УК2, одной вспомогательной двухвалковой клетки ВК и трехвалковой калибрующей универсальной клетки УК3К. При этом моделировалась прокатка по схеме ВК-УК2-УК2-ВК-УК1-УК1-ВК-УК3К. По результатам моделирования подтверждена энергоэффективность разработанного способа прокатки. Так, например, суммарные затраты мощности на прокатку в универсальных калибрах по традиционному способу оказались на 11,5% выше, чем по способу с переменной шириной шейки.



а



б



в

Рисунок 11 – Изменение среднемассовой температуры t и разницы температур Δt элементов рельсового профиля в поперечных сечениях передней (а), средней (б) и задней (в) частях раската

Разработана методика расчета энергосиловых параметров прокатки рельсов в универсальных калибрах.

При расчете температурного режима прокатки изменение температуры для каждого элемента профиля, при прохождении любого участка стана, предложено рассчитывать по формуле

$$\Delta t_i = t_{0i} - \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{0,0255\Pi_i\tau}{\omega_i} + \left(\frac{1000}{t_{0i} + \Delta t_{ди} + 273}\right)^2}} + 273, \quad (55)$$

где t_{0i} – температура элемента профиля перед рассматриваемым участком стана (°C); Π_i и ω_i – его периметр (мм) и площадь (мм²) поперечного сечения; τ - время охлаждения (с); $\Delta t_{ди}$ - повышение температуры рассматриваемого элемента рельсового профиля при деформации его в проходе, предшествующем рассматриваемому участку стана (°C). Индекс i принимает последовательно значения ш – шейка, п – подошва, г – головка.

Периметр и площадь поперечного сечения шейки, подошвы и головки определяют в ходе расчета формоизменения металла, а величину $\Delta t_{ди}$ по формуле:

$$\Delta t_{ди} = 0,183\sigma_{si} \ln \lambda_i, \quad (56)$$

где σ_{si} и λ_i – сопротивление металла деформации и коэффициент вытяжки элемента профиля в проходе, предшествующем рассматриваемому участку стана.

Расчет температуры выполняют для какого-либо участка полосы (переднего, заднего конца или середины), определяя время охлаждения между проходами по результатам расчета скоростного режима с учетом смены направления прокатки при реверсе.

Крутящий момент деформации $M_{вал}$ рассчитывают по формулам (29) – (30), а силу прокатки по выражению:

$$P = M_{вал} / (2\psi_{п} l), \quad (57)$$

где l – длина очага деформации шейки, $\psi_{п}$ – коэффициент плеча приложения равнодействующей, определяемый выражением

$$\psi_{п} = 5,85 - 11,0(l/d_{ср}) + 7,35(l/d_{ср})^2 - 1,58(l/d_{ср})^3, \quad (58)$$

$d_{ср}$ – средняя толщина шейки в рассматриваемом проходе.

Момент трения в шейках рабочих валков, возникающий в процессе деформации $M_{тр}$ и момент прокатки $M_{пр}$ определяют по известным выражениям: $M_{тр} = P f_{п} d_{ш}$, $M_{пр} = M_{вал} + M_{тр}$, где $f_{п}$ – коэффициент трения в шейках валков; $d_{ш}$ – диаметр шейки валка.

Рассчитанные таким образом энергосиловые параметры прокатки позволяют выполнить проверку ограничений по прочности оборудования и мощности электродвигателей привода рабочих клеток.

На основе представленных выше методик расчета формоизменения металла, скоростных режимов прокатки, температурных и энергосиловых параметров прокатки, в **седьмой главе** разработан общий алгоритм проектирования рациональных калибровок валков и технологических режимов прокатки рельсов на универсальном рельсобалочном стане. Общий алгоритм включает в себя:

- формирование исходных данных, в объеме необходимом для проектирования;
- рекомендации по составлению схемы прокатки;
- методику определения «горячих» размеров чистового профиля и калибра;
- методику расчета формоизменения металла при прокатке в универсальных, вспомогательных двухвалковых, закрытых и открытых рельсовых, а также в подготовительных тавровых калибрах;
- рекомендации по построению калибров;
- методику расчета скоростного режима прокатки;
- методику расчета температурного режима и энергосиловых параметров прокатки, а также проверки ограничений разработанных режимов по прочности оборудования и мощности электродвигателей привода рабочих клетей.

В **восьмой главе** представлено использование результатов диссертационной работы.

Основные положения диссертационной работы были использованы при разработке технологического задания на реконструкцию рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ-НТМК» в части разработки калибровки валков и технологических режимов прокатки рельсов (Комплексное технологическое задание на реконструкцию рельсового производства ОАО «НТМК». КТРС-14-2Р-002-2008. Екатеринбург: 2008). В частности, предложена оригинальная схема прокатки рельсов, предусматривающая два прохода в группе тандем, в отличие от трех или пяти проходов в известных типовых схемах прокатки. Разработанный способ прокатки рельсов защищен патентом РФ на изобретение № 2429090. Кроме того рассчитано формоизменение металла, спроектирована калибровка валков, определены рациональный скоростной режим и силовые параметры процесса прокатки. По результатам расчетов сформулированы требования к техническим параметрам рабочих клетей.

С использованием основных положений диссертации разработана технология прокатки рельса Р65 в рамках хозяйственного договора № 31/15 / Н977.210.013/15 между Уральским федеральным университетом и ТОО «Актюбинский рельсобалочный завод» (г. Актобе, Республика Казахстан). По разработанным методикам и алгоритмам выбраны рациональные схемы прокатки и разработана калибровка валков. Разработаны комплекты рабочей технической документации, включающие чертежи всех калибров, монтажные чертежи рабочих валков, чертежи шаблонов и контршаблонов ручьев калибров. Для этих калибровок спроектированы узлы привалковой арматуры, для которых также разработан комплект технической документации в составе общих видов и сборочных чертежей узлов, а

также рабочие чертежи отдельных деталей конструкций. Указанная техническая документация передана ТОО «Актюбинский рельсобалочный завод» для реализации разработанной технологии прокатки рельсов Р65.

Основные научные положения и технологические решения диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке студентов по двум основным образовательным программам высшего образования, реализуемым в Уральском федеральном университете. Для этих образовательных программ разработаны разделы дисциплин, связанные с теорией, калибровкой и технологией прокатки рельсов на рельсобалочных станах.

Материалы диссертационной работы, в частности, методика расчета формоизменения и проектирования калибровки валков, математическая модель и методика расчета рационального скоростного режима прокатки в непрерывно-реверсивных группах клетей современных универсальных рельсобалочных станов, были использованы при разработке и реализации двух программ дополнительного профессионального образования.

В рамках Президентской программы повышения квалификации инженерных кадров на 2012-2014 гг., программа «Инновационные технологические процессы обработки металлов давлением» разработан и реализован модуль «Современная технология производства рельсов и балок». Программа повышения квалификации проведена для инженерно-технического персонала ОАО «ЕВРАЗ НТМК».

В рамках Ведомственной целевой программы «Повышение квалификации инженерно-технических кадров на 2015-2016 гг.», программа «Энергоэффективные технологии производства сплавов на основе железа» разработан и реализован модуль «Производство проката», включающий раздел «Технология и перспективы развития производства железнодорожных рельсов». Программа повышения квалификации проведена для инженерно-технического персонала ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК».

В заключении приводятся основные результаты и выводы исследования.

Диссертационная работа направлена на решение актуальной научно-технической проблемы создания научных основ, разработки и научного обоснования основных технологических решений процесса прокатки железнодорожных рельсов на современных универсальных рельсобалочных станах.

В результате выполненной работы достигнута поставленная цель и получены следующие результаты:

- разработана математическая модель формоизменения и энергосиловых параметров при прокатке рельсового профиля в универсальном четырехвалковом калибре;
- по результатам численной реализации разработанной модели определены закономерности формоизменения металла и силовых воздействий при равномерной деформации рельсового профиля;

- установленные закономерности описаны инженерными формулами и являются основой для разработки научно обоснованной методики расчета рациональных режимов обжатий, скоростных и энергосиловых параметров прокатки высококачественных рельсов на современных рельсобалочных станах;
- на основе анализа промышленных калибровок валков, разработана единая блочная структурная схема, позволяющая описать практически все известные и формировать множество новых различных вариантов схем рельсовых калибровок. Сформулированы рекомендации по выбору рациональной схемы в зависимости от состава оборудования стана и требований, предъявляемых к технологическому процессу;
- разработана научно обоснованная методика расчета формоизменения металла при прокатке рельсов на современных универсальных рельсобалочных станах;
- проведено компьютерное моделирование нестационарного процесса входа полосы в очаг деформации четырехвалкового универсального калибра. Установлены закономерности поведения раската и качественно оценены силовые воздействия полосы и вводных направляющих линеек;
- выполнено теоретическое исследование условий входа раската в калибр, по результатам которого сформулированы математически условия захвата рельсового раската валками универсальной клетки;
- разработан новый способ прокатки рельсов в универсальных калибрах (патент РФ № 2668626), отличающийся от известных способов тем, что прокатка в универсальных калибрах ведется с последовательно расширяющейся шейкой. Показано, что соответствующим подбором величины расширения шейки и обжатий головки и подошвы вертикальными валками можно выровнять длины очагов деформации, при соблюдении равенства коэффициентов вытяжки по всем элементам профиля;
- получены формулы для расчета величины расширения шейки и обжатий головки и подошвы, позволяющие обеспечить указанные выше условия деформации. Показано, что сконструированные таким образом универсальные калибры позволяют улучшить условия захвата, стабилизировать положение полосы в валках, устранить искривления полосы при входе в очаг деформации, а также снизить расход электроэнергии на прокатку;
- проведен спланированный вычислительный эксперимент по исследованию формоизменения металла при прокатке рельсового профиля в универсальном калибре. Подтвержден криволинейный характер свободной поверхности головки и подошвы. Статистической обработкой результатов вычислительного эксперимента получены аналитические зависимости, описывающие криволинейную форму головки и подошвы рельсового профиля. С учетом этих зависимостей сформулированы рекомендации по назначению обжатий во вспомогательных двухвалковых калибрах;

– разработана математическая модель и методика расчета рационального скоростного режима прокатки в непрерывно-реверсивных группах клетей современных универсальных рельсобалочных станов;

– разработанная математическая модель расчета рационального скоростного режима прокатки опробована путем ввода в систему автоматического управления электроприводом непрерывно-реверсивной группы клетей при освоении нового универсального рельсобалочного стана на ОАО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат». Опыт производства рельсов на УРБС ОАО «ЕВРАЗ-ЗСМК» показал работоспособность разработанной модели в производственных условиях;

– разработана методика моделирования температурного и напряженного состояния при прокатке длинномерных рельсов в программном комплексе Deform-3D;

– определены закономерности изменения температуры металла и интенсивности напряжений по длине и элементам прокатываемого рельса. Установлено, что неравномерность температурного и напряженного состояния возрастает по мере формирования элементов рельсового профиля и создает возможность продольного изгиба и скручивания раската вокруг его продольной оси;

– разработана математическая модель расчета температуры элементов рельсового профиля по длине чистового раската, позволяющая оперативно рассчитывать температуру любого элемента по длине полосы с целью управления настройкой стана и режимом последующей термообработки. По результатам исследований температурных режимов и напряженного состояния предложен новый способ термообработки длинномерных рельсов (патент РФ № 2518207);

– выполнено исследование энергосиловых параметров прокатки рельсового профиля в универсальном калибре по традиционному (с постоянной шириной шейки) и разработанному (с переменной шириной шейки) способам в программном комплексе Deform-3D. Подтверждена энергоэффективность разработанного способа прокатки;

– разработана методика расчета энергосиловых параметров прокатки рельсов в универсальных калибрах, позволяющая рассчитывать весь комплекс силовых характеристик процесса, а также осуществлять проверку ограничений режимов деформации по прочности оборудования и мощности электродвигателей привода рабочих клетей универсального балочного стана;

– разработан общий алгоритм проектирования рациональных калибровок валков и технологических режимов прокатки рельсов на универсальном рельсобалочном стане;

– разработанные методики и алгоритмы проектирования технологических режимов прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане применены при разработке технологического задания на реконструкцию рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ-НТМК»;

– основные положения диссертации использованы при разработке технологии прокатки рельса Р65 в рамках хозяйственного договора № 31/15 / Н977.210.013/15 между Уральским федеральным университетом и ТОО «Актюбинский рельсобалочный завод» (г. Актобе, Республика Казахстан)

– основные научные положения и технологические решения диссертационной работы используются в учебном процессе при обучении студентов уровня подготовки бакалавриат и магистратура по направлению 22.04.02 – Metallurgy. Материалы диссертационной работы, используются при разработке и реализации программ дополнительного профессионального образования.

В целом диссертация Шварца является научно-квалификационной работой, в которой представлено решение научной проблемы создания математических моделей процессов прокатки длинномерных рельсов на современном универсальном непрерывно-реверсивном рельсобалочном стане.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК:

1. Шварц Д.Л. Развитие методов расчета калибровок валков для прокатки рельсов / В.А. Шилов, Д.Л. Шварц, Р.А. Литвинов // Производство проката. – 2008 – №1. – С. 29-33. (0,31 п.л./0,1 п.л.)
2. Shilov V.A. Shaping of metal when rolling rails in universal grooves / V.A. Shilov, D.L. Shvarts, R.A. Litvinov // Steel in Translation. – 2008. – Vol. 38. – Is. 3. – pp. 214-216/ (0,18 п.л./0,06 п.л.) (*Scopus*)
3. Шварц Д.Л. Статистический анализ формоизменения металла при прокатке рельсов в двухвалковых калибрах / Д.Л. Шварц, В.А. Шилов, С.А. Усталов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2008. №5. – С. 65-66. (0,12 п.л./0,04 п.л.)
4. Шварц Д.Л. Расчет формоизменения металла при прокатке рельсов в универсальных калибрах / В.А. Шилов, Д.Л. Шварц, Р.А. Литвинов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2008. – №3. – С. 51-54 (0,24 п.л./0,08 п.л.)
5. Шварц Д.Л. Скоростные режимы прокатки рельсов в непрерывных реверсивных группах клетей современного рельсобалочного стана / В.А. Шилов, Д.Л. Шварц, Р.А. Литвинов // Производство проката. – 2008. – №7. – С.30-34 (0,31 п.л./0,1 п.л.)
6. Шварц Д.Л. Моделирование процесса прокатки рельсов в универсальных калибрах / В.А. Шилов, Р.А. Литвинов, Д.Л. Шварц // Производство проката. – 2009. – №8. – С.20-25 (0,37 п.л./0,12 п.л.)
7. Шварц Д.Л. Силовые воздействия при прокатке рельсового профиля в универсальном калибре / Д.Л. Шварц, В.А. Шилов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2009. – №11. – С. 25-29 (0,32 п.л./0,16 п.л.)

8. Шварц Д.Л. Приращение и утяжка фланцев при прокатке рельсов в универсальных калибрах / В.А. Шилов, Д.Л. Шварц, Р.А. Литвинов // Производство проката. – 2010. – №7. – С. 27-30 (0,18 п.л./0,06 п.л.)
9. Шварц Д.Л. Исследование температурных условий прокатки длинномерных рельсов на универсальном рельсобалочном стане / Е.О. Скосарь, В.А. Шилов, Д.Л. Шварц // Производство проката. – 2012. – №11. – С. 7-11. (0,31 п.л./0,1 п.л.)
10. Shvarts D.L. Rolling of rail profiles in a universal groove. Part 1. / D.L. Shvarts // Steel in Translation. – 2015. – Vol. 45. – Is. 6. – pp. 430-435; 0,38 п.л./0,38 п.л. (*Scopus*)
11. Shvarts D.L. Rolling of rail profiles in a universal groove. Part 2. / D.L. Shvarts // Steel in Translation. – 2015. – Vol. 45. – Is. 7. – pp. 499-502; 0,25 п.л./0,25 п.л. (*Scopus*)
12. Шварц Д.Л. Оперезение при прокатке рельсового профиля в универсальном калибре / Д.Л. Шварц, В.А. Шилов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgia. – 2016. – Т. 16. – №1. – С. 66-71. (0,38 п.л./0,19 п.л.)
13. Shilov V.A. Aspects of the Rolling of Long Rails on a Universal Rail-Beam Mill / V.A. Shilov, D.L. Shvarts, E.O. Skosar' // Metallurgist. – 2016. Vol. 60. – Is. 3. – pp 260–266; 0,44 п.л./0,13 п.л. (*Web of Science*)
14. Шварц Д.Л. Современное развитие вариационных методов решения задач сортовой прокатки / Д.Л. Шварц, В.А. Шилов, С.О. Непряхин // Производство проката. – 2016. – №5. – С. 18-21. (0,25 п.л./0,08 п.л.)
15. Шварц Д.Л. Классификация калибров для прокатки рельсов / А.М. Михайленко, Д.Л. Шварц // Производство проката. – 2017. – №4. – С. 19-25. (0,44 п.л./0,22 п.л.)
16. Михайленко А.М. Блочная структура рельсовых калибровок / А.М. Михайленко, Д.Л. Шварц // Производство проката. – 2017. – №6. – С. 16-20. (0,3 п.л./0,15 п.л.)
17. Shvarts D.L. New Variational Solutions for the Rolling of Flanged Sections in Universal Roll Passes / D.L. Shvarts, S.O. Nepryakhin, V.A. Shilov // Metallurgist. – 2017. – Vol. 60. – Is. 11. – pp. 1256–1261; 0,3 п.л./0,1 п.л. (*Web of Science*)
18. Шварц Д.Л. Новый способ деформации рельсового раската в универсальном калибре / Д.Л. Шварц, А.М. Михайленко, С.О. Непряхин // Производство проката. 2018. №4. С. 8-13 (0,31 п.л./0,1 п.л.)
19. Mikhailenko A.M. The concept of optimal bar roll design. Report 1. Basic provisions / A.M. Mikhailenko, D.L. Shvarts // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Chernaya Metallurgiya. – 2018. – Vol. 61. – Is. 1. – pp. 21 – 27; 0,42 п.л./0,21 п.л. (*Scopus*)
20. Mikhailenko A.M. The concept of optimal bar roll design. Report 2. Calibers space / A.M. Mikhailenko, D.L. Shvarts // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Chernaya Metallurgiya. – 2018. – Vol. 61. – Is. 5. – pp. 364 – 371; 0,5 п.л./0,25 п.л. (*Scopus*)

Патенты:

21. Пат. 2518207 РФ, МПК С21 D 9/06 Способ термической обработки рельсов / Шилов В.А., Скосарь Е.О., Шварц Д.Л.; № 2012150234/02, заявл. 23.11.2012; опубл. 10.06.2014, Бюл. №16.

22. Пат. 2429090 РФ, МПК В21В 1/08. Способ прокатки рельсов / А.В. Кушнарёв, А.А. Киричков, В.А.Шилов, Д.Л. Шварц и др.; № 2010114609/02, заявл. 12.04.14; опубл. 20.09.11, Бюлл. №26.

23. Пат. 2668626 РФ, МПК В21 В 1/08. Способ прокатки рельсов. / Михайленко А.М., Шварц Д.Л.; № 2017115538, заявл. 02.05.2017; опубл. 02.10.2018, Бюл. №28.

Прочие публикации:

24. Шилов В.А. Рациональный режим обжатий при прокатке рельсов в универсальных калибрах / В.А. Шилов, Д.Л. Шварц, Р.А. Литвинов // Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов. Труды международной научно-технической конференции. СПб: Изд-во Политех. ун-та, 2007. – С.434-439. (0,38 п.л./0,13 п.л.)

25. Шилов В.А. Метод расчета режимов деформации металла при прокатке рельсов в универсальных калибрах / В.А. Шилов, Д.Л. Шварц, Р.А. Литвинов // Труды седьмого конгресса прокатчиков. Т. 1. (Москва, 15-18 окт. 2007). М.: МОО «Объединение прокатчиков», Корпорация производителей черных металлов, 2007. – С. 519-524. (0,37 п.л./0,12 п.л.)

26. Шилов В.А. Теоретические основы расчета рациональных режимов прокатки рельсов в универсальных калибрах / В.А. Шилов, Д.Л. Шварц, Р.А. Литвинов // Современные технологии производства транспортного металла. Материалы 3-й Международной конференции «Трансмет – 2007». Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. – С. 178 – 181. (0,25 п.л./0,07 п.л.)

27. Шварц Д.Л. Статистический анализ коэффициентов деформации при прокатке в закрытых рельсовых калибрах / Д.Л. Шварц, В.А. Шилов, Р.А. Литвинов // Научные труды XIII отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ: сборник статей. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2008. – С. 198-199. (0,06 п.л./0,02 п.л.)

28. Шилов В.А. Моделирование формоизменения металла при прокатке рельсов в универсальных калибрах / В.А. Шилов, Д.Л. Шварц, Р.А. Литвинов // Труды Международной научно-практической конференции «Инженерные системы – 2009». Москва, 6-9 апреля 2009 г. – М.: РУДН, 2009. – Том 1. – С. 173-178 (0,36 п.л./0,12 п.л.)

29. Шилов В.А. Исследование напряженно-деформированного состояния металла при прокатке рельсов в универсальных калибрах / В.А. Шилов, Д.Л. Шварц, Р.А. Литвинов // Труды Международной научно-практической конференции «Инженерные системы – 2009». Москва, 6-9 апреля 2009 г. – М.: РУДН, 2009. – Том 1. – С. 179-183 (0,24 п.л./0,08 п.л.)

30. Шилов В.А. Компьютерное моделирование процесса прокатки рельсов в универсальных калибрах / В.А. Шилов, Д.Л. Шварц, Р.А. Литвинов // «Современные металлические материалы и технологии (СММТ-2009)» Труды международной научно-технической конференции СПб: Изд-во Политех. ун-та, 2009. – С. 73-74. (0,06 п.л./0,02 п.л.)

31. Шилов В.А. Закономерности процесса прокатки рельсов в универсальных калибрах / В.А. Шилов, Д.Л. Шварц, Р.А. Литвинов // Труды международной конференции «Форсирование индустриально-инновационного развития металлургии». Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатаева. Алматы. 2010. – С. 83-89 (0,375 п.л./0,125 п.л.)
32. Шварц Д.Л. Постановка задачи теоретического исследования по прокатке рельсового профиля в универсальном калибре / Д.Л. Шварц // Современные металлические материалы и технологии (СММТ'11). Труды международной научно-технической конференции. СПб: Изд-во Политех. ун-та, 2011. – С. 68-70 (0,125 п.л./0,125 п.л.)
33. Шилов В.А. Моделирование процесса прокатки рельсов в универсальных калибрах / В.А. Шилов, Д.Л. Шварц, Р.А. Литвинов // Материалы I Международной интерактивной научно-практической конференции «Инновации в материаловедении и металлургии» Ч. 2. Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 39-48. (0,63 п.л./0,21 п.л.)
34. Шилов В.А. Моделирование методом конечных элементов в системе DEFORM-3D температурных полей и напряженного состояния металла при прокатке длинномерных рельсов / В.А. Шилов, Е.О. Скосарь, Д.Л. Шварц // Metallurgy 2013. A collective monograph edited by Anna Kawalcki Series: Monographs №30. Czestochowa, 2013. – С. 100-108. (0,5 п.л./0,15 п.л.)
35. Шилов В.А. Температурный режим прокатки длинномерных рельсов на универсальном рельсобалочном стане / В.А. Шилов, Е.О. Скосарь, Д.Л. Шварц // Труды IX международного конгресса прокатчиков. Т. 1. Череповец, 2013. – С. 93-100. . (0,42 п.л./0,13 п.л.)
36. Шварц Д.Л. Механика процесса прокатки рельса в универсальном калибре / Д.Л. Шварц // Сборник докладов международного научно-технического конгресса «ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии». Ч.1. – М.: ООО «Белый ветер», 2014. – С. 388-395. (0,42 п.л./0,42 п.л.)
37. Шварц Д.Л. Применение вариационного принципа минимума полной мощности для анализа процесса прокатки рельсового профиля в универсальном калибре / Д.Л. Шварц // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Материалы международной молодежной научно-практической конференции, посвященной памяти члена-корреспондента РАН, почетного доктора УрФУ В. Л. Колмогорова. Екатеринбург: УрФУ, 2014. – С. 237-242. (0,375 п.л./0,375 п.л.)
38. Шварц Д.Л. Новый способ деформации рельсового раската в универсальном калибре / Д.Л. Шварц, А.М. Михайленко, С.О. Непряхин // Труды XI Международного конгресса прокатчиков. Т 1. Магнитогорск, 2017. – С. 295-302. (0,38 п.л./0,13 п.л.)