

На правах рукописи



Головатенко Алексей Валерьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ
ПРОКАТКИ ДЛИННОМЕРНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ НА
УНИВЕРСАЛЬНОМ РЕЛЬСОБАЛОЧНОМ СТАНЕ**

Специальность
05.16.05 – Обработка металлов давлением

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новокузнецк – 2016

Работа выполнена на кафедре «Обработка металлов давлением и металловедение.
ЕВРАЗ ЗСМК» ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный
индустриальный университет»

Научный руководитель: **Кадыков Владимир Николаевич**
кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры «Обработка металлов давлением и
металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК» ФГБОУ ВПО
«Сибирский государственный индустриальный
университет»

Официальные оппоненты:

Шилов Владислав Александрович
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры обработки металлов давлением
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Галкин Михаил Петрович
кандидат технических наук,
заместитель генерального директора по научно-
производственной деятельности ФГУП «ЦНИИчермет
им. И. П. Бардина»

Ведущая организация:

ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург

Защита состоится 19 апреля 2016 г. в 10-00 часов в аудитории ЗП на заседании
диссертационного совета Д 212.252.01 при ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный
индустриальный университет» по адресу: 654007, г. Новокузнецк, Кемеровская
область, ул. Кирова, д. 42, СибГИУ.

Факс: 8(3843) 46-57-92.

E-mail: ds21225201@sibsiu.ru.

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

Автореферат разослан « » 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.252.01,
д.т.н., профессор

О.И. Нохрина

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

В настоящее время Россия является одним из ведущих производителей железнодорожных рельсов, что объясняется преобладанием железнодорожных перевозок в транспортной системе страны. При этом до последнего времени технологическое лидерство в производстве рельсов принадлежало японским и западноевропейским (Австрия, Франция, Германия) металлургическим компаниям. Использование устаревшей технологии и оборудования для производства рельсов отечественными металлургическими комбинатами приводило к невозможности выполнения требований мировых стандартов.

В последние годы в российской металлургии проведена коренная реконструкция рельсопрокатного производства – введены в эксплуатацию современные универсальные рельсобалочные станы на АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК») и ПАО «Челябинский металлургический комбинат». Указанные прокатные станы предназначены для производства длинномерных (длиной до 100 м) дифференцированно закаленных железнодорожных рельсов.

Как показывают результаты начального периода эксплуатации нового (первого в России) универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК», отсутствие опыта производства рельсовых профилей с использованием универсальной прокатки в отечественной металлургической промышленности и ограниченный объем информации в зарубежных источниках приводят к значительным трудностям при разработке эффективных режимов прокатки. Несмотря на имеющийся научный задел по теоретическим основам процесса прокатки в универсальных калибрах, созданный в основном учеными Уральской научной школы (профессора В.А. Шилов, В.К. Смирнов и др.), можно в целом констатировать отсутствие надежных и апробированных методик проектирования энергоэффективных режимов прокатки на универсальных прокатных станах, обеспечивающих получение качественного рельсового проката.

Цели и задачи.

Цель работы: Теоретическое обоснование и разработка энергосберегающих режимов прокатки железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане, обеспечивающих повышение качества рельсовой продукции.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Провести экспериментальные исследования влияния термомеханических параметров прокатки на сопротивление деформации хромистой рельсовой стали.
2. Провести исследования влияния химического состава хромистой рельсовой стали на сопротивление пластическому деформированию при прокатке.
3. Разработать методику расчета сопротивления деформации рельсовых сталей различных марок при изменяющихся параметрах прокатки и нестабильном химическом составе стали.

4. Разработать режимы прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане, обеспечивающие снижение удельных энергозатрат и повышение качества готовых рельсов.

Научная новизна.

1. Впервые получены аналитические зависимости, характеризующие совместное влияние температуры, скорости и степени деформации хромистой рельсовой стали на сопротивление пластическому деформированию при прокатке.

2. Определены новые научно-обоснованные закономерности влияния химического состава рельсовых марок стали на сопротивление деформации при прокатке. Показано, что наиболее значимое влияние на сопротивление рельсовых сталей пластическому деформированию оказывает содержание ванадия и серы.

3. Разработана статистическая модель и методика расчета сопротивления деформации рельсовых сталей при изменяющихся термомеханических параметрах прокатки и нестабильном химическом составе стали, позволяющая получать достоверную информацию об энергосиловых параметрах прокатки при проектировании режимов обжатий на универсальных рельсобалочных станах.

4. Получены новые данные о влиянии калибровки валков черновых клетей универсального рельсобалочного стана на формирование качественных показателей рельсовых профилей, в частности, показано положительное влияние использования «косорасположенных» калибров взамен закрытых калибров «балочного типа» на качество поверхности рельсов, установлено улучшение макроструктуры готовых рельсов при использовании разрезки заготовки в трапецевидном калибре.

Практическая значимость.

1. Разработан интенсифицированный режим прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане, внедрение которого в условиях АО «ЕВРАЗ ЗСМК» позволило снизить удельный расход электроэнергии на 0,51 кВт·ч/т, уменьшить отбраковку готовых рельсов по дефектам поверхности на 0,5 %, снизить удельный расход прокатных валков на 0,51 кг/т, уменьшить такт прокатки в обжимных клетях на 10 сек., увеличить межремонтный объем проката с 3,5 до 6,0 тыс. т. Фактический экономический эффект, подтвержденный актом использования результатов диссертационной работы, составил 98,588 млн. руб./год, при доле участия автора 30% или 29,576 млн. руб.

2. Для условий универсального рельсобалочного стана разработана схема прокатки железнодорожных рельсов с повышенными требованиями к точности геометрических размеров, отличительными особенностями которой является использование отдельно расположенной чистовой универсальной клетки и отсутствие непрерывного режима прокатки в трех последних калибрах.

3. Разработан режим прокатки рельсовых профилей на универсальном рельсобалочном стане с использованием чернового разрезного калибра, обеспечивающий повышение качества макроструктуры рельсов за счет перевода внутренних дефектов исходных заготовок в менее ответственные элементы рельсового профиля.

4. Результаты диссертационной работы, в частности, новые научные данные о влиянии термомеханических параметров прокатки и химического состава рельсовых сталей на сопротивление деформации, разработанная методика расчета сопротивления деформации рельсовых сталей, используются при чтении лекционных курсов и проведении практических занятий для бакалавров по направлению «Металлургия» профиль «Обработка металлов давлением» в ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет, что подтверждено справкой о внедрении в учебный процесс.

Методология и методы исследования.

Экспериментальные исследования сопротивления деформации рельсовой стали в лабораторных условиях выполнены на специализированной установке «Hydrawedge II» – модуля комплекса для физического моделирования термомеханических процессов «Gleeble System 3800»; при анализе экспериментальных данных использованы современные методы статистической обработки, в том числе множественный регрессионный анализ; экспериментальные исследования в промышленных условиях, в том числе осциллографирование параметров работы двигателей приводов клетей при прокатке, выполнены на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

Положения, выносимые на защиту.

1. Совокупность результатов экспериментальных и теоретических исследований влияния термомеханических параметров прокатки на сопротивление хромистой рельсовой стали пластическому деформированию.
2. Результаты исследований совместного влияния концентрации постоянных примесей и легирующих элементов в рельсовой стали на сопротивление деформации при прокатке.
3. Разработанная статистическая модель и методика расчета сопротивления деформации рельсовых сталей.
4. Новые энергоэффективные схемы и режимы прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане, обеспечивающие достижение высокого качества поверхности и внутренней структуры рельсов, повышенную точность геометрических размеров рельсовых профилей.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность полученных результатов подтверждается совместным использованием современного оборудования для физического моделирования процессов обработки металлов давлением, апробированных методик статистической обработки экспериментальных данных, проведением сравнительного анализа с результатами опытно-промышленных исследований в условиях действующего прокатного стана и известными литературными данными по тематике исследования, а также подтвержденной технико-экономической эффективностью предложенных технологических решений.

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: VI Международная конференция «Железнодорожное машиностроение. Перспективы, технологии, приоритеты» (г. Москва, 2013 г.), 129-

ое заседание ежегодной отраслевой Рельсовой комиссии (г. Новокузнецк, 2013 г.), IV Международная научно-практическая конференция «Теоретические и прикладные аспекты современной науки» (г. Белгород, 2014 г.), XVIII Всероссийская научно-практическая конференция «Металлургия: Технологии, управление, инновации, качество» (г. Новокузнецк, 2014 г.), Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы современного машиностроения», (г. Юрга, 2014 г.), 130-ое заседание ежегодной отраслевой Рельсовой комиссии (г. Новокузнецк, 2014 г.), IV Международная интерактивная научно-практическая конференция «Инновации в материаловедении и металлургии» (г. Екатеринбург, 2014 г.), XIX Международная научно-практическая конференция «Металлургия: Технологии, инновации, качество» (г. Новокузнецк, 2015 г.).

Публикации.

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 19 печатных работах, в том числе в 3 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Личный вклад автора.

Автору принадлежит постановка задач исследования, проведение теоретических исследований, участие в экспериментальных исследованиях в лабораторных и промышленных условиях, обработка и анализ полученных результатов, формулирование выводов по диссертационной работе.

Соответствие диссертации паспорту специальности.

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует паспорту специальности 05.16.05 – Обработка металлов давлением по пунктам: 2. Исследование процессов пластической деформации металлов, сплавов и композитов с помощью методов физического и математического моделирования; 3. Исследование структуры, механических, физических, магнитных, электрических и других свойств металлов, сплавов и композитов в процессах пластической деформации; 4. Оптимизация процессов и технологий обработки давлением для производства металлопродукции с заданными характеристиками качества; 6. Разработка способов, процессов и технологий для производства металлопродукции, обеспечивающих экологическую безопасность, экономию материальных и энергетических ресурсов, повышающих качество и расширяющих сортамент изделий.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Изложена на 139 страницах, содержит 11 таблиц, 68 рисунков. Список использованных источников включает 102 наименования.

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы, приведены научная новизна, практическая значимость полученных результатов, представлена структура диссертации.

В первой главе на основании данных отечественных и зарубежных литературных источников выполнен анализ существующих технологических схем производства железнодорожных рельсов, выделены основные тенденции и направления в совершенствовании режимов прокатки рельсовых профилей. Проанализированы существующие в настоящее время в теории прокатки представления о влиянии термомеханических параметров прокатки и химического состава сталей на сопротивление пластическому деформированию при прокатке, выполнен критический анализ методов и методик определения сопротивления деформации сталей. Проведен анализ имеющихся научных и производственных данных о влиянии режимов деформации на качество рельсового проката.

На основании выполненного аналитического обзора сделан вывод о недостаточной проработке в отечественной и зарубежной науке вопросов, касающихся методов и методик определения достоверных значений сопротивления деформации рельсовых сталей при прокатке, методик проектирования эффективных режимов прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на универсальных рельсобалочных станах.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям сопротивления деформации хромистой рельсовой стали при различных термомеханических параметрах деформации. Экспериментальные исследования проводили путем испытаний образцов на горячее сжатие с использованием установки «Hydrawedge II», являющейся одним из четырех возможных сменных модулей комплекса для физического моделирования термомеханических процессов «Gleeble System 3800». В состав установки «Hydrawedge II» входят следующие вспомогательные устройства (рисунок 1): приборы для контроля температуры, усилия, перемещения; передвижной модуль для создания искусственной атмосферы в рабочей камере; деформирующие штанги с водяной системой охлаждения, необходимой для устранения нежелательного влияния нагрева на инструмент и измерительные приборы.

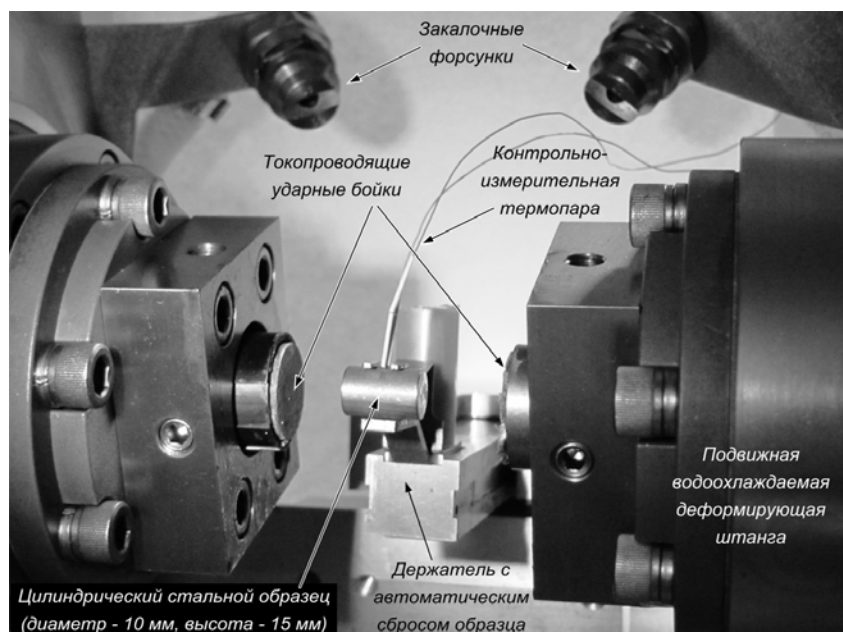


Рисунок 1 – Схема модуля «Hydrawedge II» комплекса для физического моделирования «Gleeble System 3800»

При проведении исследований использовали прямоугольные и цилиндрические образцы, полученные из рельсов 4-х плавок стали Э78ХСФ текущего производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Режим испытаний включал в себя следующие стадии: 1 – нагрев темплета в вакууме со скоростью 5 °С /с до температуры 1200 °С в течении 240 сек., 2 – изотермическая выдержка в течении 600 сек. при температуре 1200 °С, 3 – подстуживание стали до температуры деформации со скоростью 10 °С/с, 4 – деформация при заданной температуре, 5 – охлаждение стали со скоростями от 50 °С /с до 10 °С /с. Образцы деформировали со скоростями 0,1, 1 и 10 с⁻¹ при температурах 1150, 1100, 1050, 1000, 950 и 900 °С.

Результаты экспериментальных исследований обобщены в виде графических зависимостей сопротивления деформации от степени деформации, температуры и скорости деформации, примеры которых представлены на рисунке 2.

Анализ характера полученных зависимостей показал, что на участках, где степень деформации не превышает 0,7 кривые имеют выраженный максимум. То есть при достижении определенной степени деформации в стали в дополнении к динамическому возврату и полигонизации протекает также и динамическая рекристаллизация. При этом указанный максимум смещается в сторону увеличения степени деформации при повышении температуры и смещается в обратном направлении при увеличении скорости деформации. Далее на участке, соответствующем степени деформации 0,7-1,0 на некоторых кривых имеет место повторное увеличение сопротивления деформации, что, очевидно, обусловлено погрешностью эксперимента из-за повышения «бочкообразности» образцов при высоких степенях деформации.

По полученным данным повышение температуры прокатки рельсовой стали Э78ХСФ стали в интервале 900-1150 °С приводит к снижению сопротивления деформации, что объясняется ослаблением материальных связей частиц и созданием благоприятных условий их взаимного смещения. Повышение скорости деформации в интервале 0,1-10 с⁻¹ наоборот увеличивает сопротивление деформации, так как в этом случае процессы упрочнения начинают преобладать над конкурирующими процессами разупрочнения стали.

На основании обработки экспериментальных зависимостей сопротивления деформации от термомеханических параметров прокатки получено регрессионное уравнение вида:

$$\sigma = A \cdot e^{m_1 \cdot t} \cdot \varepsilon^{m_2} \cdot e^{\frac{m_3}{\varepsilon}} \cdot (1 + \varepsilon)^{m_4 \cdot t} \cdot e^{m_5 \cdot \varepsilon} \cdot u^{m_6 \cdot t}, \quad (1)$$

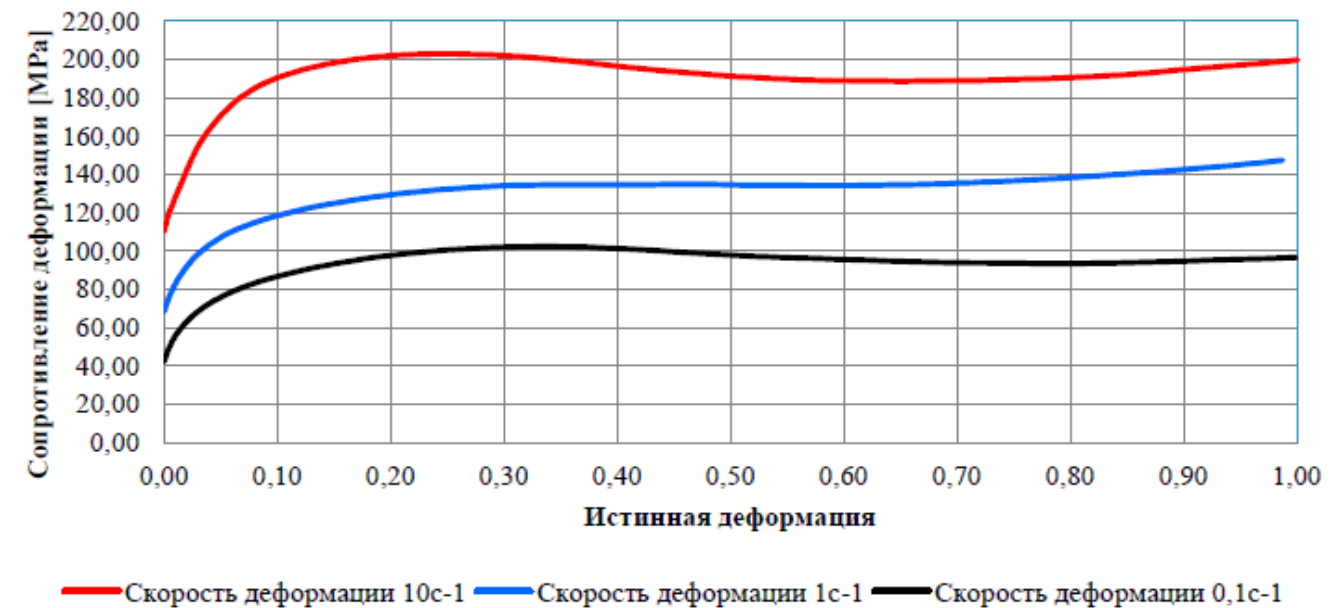
где A, m_1-m_6 – коэффициенты уравнения, зависящие от химического состава стали;

t – температура прокатки, °С;

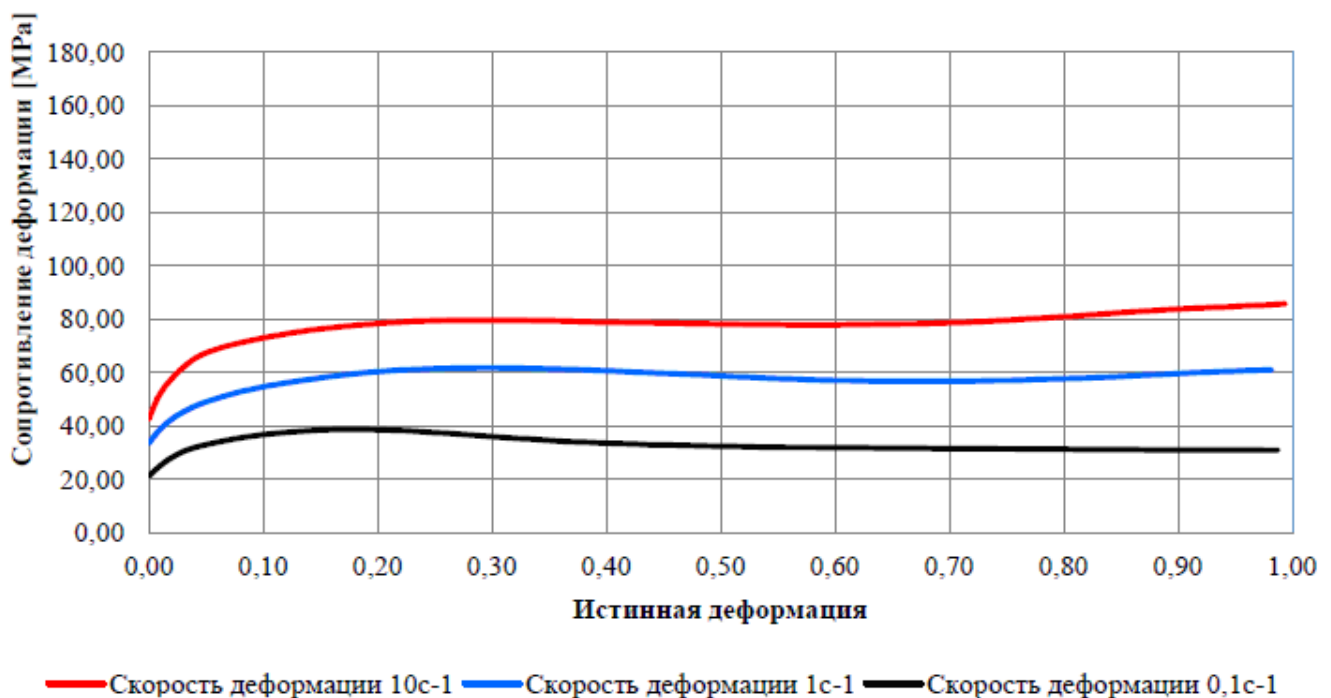
ε – степень деформации;

u – скорость деформации, с⁻¹.

С целью проверки адекватности полученной статистической модели проведен анализ, по результатам которого показана достаточно высокая сходимость расчетных и экспериментальных значений сопротивления деформации на анализируемых плавках (погрешность не превысила 10 %).



а



б

а – температура деформации 900 °С; б – температура деформации 1150 °С

Рисунок 2 – Экспериментальные зависимости сопротивления деформации стали Э78ХСФ от скорости и степени деформации

В **третьей главе** приведены результаты исследований влияния химического состава хромистой рельсовой стали Э78ХСФ на ее сопротивление пластическому деформированию. Исследования проводили методом множественного регрессионного анализа. Анализировали влияние концентрации в стали Э78ХСФ основных химических элементов (C, Si, Mn, Cr, S, P, V) на значения коэффициентов ранее полученного (в главе 2) уравнения для расчета сопротивления деформации (коэффициенты A , m_1 - m_6). В качестве базы для проведения регрессионного анализа

использовали данные испытаний на горячее сжатие 20 плавок стали Э78ХСФ текущего производства.

В результате проведенного анализа получены уравнения регрессии:

$$A = 4365,4 + 69118 \cdot S \quad (2)$$

$$m_1 = -0,0033 - 0,0043 \cdot V \quad (3)$$

$$m_2 = 0,2607 - 5,7663 \cdot P \quad (4)$$

$$m_3 = -0,0025 + 0,00308 \cdot C + 0,00025 \cdot Mn \quad (5)$$

$$m_4 = -0,0015 + 0,0475 \cdot P \quad (6)$$

$$m_5 = -0,407 + 0,655 \cdot Mn \quad (7)$$

$$m_6 = 0,0002 - 0,0012 \cdot V \quad (8)$$

Обобщая данные о влиянии химического состава стали на коэффициенты A , m_1 - m_6 и, следовательно, на сопротивление деформации можно констатировать, что на сопротивление рельсовой стали Э78ХСФ пластическому деформированию значимое влияние оказывает изменение концентрации следующих химических элементов: углерод, марганец, сера, фосфор и ванадий. Влияния кремния и хрома в рассматриваемых пределах не выявлено.

Увеличение содержания углерода с 0,75 до 0,79 % и марганца в интервале 0,78-1,09 % приводит к повышению сопротивления деформации, что согласуется с результатами других исследований, свидетельствующих о снижении пластичности легированных сталей при увеличении содержания перечисленных элементов.

Повышение концентрации серы с 0,005 до 0,015 % и фосфора с 0,012 до 0,017% приводит к увеличению сопротивления деформации стали Э78ХСФ, что обусловлено резко отрицательным влиянием данных элементов на пластические свойства стали. По данным многочисленных исследований отрицательное влияние серы и фосфора на пластичность стали наблюдается даже при относительно низком их содержании, что обусловлено свойством образуемых ими соединений концентрироваться в межзеренном пространстве в процессе кристаллизации стали при разливке.

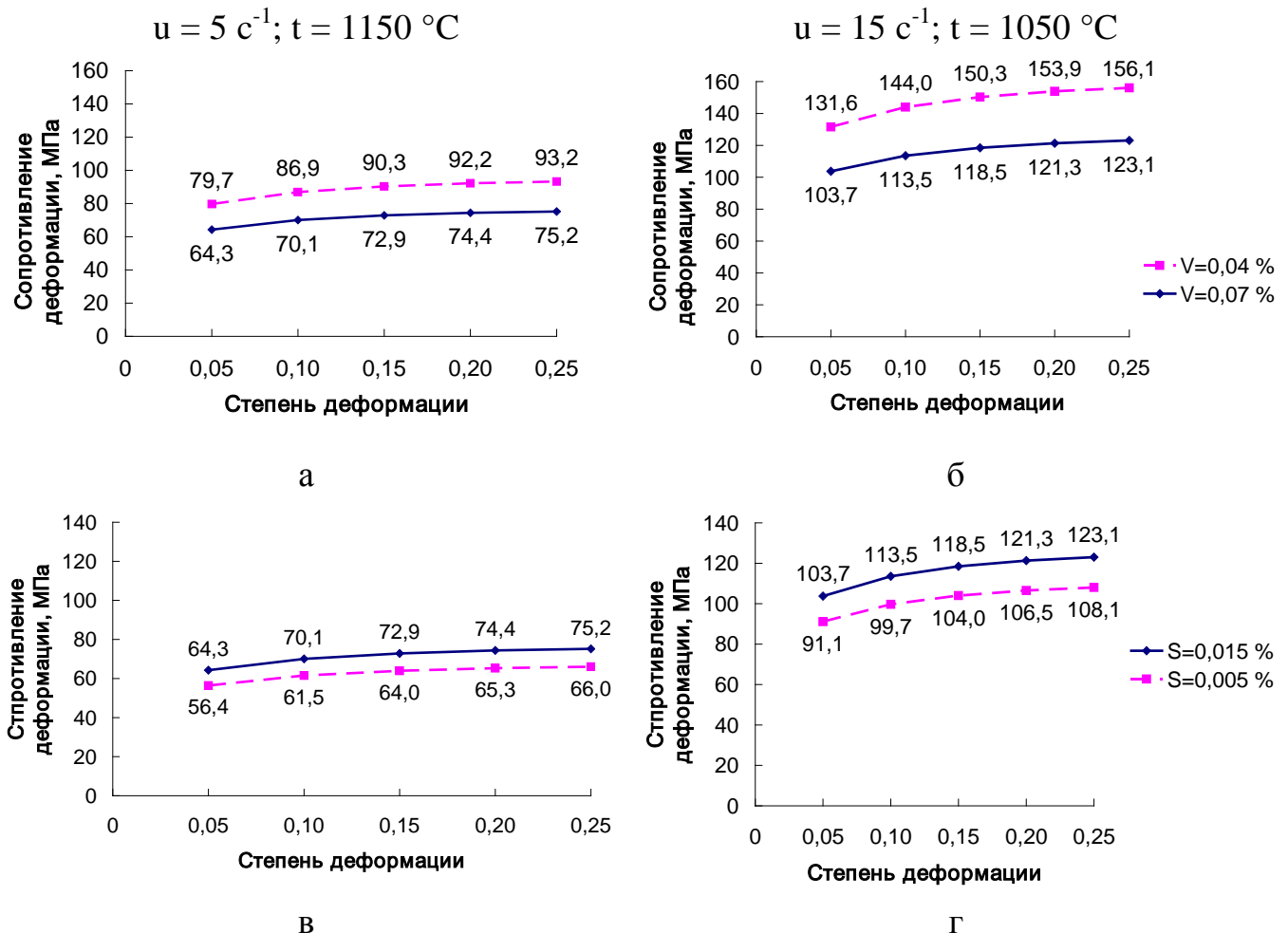
Увеличение содержания ванадия в рассматриваемой стали с 0,04 до 0,07 % приводит к снижению сопротивления деформации, что объясняется значительным влиянием присадок ванадия даже в небольших количествах на повышение пластичности стали.

Отсутствие влияния кремния на сопротивление деформации обусловлено его незначительной концентрацией в анализируемой стали (до 0,55 % по рассматриваемой выборке и до 0,80 % согласно требований ГОСТ Р 51685-2000) – имеются данные, что кремний повышает сопротивление деформации сталей только при его концентрации на уровне 1,5-2,0 %. Касательно хрома можно отметить, что для высокоуглеродистых хромистых сталей (с содержанием хрома более 0,45 %) решающее влияние на сопротивление деформации оказывает не хром, а углерод.

С целью оценки количественного влияния изменения содержания химических элементов на сопротивление деформации хромистой рельсовой стали проведен вычислительный эксперимент. Сущность эксперимента заключалась в проведении расчетов сопротивления деформации рельсовой стали Э78ХСФ при различном ее

химическом составе, варьирование которого проводили при условии поочередного изменения содержания каждого рассматриваемого химического элемента и неизменном содержании остальных элементов. Расчет проводили для условий деформации, характерных для прокатки в черновых и чистовых клетях рельсобалочных станов: $t = 1150^{\circ}\text{C}$, $u = 5\text{ c}^{-1}$ (черновые клетки); $t = 1050^{\circ}\text{C}$, $u = 15\text{ c}^{-1}$ (чистовые клетки); $\varepsilon = 0,05 - 0,25$ (для обеих групп клеток).

По результатам проведенного вычислительного эксперимента показано, что наиболее значимое влияние на сопротивление деформации хромистой рельсовой стали оказывают ванадий и сера (рисунок 3).



а, б – зависимость сопротивления деформации от содержания ванадия;

в, г – зависимость сопротивления деформации от содержания серы.

Рисунок 3 – Зависимость сопротивления деформации от химического состава рельсовой стали Э78ХСФ

Повышение содержания ванадия с 0,04 до 0,07 % приводит к снижению сопротивления деформации в 1,24-1,27 раза (рисунок 3 а, б), а увеличение концентрации серы с 0,005 до 0,015 % обуславливает повышение сопротивления деформации в 1,14 раза (рисунок в, г). При этом снижение температуры и повышение скорости деформации способствует усилению влияния ванадия на сопротивление рельсовой стали пластическому деформированию. Повышение

содержания фосфора, марганца и углерода в стали в рассматриваемых пределах приводит к увеличению сопротивления деформации до 10 %, 5 % и 1 % соответственно.

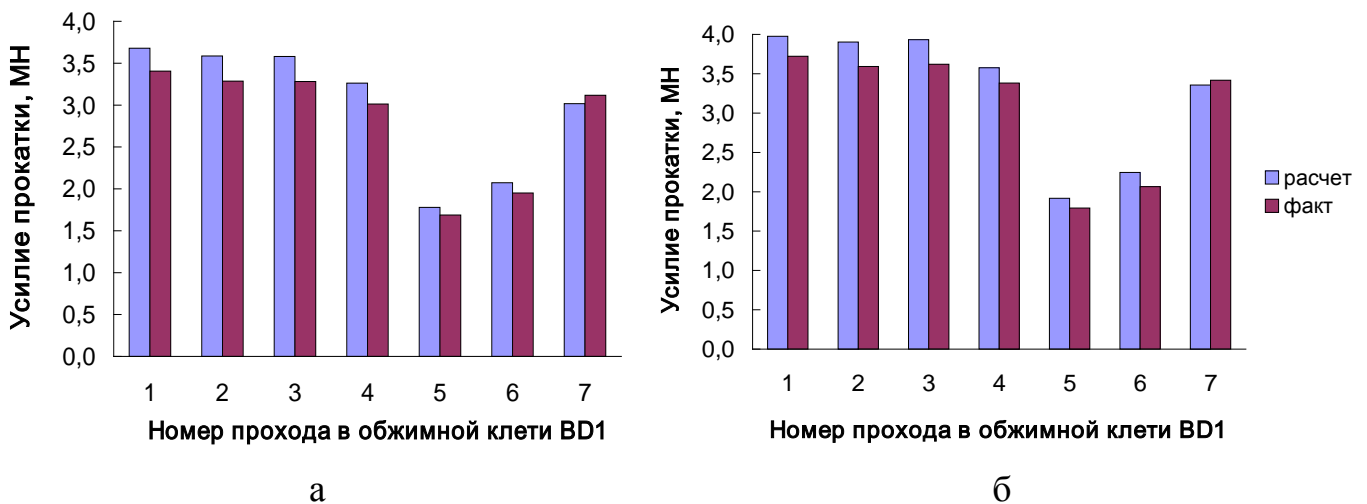
На основании проведенных экспериментальных (глава 2) и статистических исследований разработана методика расчета сопротивления деформации, учитывающая влияние термомеханических параметров деформации и химического состава стали.

Алгоритм применения указанной методики включает в себя следующие этапы:

1. Расчет коэффициентов уравнения (1) для заданного химического состава стали с использованием уравнений регрессии (2-8).

2. Расчет фактических значений сопротивления деформации для заданных термомеханических параметров прокатки (степень деформации, температура и скорость деформации) с использованием уравнения (1).

С целью проверки адекватности разработанной методики определения сопротивления деформации рельсовых сталей проведен сравнительный анализ расчетных и фактических усилий прокатки по проходам в первой обжимной клетки универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК». При проведении расчетов сопротивления деформации использовали два варианта химического состава стали Э78ХСФ: стандартный химический состав, соответствующий среднему содержанию на плавках текущего производства (средние значения содержания углерода, марганца, кремния и хрома по ГОСТ Р 51685-2000, содержание ванадия – 0,07 %; содержание серы и фосфора – 0,015 % для каждого элемента); химический состав аналогичный первому варианту за исключением содержания ванадия и серы (приняты 0,04 % и 0,005 % соответственно). По полученным данным отклонения расчетных от фактических данных не превышают 10 % (рисунок 4).



а – стандартный химический состав стали Э78ХСФ;

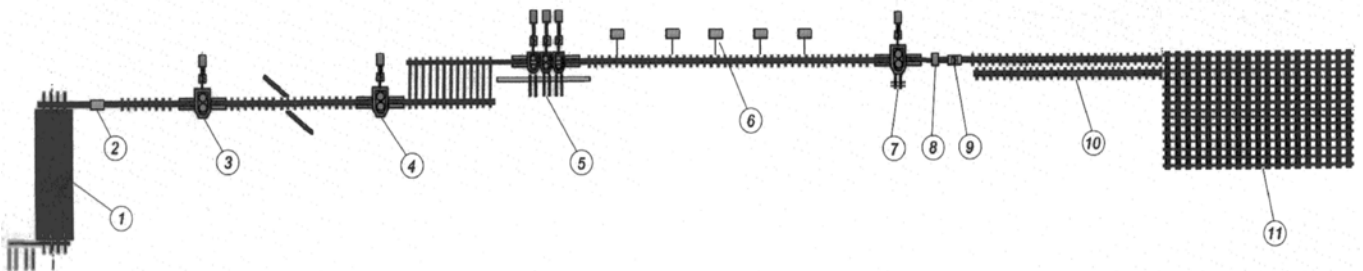
б – сталь Э78ХСФ с пониженным содержанием ванадия и серы.

Рисунок 4 – Сравнительный анализ расчетных и фактических данных по усилию прокатки в обжимной клетки рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Таким образом, можно сделать вывод, что разработанную методику расчета сопротивления деформации можно использовать при проектировании новых режимов прокатки рельсовых сталей. При этом, поскольку не выявлено значимого влияния на сопротивление деформации содержания кремния и хрома, то область применения указанной методики может быть распространена не только на сталь Э78ХСФ, но и на рельсовые стали, нелегированные данными элементами, в частности Э76Ф и Э76.

В **четвертой главе** представлены результаты опытно-промышленных исследований и разработки новых режимов прокатки длинномерных железнодорожных рельсов в условиях универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

В состав универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК» входит следующее основное оборудование (рисунок 5): нагревательная печь с шагающими балками; устройства для гидросбива первичной и вторичной окалины; последовательно расположенные двухвалковые реверсивные обжимные клетки (BD1 и BD2); универсальный тандем стан, установленный со смещением от линии прокатки и состоящий из двух универсальных (UR и UF) клеток и одной горизонтальной вспомогательной клетки (Е), отдельно расположенной чистовой калибрующей универсальной клетки (U0), устройств для автоматического измерения чистового профиля, автоматической клеймовочной машины.



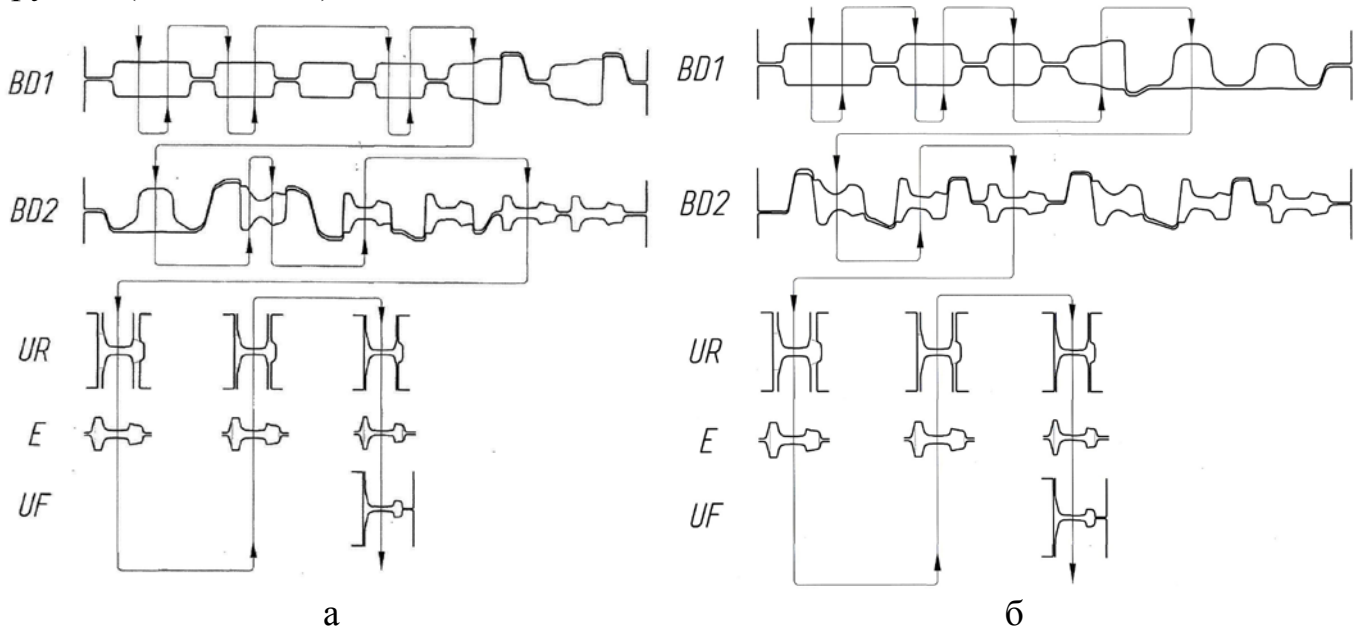
- 1 – нагревательная печь; 2 – устройство гидросбива окалины;
 3, 4 – обжимные клетки BD1 и BD2; 5 – тандем-группа; 6 – пилы горячей резки; 7 – чистовая клетка; 8 – лазерный измеритель профиля; 9 – клеймитель;
 10 – участок дифференцированной закалки; 11 – участок холодильника

Рисунок 5 – Схема расположения оборудования универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

В соответствии с контрактной калибровкой предусмотрена основная схема прокатки, которая включает в себя следующие этапы (рисунок 6 а):

- прокатка в первой обжимной клетке BD1 производится за 7 проходов, из которых первые 6 пропусков осуществляются в ящичных калибрах, а последний пропуск – в калибре «лежачая трапеция»;
- прокатка во второй обжимной клетке BD2 осуществляется за 5 проходов, (первый пропуск – в трапецевидном калибре, второй и третий пропуски – в первом закрытом рельсовом калибре, четвертый пропуск – во втором закрытом рельсовом калибре; пятый пропуск – в открытом симметричном рельсовом калибре);

- деформация в клетях тандем-стана, в том числе первый пропуск – непрерывная прокатка в первой универсальной клетке (UR) и эджерной (вспомогательной) клетке (ER); второй пропуск – в первой универсальной клетке (UR); третий пропуск – непрерывная прокатка во всех трех клетях непрерывной группы (UR, ER, UF).



а – контрактная калибровка фирмы «SMS Meer»; б – новый режим прокатки
Рисунок 6 – Основанная схема прокатки длиномерных железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Запуск и начальный период эксплуатации универсального рельсобалочного стана позволил выявить существенные недостатки контрактной калибровки: имел место изгиб переднего конца раската при прокатке во втором рельсовом калибре (второй и третий пропуски в клетке BD2) и деформации в симметричном рельсовом калибре (пятый пропуск в клетке BD2), что приводило к необходимости осуществления прокатки с «затравкой». В результате такого режима прокатки происходило образование «прокатных плен» на поверхности рельсов. Механизм возникновения данного дефекта заключается в раскатывании имеющихся механических повреждений поверхности рельса при прокатке. Отбраковка по данному виду дефекта превышала 3,5 % от общего объема производства готовых рельсов. Кроме того, прокатка с «затравкой» приводила к снижению стойкости прокатных валков за счет повышенной выработки калибров и повышению времени прокатки в обжимной клетке BD2. С целью устранения указанных недостатков разработан новый интенсифицированный режим прокатки железнодорожных рельсов (рисунок 6 б).

Основными отличительными особенностями нового режима прокатки является уменьшение количества проходов во второй обжимной клетке BD2 с пяти до трех и применение «косорасположенных» рельсовых калибров с уклонами боковых стенок до 18 % взамен закрытых рельсовых калибров «балочного типа». Возможность снижения количества проходов предварительно обоснована расчетами усилия прокатки в обжимных клетях (рисунок 7), проведенными с использованием

разработанной методики определения сопротивления деформации (глава 3 данной работы).

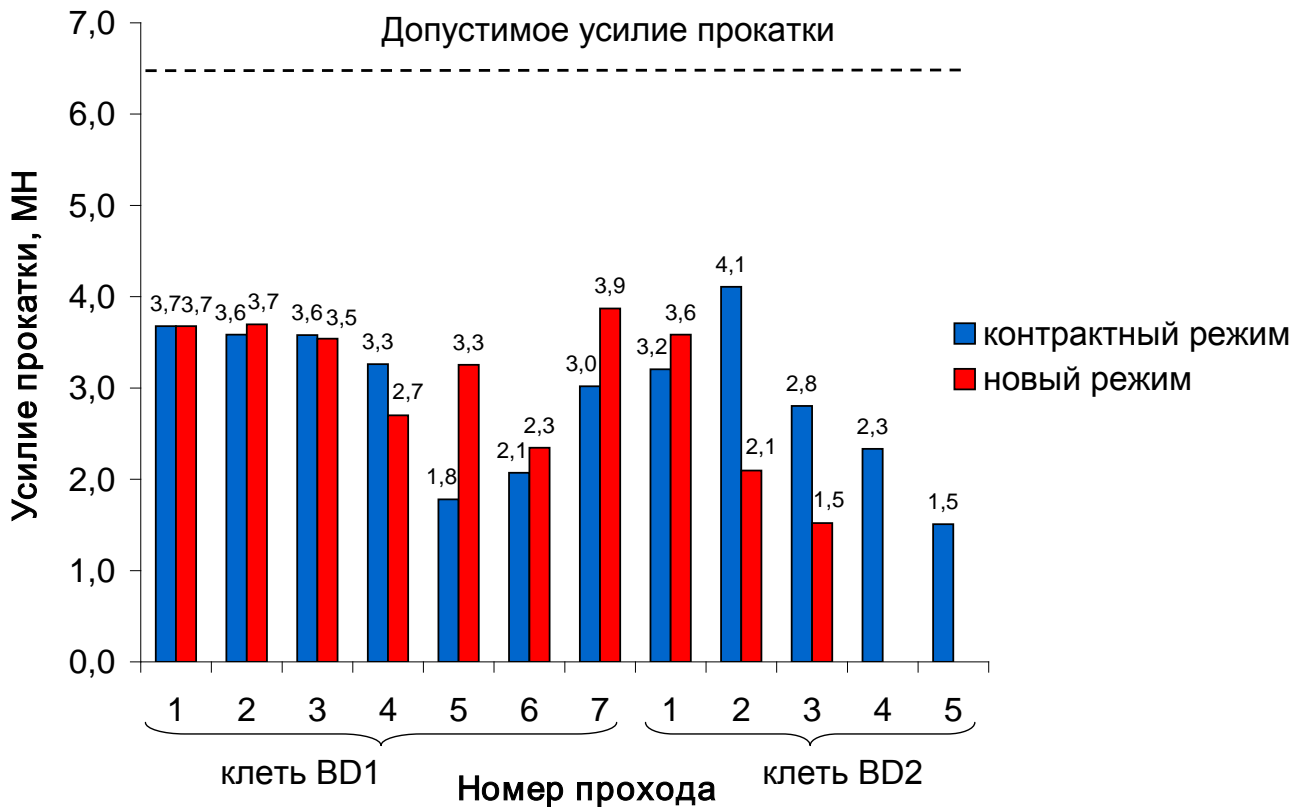


Рисунок 7 – Сравнительный анализ расчетных значений усилия прокатки при использовании различных режимов деформации в обжимных клетях рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

По полученным в ходе расчетов данным при использовании нового режима деформации усилие прокатки не превысит 61 % от допустимых значений.

С целью определения технологичности нового режима прокатки проведены опытно-промышленные исследования загруженности двигателей обжимных клетей. При проведении исследований использовали три режима прокатки:

1. Контрактный режим, включающий 7 пропусков в клетях BD1 и 5 пропусков в клетях BD2 (рисунок 6 а) – режим № 1;
2. Режим с перераспределением обжатий между клетями (9 пропусков в клетях BD1 и 3 пропуска в клетях BD2) – режим № 2;
3. Новый интенсифицированный режим, включающий 7 пропусков в клетях BD1 и 3 пропуска в клетях BD2 (рисунок 6 б) – режим № 3.

Исследования проводили методом осциллографирования параметров работы двигателей приводов клетей.

Обе обжимные клетки BD1 и BD2 оборудованы одинаковыми синхронными двигателями типа AMZ 0900LT08 LSB (таблица 1).

Для рассматриваемых двигателей существуют следующие ограничения по перегрузке от номинала в процессе работы:

- не более 115 % от номинала при непрерывной перегрузке;
- не более 225 % от номинала при перегрузке в течение 30 с;

- не более 250 % от номинала при перегрузке в течение 2 с.

Таблица 1 – Технические характеристики двигателей обжимных клеток BD1 и BD2 рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

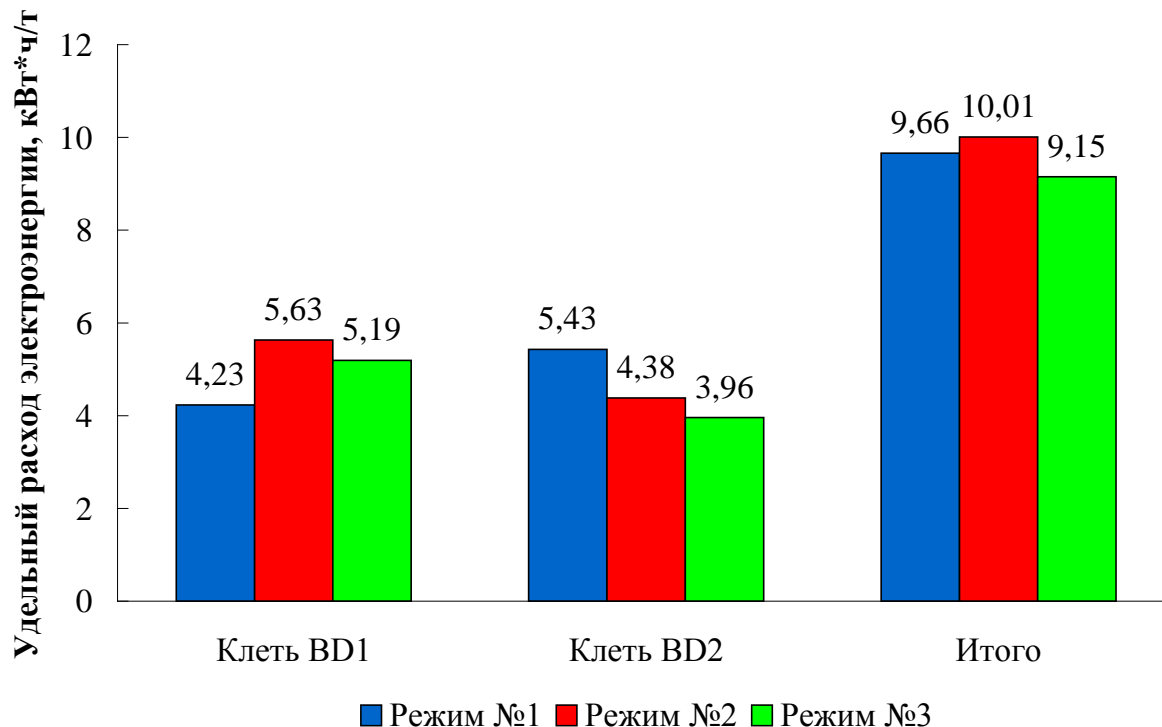
№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1	Номинальная скорость вращения	310 об/мин
2	Максимальная скорость вращения	982 об/мин
3	Номинальная сила тока	744 А
4	Номинальное напряжение статора	3165 В
5	Номинальная мощность	4000 кВт
6	Номинальный момент на валу двигателя - при номинальной скорости вращения - при максимальной скорости вращения	123 кН·м 39 кН·м

Результаты обработки полученных осциллограмм свидетельствуют, что при использовании всех трех использованных схем прокатки режимы работы двигателей обжимных клеток BD1 и BD2 не выходят за пределы допустимых (таблица 2).

Таблица 2 – Статические моменты двигателей обжимных клеток BD1 и BD2 рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Клеть	Номер прохода	Статические моменты на валу двигателя ($M_{ст}$) и скорости вращения (n) вала двигателя для различных схем прокатки					
		Режим №1		Режим №2		Режим №3	
		$M_{ст}$, % от ном.	n , об/мин	$M_{ст}$, % от ном.	n , об/мин	$M_{ст}$, % от ном.	n , об/мин
BD1	1	100	370	135	315	110	210
	2	82	370	110	368	100	370
	3	105	475	135	485	110	415
	4	77	463	95	465	80	476
	5	35	504	40	485	80	476
	6	30	463	40	465	55	420
	7	55	525	70	420	76	580
	8	-		55	355	-	-
	9	-		35	537	-	-
BD2	1	66	495	85	366	105	355
	2	20	455	70	344	68	315
	3	92	377	35	484	38	485
	4	70	344	-	-	-	-
	5	33	385	-	-	-	-

С целью сравнительной оценки энергоэффективности режимов прокатки определены удельные расходы электроэнергии на тонну проката. По полученным данным (рисунок 8) при использовании интенсифицированного режима деформации (режим №3) зафиксировано снижение удельного расхода электроэнергии на 0,51 кВт·ч/т по сравнению с контрактным режимом прокатки (режим №1).



режим № 1 – 7 пропусков в клети BD1 и 5 пропусков в клети BD2 (контрактный);
 режим № 2 – 9 пропусков в клети BD1 и 3 пропуска в клети BD2 (промежуточный);
 режим № 3 – 7 пропусков в клети BD1 и 3 пропуска в клети BD2 (интенсифицированный).
 Рисунок 8 – Удельный расход электроэнергии при использовании различных режимов прокатки рельсов Р65 в обжимных клетях

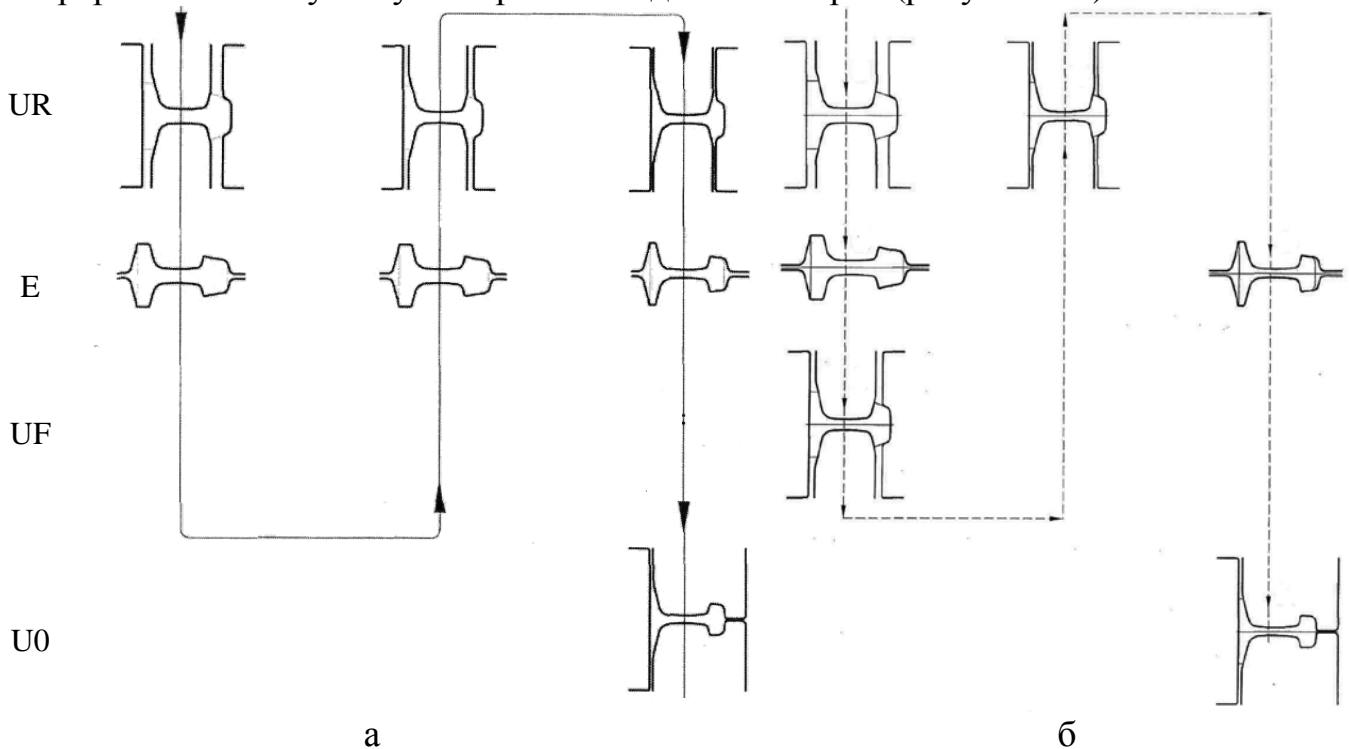
В ходе опытно-промышленного опробования интенсифицированного режима деформации в обжимных клетях также зафиксировано снижение отбраковки готовых рельсов по дефектам поверхности в виде плен прокатного происхождения на 0,5 %, снижение удельного расхода прокатных валков клети BD2 на 0,51 кг/т, уменьшение такта прокатки на обжимных клетях на 10 сек., увеличение межремонтного объема проката с 3,5 до 6,0 тыс. т. Экономическая эффективность от использования разработанного режима прокатки рельсов составила 98,588 млн. руб/год.

На основании полученных положительных результатов, режим прокатки с уменьшенным количеством проходов в обжимных клетях принят в качестве основного для производства длиномерных железнодорожных рельсов на рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

В качестве следующего направления для совершенствования режимов прокатки железнодорожных рельсов выбрано повышение точности геометрических размеров профиля, что актуально применительно к осваиваемым в настоящее время

железнодорожным рельсам для высокоскоростных магистралей и рельсов, производимых по европейским стандартам.

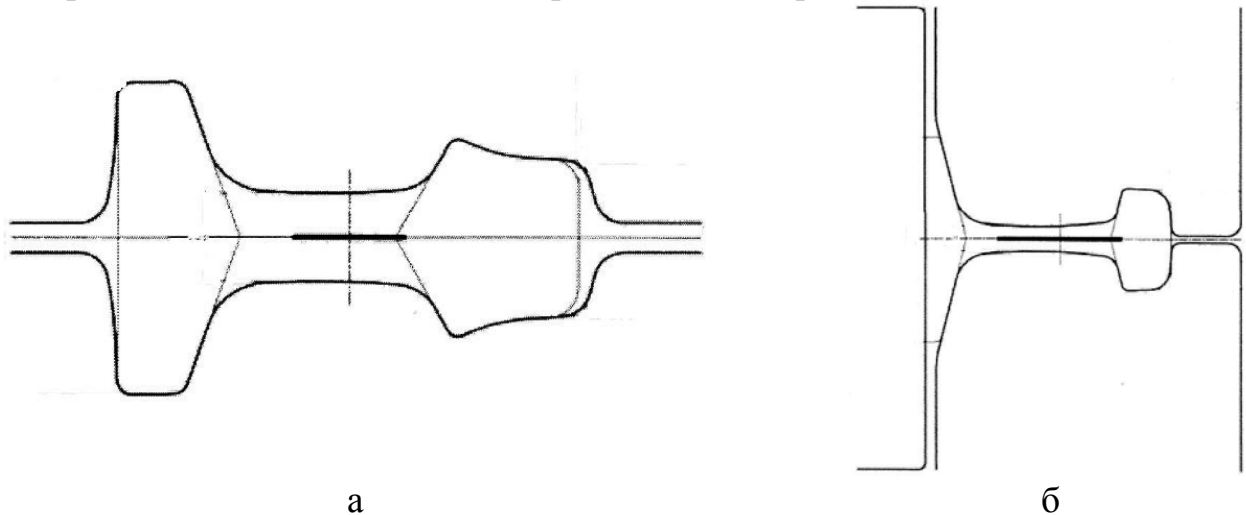
Использование отдельно расположенной чистовой универсальной клетки позволяет повысить точность геометрических размеров рельсов, что было учтено при проектировании универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Однако, при этом представленный фирмой «SMS Meer» контрактный вариант калибровки с использованием отдельно расположенной чистовой универсальной клетки (рисунок 9 а) обладал существенным недостатком – согласно указанной калибровке получение предчистового профиля происходит в процессе непрерывной прокатки в двух клетях (UR и E). В этом случае геометрические размеры профиля по длине раската перед задачей в чистой калибр могут быть нестабильными, что отрицательным образом сказывается на качестве готовых рельсов. Для устранения вышеуказанного недостатка разработана калибровка валков, в которой режим непрерывности отсутствует в трех последних калибрах (рисунок 9 б).



а – контрактная калибровка фирмы «SMS Meer»; б – новый режим прокатки
Рисунок 9 – Схемы прокатки железнодорожных рельсов Р65 в группе клеток тандем универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

В настоящее время на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» проблема недостаточно высокого качества внутренней структуры исходных непрерывнолитых заготовок для производства рельсов практически решена, что обусловлено внедрением электромагнитного перемешивания расплава и технологии «мягкого обжатия» при разливке стали на МНЛЗ. Однако указанная проблема остается актуальной при использовании исходных заготовок сторонних поставщиков. Обобщение результатов лабораторных и промышленных исследований позволило установить, что при использовании стандартной схемы прокатки происходит смещение металла в сторону головки рельса, что обуславливает переход внутренних дефектов

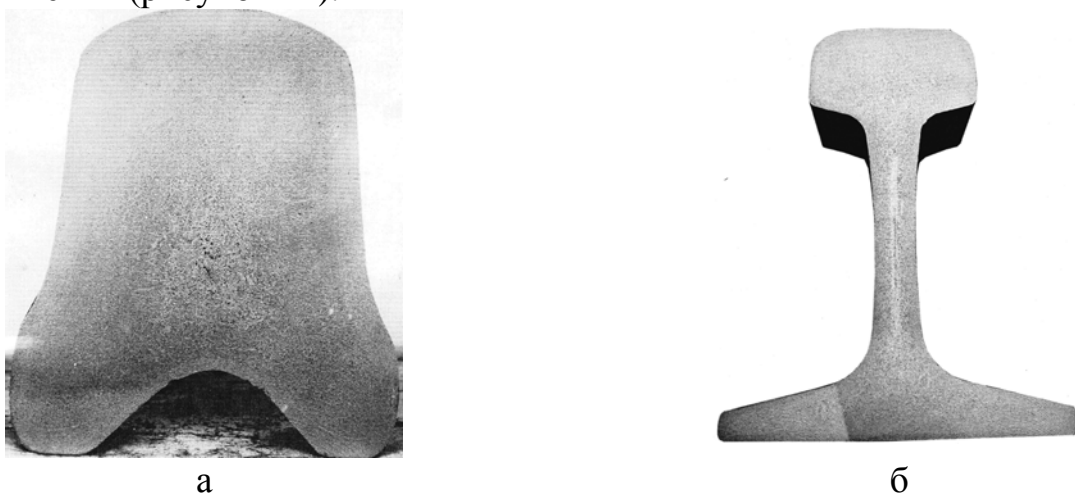
заготовок (осевой пористости и центральной ликвации) в данный элемент рельсового профиля. Данный факт обусловлен тем, что при формировании чернового профиля в обжимных двухвалковых клетях центральная часть заготовки располагается значительно ближе к внутренним поверхностям головки рельса по сравнению с внутренними поверхностями подошвы рельса (рисунок 10 а), а при дальнейшей прокатке в универсальных калибрах обжатие головки вертикальными валками превышает обжатие подошвы практически в 2 раза (рисунок 10 б).



а – подготовительный калибр; б – чистовой калибр

Рисунок 10 – Схема расположения осевых дефектов непрерывнолитых заготовок при использовании контрактного режима прокатки

Разработанный режим прокатки с разрезкой заготовки в трапецевидном калибре позволяет предотвратить смещение внутренних дефектов в головку рельса, что подтверждено данными опытно-промышленной прокатки заготовок со значительной осевой пористостью – после прокатки в разрезном калибре происходит перемещение внутренних дефектов в сторону формируемой подошвы рельса, в результате чего в готовом профиле осевая пористость не выходит за пределы шейки (рисунок 11).



а – разрезной калибр; б – чистовой калибр

Рисунок 11 – Макроструктура раската после деформации при использовании режима прокатки с разрезкой заготовки в трапецевидном калибре

В приложениях приведены: Акт использования результатов диссертационной работы на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» и Справка о внедрении в учебный процесс ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет» результатов диссертационной работы.

Заключение

1. На основании экспериментальных исследований, проведенных с использованием современного комплекса для физического моделирования «Gleeble System 3800», получены научно-обоснованные аналитические зависимости сопротивления хромистой рельсовой стали Э78ХСФ пластическому деформированию от термомеханических параметров деформации (температура, скорость и степень деформации).

2. Совокупность проведенных теоретических и экспериментальных исследований позволила установить значимое влияние изменения химического состава хромистой рельсовой стали Э78ХСФ на сопротивление деформации при прокатке. Получены регрессионные зависимости сопротивления деформации хромистой рельсовой стали от содержания основных примесных и легирующих элементов. Показано, что указанные зависимости могут быть использованы применительно к широкому номенклатурному ряду рельсовых марок стали.

3. Разработана статистическая модель и универсальная методика расчета сопротивления деформации рельсовых сталей при изменяющихся термомеханических параметрах деформации и нестабильном химическом составе, проверка адекватности которой в производственных условиях рельсобалочного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК» показала достаточную сходимость расчетных и фактических данных (погрешность не превышает 10 %).

4. На основании результатов теоретических исследований и экспериментальных исследований, проведенных в лабораторных и производственных условиях, разработаны новые схемы и режимы прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане, обеспечивающие экономию энергоресурсов и повышение качества рельсов:

- интенсифицированный режим прокатки с уменьшенным количеством проходов в обжимных клетях, обеспечивающий снижение удельного расхода электроэнергии на 0,51 кВт·ч/т, уменьшение отбраковки рельсов по поверхностным дефектам на 0,5 %, снижение удельного расхода прокатных валков клетки BD2 на 0,51 кг/т, уменьшение такта прокатки на обжимных клетях на 10 сек. и увеличение межремонтного объема проката с 3,5 до 6,0 тыс. т;

- схема прокатки железнодорожных рельсов с использованием отдельно расположенной чистовой универсальной клетки и отсутствием режима непрерывности при деформации в предчистовом и чистовом проходах, обеспечивающая повышение точности геометрических размеров готовых рельсов;

- режим прокатки с разрезкой заготовки в трапецевидном калибре, применение которого обеспечивает повышение качества макроструктуры рельсов при использовании исходных заготовок со значительной осевой пористостью.

5. Использование результатов диссертационного исследования при разработке и совершенствовании технологии производства длинномерных железнодорожных рельсов на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» позволило получить фактический экономический эффект 98,588 млн. руб./год, при доле участия автора 30% или 29,576 млн. руб.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Научные статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ:

1. Полевой, Е. В. Совершенствование технологии производства рельсов на ОАО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» / Е. В. Полевой, К. В. Волков, **А. В. Головатенко**, О. П. Атконова, А. М. Юнусов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2013. – №4. – С. 26-28.

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

3. **Головатенко, А. В.** Развитие технологии прокатки и процессов калибровки железнодорожных рельсов / **А. В. Головатенко**, К. В. Волков, В. В. Дорофеев, С. В. Степанов, А. В. Добрянский // Производство проката. – 2014. – №2. – С. 25-39.

Научные статьи, опубликованные в периодических изданиях и труды научно-практических конференций:

4. **Головатенко, А. В.** Исследование энергосиловых параметров прокатки в клетях универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК» с целью совершенствования режимов прокатки / **А. В. Головатенко**, В. Н. Кадыков, А. А. Уманский // Вестник горно-металлургической секции российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. – Москва-Новокузнецк, 2014. – Вып. 33. – С. 72-77.

5. **Головатенко, А. В.** Ввод в эксплуатацию универсального рельсобалочного стана и освоение технологии производства рельсов на современном оборудовании в рельсобалочном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК» / **А. В. Головатенко**, К. В. Волков, И. В. Александров, Е. П. Кузнецов, В. В. Дорофеев, О. И. Сапелкин // Черная металлургия. – 2014. – №6 (1374). – С. 32-38.

6. **Головатенко, А. В.** Исследование сопротивления деформации рельсовой стали Э78ХСФ при различных условиях прокатки / **А. В. Головатенко**, В. Н. Кадыков, А. А. Уманский // Вестник горно-металлургической секции российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. – Москва-Новокузнецк, 2014. – Вып. 33. – С. 64-71.

7. Симачёв, А. С. Исследование высокотемпературной пластичности рельсовой стали марки Э76ХФ / М. В. Темлянцев, К. В. Волков, Е. В. Полевой, **А. В. Головатенко** // Вестник горно-металлургической секции российской академии

естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. – Москва-Новокузнецк, 2014. – Вып. 33. – С. 78-82.

8. **Головатенко, А. В.** Разработка модели расчета сопротивления деформации рельсовой стали Э78ХСФ при различных температурно-скоростных параметрах деформации / **А. В. Головатенко**, А. А. Уманский, В. Н. Кадыков // Металлургия: Технологии, управление, инновации, качество. Труды XVIII Всероссийской научно-практической конференции. – Новокузнецк, 2014. – С. 160-165.

9. Уманский, А. А. Анализ и разработка универсальной математической модели расчета сопротивления деформации рельсовой стали Э78ХСФ при прокатке / А. А. Уманский, **А. В. Головатенко**, В. Н. Кадыков // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. Сборник научных трудов по материалам IV Международной научно-практической конференции. – Белгород, 2014. – Ч. I. – С. 182-187.

10. **Головатенко, А. В.** Технические и технологические особенности освоения прокатки рельсовых профилей на новом рельсобалочном стане ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» / **А. В. Головатенко** [и др.] // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений (по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» 25-27 октября 2013 г.): Сборник научных докладов – Екатеринбург: ОАО «УИМ», 2014. – С. 75-92.

11. Полевой, Е. В. Разработка технологии производства дифференцированно термоупрочненных рельсов на ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» / Е. В. Полевой, К. В. Волков, Е. П. Кузнецов, **А. В. Головатенко**, О. П. Атконова, А. М. Юнусов // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений (по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» 25-27 октября 2013 г.): Сборник научных докладов – Екатеринбург: ОАО «УИМ», 2014. – С. 93-100.

12. **Головатенко, А. В.** Разработка и совершенствование режимов прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане / **А. В. Головатенко**, А. А. Уманский, В. Н. Кадыков // Вестник горно-металлургической секции российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. – Москва-Новокузнецк, 2015. – Вып. 35. – С. 43-51.

13. Уманский, А. А. Исследование влияния химического состава рельсовой стали на сопротивление деформации при прокатке / А. А. Уманский, **А. В. Головатенко**, В. Н. Кадыков // Вестник горно-металлургической секции российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. – Москва-Новокузнецк, 2015. – Вып. 35. – С. 52-59.

14. Уманский, А. А. Исследование влияния химического состава и термомеханических условий прокатки рельсовой стали Э78ХСФ на сопротивление деформации / А. А. Уманский, **А. В. Головатенко**, В. Н. Кадыков // Актуальные проблемы современного машиностроения: сборник трудов Международной научно-практической конференции / Юргинский технологический институт. – Томск: Издво Томского политехнического университета, 2015. – С. 347-352.

15. Уманский, А. А. Разработка методики прогнозирования сопротивления деформации рельсовой стали при изменяющихся условиях прокатки / А. А. Уманский,

А. В. Головатенко, В. Н. Кадыков // Инновации в материаловедении и металлургии. Материалы IV Международной интерактивной научно-практической конференции. – Екатеринбург, 2015. – С. 199-202.

16. **Головатенко, А. В.** Совершенствование режимов прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК» / **А. В. Головатенко, А. А. Уманский, В. Н. Кадыков** // Металлургия: Технологии, инновации, качество. Труды XIX Международной научно-практической конференции. – Новокузнецк, 2015. – Ч. 2. – С. 70-75.

17. Уманский, А. А. Разработка математической модели и методики расчета сопротивления деформации рельсовых сталей различного химического состава / А. А. Уманский, **А. В. Головатенко, В. Н. Кадыков, Л. В. Думова** // Металлургия: Технологии, инновации, качество. Труды XIX Международной научно-практической конференции. – Новокузнецк, 2015. – Ч. 2. – С. 110-115.

18. **Головатенко, А. В.** Повышение качества железнодорожных рельсов при прокатке за счет усовершенствования системы черновых калибров в условиях нового универсального рельсoproкатного стана ЕВРАЗ ЗСМК / **А. В. Головатенко** [и др.] // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений (по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» 7-9 октября 2014 г.): Сборник научных докладов – Екатеринбург: ОАО «УИМ», 2015. – С. 201-210.

19. **Головатенко, А. В.** Основные тенденции развития рельсoproкатного производства в России и за рубежом / **А. В. Головатенко, А. А. Уманский, В. В. Дорофеев** // Металлургия: Технологии, инновации, качество. Труды XIX Международной научно-практической конференции. – Новокузнецк, 2015. – Ч.1. – С. 10-16.