

На правах рукописи



Уманский Александр Александрович

**Развитие теоретических и технологических основ
эффективного производства проката из рельсовых сталей
на основе комплексного параметра оптимизации**

Специальность: 2.6.4 – Обработка металлов давлением

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Научный консультант

доктор технических наук, доцент

Юрьев Алексей Борисович

Новокузнецк, 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»

Научный консультант: доктор технических наук, доцент
Юрьев Алексей Борисович

Официальные оппоненты: Шур Евгений Авелевич
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник Научного центра
«Рельсы, сварка, транспортное материаловедение»
АО «Научно-исследовательский институт
железнодорожного транспорта», г. Москва

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

Сидельников Сергей Борисович
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры обработки металлов давлением
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный
университет», г. Красноярск

Ведущая организация: АО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург

Защита состоится «15» марта 2022 г. в 14-00 в ауд. 3П на заседании диссертационного совета Д 24.2.401.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» по адресу 654007, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный р-н, ул. Кирова, зд. 42, СибГИУ.

факс: (3843) 46-57-92; e-mail: ds21225201@sibsiu.ru

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

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 24.2.401.01,
д.т.н., доцент



Рыбенко Инна Анатольевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Железнодорожный транспорт традиционно является основным в структуре отечественного грузооборота. Доля перевозок данным видом транспорта составляет порядка 85-90 % от общего грузооборота, а по протяженности железнодорожных путей Россия занимает второе место в мире, уступая только США. Поэтому обеспечение стабильной и бесперебойной работы железных дорог является чрезвычайно значимым фактором, определяющим эффективность функционирования различных отраслей промышленности России.

Несмотря на значительные успехи, достигнутые отечественной металлургией в производстве рельсовой продукции (увеличение эксплуатационной стойкости рельсов в пути до 1,0-1,5 млрд. т/брутто, освоение производства длинномерных рельсов для высокоскоростных магистралей), явившиеся следствием проведенной коренной модернизации рельсового производства (строительство новых универсальных рельсобалочных станов в АО «ЕВРАЗ ЗСМК» и ПАО «Мечел» с соответствующей реконструкцией сталеплавильных производств предприятий), по-прежнему имеет достаточное развитие проблема преждевременного и аварийного выхода из строя рельсов в пути.

Наличие указанной проблемы, обусловленной значительным повышением грузонапряженности железнодорожных путей (в период с 2010 г. по 2018 г. увеличение в целом по России составило 24 %, в том числе в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке – 34 %), свидетельствует о необходимости дальнейшего повышения качественных и эксплуатационных характеристик железнодорожных рельсов. Также в пользу актуальности развития направления по повышению качества железнодорожных рельсов свидетельствует высокий уровень отбраковки рельсовой продукции на производящих ее предприятиях (до 5-8 % от объема производства рельсов), причинами которой является наличие недопустимых внутренних и поверхностных дефектов.

Опыт значительного количества отечественных и зарубежных исследований свидетельствует, что применение оптимальных режимов прокатки позволяет значительно повысить качество готового проката вне зависимости от его профилированных размеров, как за счет снижения вероятности образования дефектов непосредственно в процессе горячей деформации, так и за счет создания благоприятных условий для выкатываемости дефектов исходных заготовок. При этом применительно к технологии производства рельсов в условиях современных универсальных рельсобалочных станов исследования отечественных авторов по указанной тематике практически отсутствуют, что обусловлено их незначительным временем эксплуатации (первый универсальный рельсобалочный стан в России введен в эксплуатацию в 2013 г.), а опубликованные материалы зарубежных исследователей носят обзорный характер.

Помимо проблемы повышения качества рельсовой продукции, актуальной, с точки зрения обеспечения конкурентоспособности рельсов, является задача по разработке энерго- и материалосберегающих технологий их производства. Имевшее место в последние годы увеличение прочностных характеристик рельсовых сталей за счет изменения их химического состава (переход на массовое производство рельсов из сталей, дополнительно легированных хромом и азавтектоидных сталей) закономерно обуславливает повышение нагрузки на оборудование рельсобалочных станков, а, следовательно, и повышение расхода электроэнергии на прокат, увеличение износа калибров и снижение эксплуатационного ресурса прокатных валков.

Следует отметить, что в отличие от прокатных станков, производящих стандартные виды готовой продукции, для универсальных рельсобалочных станков, предназначенных для производства не имеющих аналогов дифференцированно-термоупрочненных длинномерных железнодорожных рельсов, проблема повышения производительности является актуальной.

Таким образом, на основании вышесказанного можно сделать вывод, что разработка энергоэффективных и материалосберегающих режимов производства рельсового проката, обеспечивающих одновременно повышение его качественных показателей и производительности рельсобалочных станков, является в настоящее время актуальной научно-технической задачей. В свою очередь, разработка режимов прокатки рельсов, одновременно эффективных по вышеперечисленным частным критериям оптимизации, требует применения новых научных подходов, в том числе использования методики совершенствования режимов прокатки рельсовых профилей, основанной на применении комплексного параметра оптимизации.

Необходимо констатировать, что область применения рельсовых сталей в настоящее время не ограничивается собственно производством рельсов. Данный факт обусловлен значительным уровнем отбраковки непрерывнолитых заготовок рельсовых сталей на предприятиях-производителях рельсовой продукции (1-2 % от общего объема производства), не имеющих явно выраженных дефектов (причиной отбраковки являются более жесткие требования внутренней нормативной документации по отношению к требованиям ГОСТ). Рядом металлургических заводов освоено массовое производство мелющих шаров из отбракованных заготовок рельсовой стали. При этом, поскольку геометрические размеры непрерывнолитых заготовок рельсовой стали (значительная площадь поперечного сечения) не позволяют получать непосредственно из них шары на стане поперечно-винтовой прокатки, технологическая схема производства шаров в этом случае также включает в себя производство заготовок на сортовых станах. С учетом вышесказанного, а также принимая во внимание тот факт, что производство шаров из отбраковки рельсовых сталей сопровождается рядом технических и технологических проблем, обусловленных специфическими особенностями структуры и химического состава данных сталей, актуальным является распространение области применения методики совершенствования режимов производства

проката из рельсовых сталей на основе комплексного параметра оптимизации и на производство мелющих шаров (с учетом необходимой адаптации).

Степень разработанности темы исследования.

Вопросам развития теоретических и технологических основ производства рельсов посвящено значительное количество исследований, среди которых наиболее значительными по глубине проработки теоретических проблем и имеющими высокую практическую значимость являются работы, выполненные под научным руководством Ю.В. Грдины, Н.А. Челышева, А.А. Дерябина, Е.А. Шура, К.В. Григоровича, В.А. Шилова, С.С. Черняка, В.В. Дорофеева, Д.Л. Шварца.

При этом следует отметить, что значительная доля указанных исследований посвящена вопросам повышения качества, механических свойств и эксплуатационных характеристик рельсов, а тематика, связанная с энергоэффективностью и материаловосбережением при их производстве, повышением производительности рельсобалочных станков с учетом взаимосвязи с показателями качества рельсов, остается практически не затронутой. Кроме того, необходимо констатировать, что подавляющее большинство исследований, посвященных производству рельсовой стали и готовых рельсов, имеют ограниченную область применения в современных условиях, что связано со значительными изменениями технологии производства, произошедшими в последнее десятилетие.

Также можно констатировать, что практически не разрабатывается тематика, связанная с переработкой отбраковки заготовок рельсовых сталей в высокорентабельный нерельсовый прокат, в том числе в мелющие шары, имеющая значительную практическую значимость в связи с высоким уровнем указанной отбраковки. Недостаточно изученным является направление по повышению стойкости прокатных валков станков, специализирующихся на прокатке рельсовых сталей, методами восстановления с использованием новых экономичных наплавочных материалов.

Развитие научно-технического направления по повышению эффективности производства проката из рельсовых сталей позволит повысить качественные и эксплуатационные характеристики рельсов, увеличить их конкурентоспособность на рынках сбыта за счет улучшения технико-экономических показателей производства и, кроме того, обеспечить дополнительное производство высокорентабельных мелющих шаров с повышенными эксплуатационными свойствами из отбраковки заготовок рельсовых сталей.

Работа выполнена в рамках: базовой части Государственного задания Минобрнауки РФ, проект № 11.6365.2017/БЧ «Развитие теоретических основ процессов формирования качества рельсовой продукции для высокоскоростных железных дорог», 2017-2019 гг.; гранта РФФИ № 20-48-420011 «Теоретические основы энергоэффективного производства железнодорожных рельсов с повышенными эксплуатационными свойствами», 2020-2022 гг.

Цель: Разработка теоретической базы и технологических основ повышения эффективности производства проката из рельсовых сталей на основе комплексного параметра оптимизации.

Для достижения цели работы сформулированы следующие **основные задачи**:

1. Разработать концептуальные основы и алгоритм применения методики совершенствования режимов производства проката из рельсовых сталей на основе комплексного параметра оптимизации, учитывающего влияние параметров деформации на показатели качества готового проката и технико-экономические показатели его производства.

2. Провести экспериментальные исследования влияния параметров деформации, химического состава и структуры заготовок рельсовых сталей различных марок на их пластичность и сопротивление пластической деформации.

3. Провести исследования формирования напряженно-деформированного состояния металла при прокатке в калибрах различной формы, используемых на начальной стадии прокатки рельсов из сталей массового сортамента и при прокатке нерельсовых профилей, производимых из отбраковки заготовок рельсовых сталей.

4. Провести экспериментальные исследования процессов образования и трансформации дефектов при прокатке рельсов массового сортамента и нерельсовых профилей, получаемых из отбраковки заготовок рельсовых сталей.

5. Разработать и провести опытно-промышленное опробование эффективных режимов прокатки рельсовых профилей различного назначения, обеспечивающих повышение показателей их качества и технико-экономических показателей производства.

6. Разработать и провести опытно-промышленное опробование технических решений по повышению стойкости прокатных валков, используемых при прокатке рельсовых сталей.

7. Разработать и провести опытно-промышленное опробование режимов производства мелющих шаров из отбраковки заготовок рельсовых сталей, обеспечивающих повышенные качественные и эксплуатационные характеристики получаемых шаров.

Научная новизна:

1. Разработана методика совершенствования режимов производства проката из рельсовых сталей на основе комплексного параметра оптимизации, учитывающего влияние параметров деформации на показатели качества готового проката и технико-экономические показатели его производства.

2. Впервые установлены и теоретически обоснованы закономерности изменения сопротивления пластической деформации и пластичности рельсовых сталей марок К76Ф, Э76ХФ, Э76ХСФ и Э90ХАФ при варьировании их химического состава в рамках фактического и допустимого интервалов изменения содержания основных химических элементов.

3. Получены новые данные о механизмах влияния термомеханических параметров деформации на сопротивление пластической деформации

рельсовых сталей в условиях, характерных для горячей прокатки, в том числе доказано протекание динамической рекристаллизации, обуславливающей наличие выраженных максимумов на кривой течения стали марки К76Ф.

4. Впервые определены и обоснованы закономерности изменения сопротивления пластической деформации по сечению (зонам кристаллизации) непрерывнолитых заготовок рельсовых сталей на примере стали марки К76Ф.

5. Получены новые научно-обоснованные данные о формировании напряженно-деформированного состояния металла и механизмах трансформации дефектов на начальной стадии прокатки железнодорожных рельсов.

6. Впервые определены закономерности образования и выкатываемости дефектов при производстве сортовых заготовок и мелющих шаров из отбраковки непрерывнолитых заготовок рельсовых сталей.

Практическая значимость работы:

1. Получены аналитические зависимости сопротивления пластической деформации и критерия пластичности от термомеханических параметров деформации и химического состава рельсовых сталей различных марок, что дает возможность их практического применения при совершенствовании режимов прокатки указанных сталей.

2. Определены и обобщены в виде аналитических зависимостей закономерности влияния параметров деформации на вероятность образования и выкатываемости дефектов в процессе прокатки рельсов и сортовых заготовок из рельсовых сталей, являющиеся эффективным инструментом прогнозирования изменения параметров качества указанных видов проката при изменении режимов их производства.

3. Разработаны, прошли опытно-промышленное опробование и внедрены в условиях универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК» энергоэффективные, материалосберегающие режимы производства рельсовой продукции, обеспечивающие повышение качественных показателей готовых рельсов и увеличение производительности прокатного стана, в том числе режим прокатки железнодорожных рельсов (экономическая эффективность, подтвержденная Актом внедрения, составила 121,051 млн. руб/год при доле участия автора диссертационной работы 20 % или 24,210 млн. руб) и режим прокатки остряковых рельсов (ожидаемый экономический эффект от внедрения 29,7 млн. руб/год).

4. Разработан технологический режим производства мелющих шаров из отбраковки заготовок рельсовых сталей, опытно-промышленное опробование которого в условиях действующего шаропрокатного стана ОАО «ГМЗ» показало улучшение качества микроструктуры производимых помольных шаров, позволило повысить их эксплуатационные характеристики, в том числе ударную стойкость. Ожидаемая экономическая эффективность, подтвержденная Актом использования результатов исследования, составляет 22,5 млн. руб/год.

5. Для восстановления прокатных валков сортовых станков, специализирующихся на производстве заготовок из отбраковки рельсовых

сталей, разработана, получила патентную защиту и прошла опытно-промышленное опробование в условиях сортопрокатного производства ОАО «ГМЗ» новая наплавочная проволока на основе техногенных отходов. Эффективность разработанной порошковой проволоки подтверждена Справкой об опытно-промышленной наплавке прокатных валков: зафиксировано увеличение срока службы прокатных валков на 17-21 % и снижение стоимости процесса наплавки на 160-870 руб. на 1 кг наплавленного слоя.

6. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» и используются при подготовке научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлению 22.06.01 «Технологии материалов», направленность «Обработка металлов давлением».

Методология и методы исследования.

Для проведения экспериментальных исследований сопротивления пластической деформации рельсовых сталей использована установка «Gleeble System 3800» и специализированная лабораторная установка для горячего кручения образцов; исследования горячей пластичности рельсовых сталей проведены с использованием указанной специализированной лабораторной установки. В качестве объекта исследований использованы образцы рельсовых сталей различных марок, отобранные от непрерывнолитых заготовок текущего производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» и ПАО «Мечел». При проведении экспериментальных исследований трансформации поверхностных дефектов в процессе прокатки рельсов и нерельсовых профилей использован лабораторный прокатный стан «Дуо-80» со сменными комплектами валков. Для обработки результатов экспериментальных исследований применялась программа «MATLAB», использующая современные методы математической статистики. Математическое моделирование процессов деформации металла в калибрах различной формы проведено с использованием специализированного инженерного программного комплекса DEFORM-2D, основанного на методе конечных элементов. Исследования качества микроструктуры рельсов и мелющих шаров из рельсовых сталей, в том числе характерных дефектов и неметаллических включений, проведены с использованием методов оптической микроскопии (микроскоп «OLIMPUS – GX 51»), методики Spark-DAT (спектрометр «ARL iSpark») и рентгенофазового анализа (рентгеновский дифрактометр «Shimadzu XRD-6000»); исследования химического состава рельсов и мелющих шаров проведены методами спектрального анализа (рентгенофлуоресцентный волнодисперсионный спектрометр «Shimadzu XRF-1800» и атомно-эмиссионный спектрометр ДФС-71). Натурные эксперименты по опытно-промышленному опробованию новых режимов прокатки рельсов проведены в условиях универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК», эксперименты по опробованию режимов прокатки мелющих шаров из отбраковки заготовок рельсовой стали и наплавке прокатных валков с использованием разработанного нового материала – в условиях шаропрокатного и сортопрокатного станов АО «Гурьевский металлургический завод».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Новая методика совершенствования режимов производства проката из рельсовых сталей, отличительной особенностью которой является использование комплексного параметра оптимизации по критериям энергоэффективности, качества готового проката, материаловосбережения и производительности прокатных станов.

2. Научно-обоснованные и обобщенные в виде аналитических зависимостей результаты исследований комплексного влияния термомеханических параметров деформации, химического состава и микроструктуры заготовок рельсовых сталей различных марок на их пластичность и сопротивление деформации, являющиеся теоретической базой разработанной методики совершенствования режимов прокатки указанных сталей.

3. Закономерности формирования напряженно-деформированного состояния металла и трансформации поверхностных дефектов рельсов из сталей массового сортамента, сортовых заготовок и мелющих шаров из отбраковки рельсовых сталей, обобщение которых в виде аналитических зависимостей создает возможность их применения при совершенствовании режимов прокатки указанных профилей.

4. Новые, разработанные с использованием методики совершенствования режимов производства проката из рельсовых сталей, эффективные режимы прокатки железнодорожных и остряковых рельсов, обеспечивающие повышение качественных показателей указанной рельсовой продукции и снижение затрат на ее производство.

5. Новый, разработанный в рамках сформированной концепции совершенствования режимов производства проката из рельсовых сталей, эффективный материал для восстановления валков станов, используемых для производства сортовых заготовок из отбраковки рельсовых сталей.

5. Усовершенствованный технологический режим прокатки мелющих шаров из отбраковки заготовок рельсовых сталей, обеспечивающий повышенную твердость и ударную стойкость получаемых шаров, при разработке которого использована методика совершенствования режимов производства проката из рельсовых сталей.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует паспорту научной специальности 2.6.4 – «Обработка металлов давлением» по следующим пунктам:

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

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

- п. 3 «Исследование структуры, механических, физических, магнитных, электрических и других свойств металлов, сплавов и композитов в процессах пластической деформации»;

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

Личный вклад автора заключается в формировании плана и алгоритма проведения экспериментальных лабораторных исследований сопротивления пластической деформации и пластичности рельсовых сталей, математического моделирования процессов деформации металла при прокатке в калибрах различной формы, используемых для производства рельсов и нерельсовых видов проката; непосредственном проведении указанных экспериментальных и теоретических исследований; обобщении и научном обосновании полученных результатов, формулировании выводов; разработке и опытно-промышленном опробовании новых технологических и технических решений, полученных на основании результатов исследований, в том числе новых режимов прокатки железнодорожных и остряковых рельсов из сталей массового сортамента и мелющих шаров из отбраковки рельсовых сталей, нового материала для восстановления прокатных валков станков, специализирующихся на прокатке рельсовых сталей.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается значительным объемом и сопоставимостью результатов, полученных при совместном использовании современного исследовательского специализированного оборудования, в том числе установки «Gleeble System 3800» и лабораторной установки для горячего кручения образцов, программного комплекса «DEFORM-2D» для математического моделирования процессов обработки металлов давлением и промышленных экспериментов в условиях действующих рельсобалочного, сортопрокатного и шаропрокатного станков; сопоставимостью полученных данных с результатами других исследователей по рассматриваемой тематике; подтвержденной эффективностью разработанных технологических решений по результатам опытно-промышленного опробования и внедрения в условиях действующего металлургического производства.

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: XIX, XX и XXI Международные научно-технические конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» (г. Новокузнецк, 2015, 2017 и 2019 гг.), III Международная научно-практическая конференция «Magnitogorsk Rolling Practice 2018» (г. Магнитогорск, 2018), VII Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в машиностроении» (г. Юрга, 2016), 15-я Международная Научно-техническая конференция «Новые перспективные материалы, оборудование и технологии для их получения» (г. Москва, 2015), IV Международная научно-практическая конференция «Инновации в материаловедении и металлургии»

(Екатеринбург, 2014), Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы современного машиностроения» (г. Юрга, 2014), Международная научно-техническая конференция «Научное наследие роли И.П. Бардина в развитии отечественной металлургии» (г. Москва, 2013).

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 68 печатных работ, в том числе 1 монография, 19 статей в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ, 7 статей, индексируемых в международной базе данных SCOPUS, 41 статья в журналах и сборниках трудов, получен патент на изобретение и свидетельство о государственной регистрации базы данных.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, приложений и изложена на 295 страницах машинописного текста, содержит 79 рисунков, 53 таблицы, список литературы из 272 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлены результаты анализа современного состояния научно-технической проблемы повышения эффективности производства проката. Проведенный анализ, систематизация и обобщение опубликованных материалов отечественных и зарубежных исследователей позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Несмотря на значительное количество исследовательских работ, посвященных совершенствованию режимов прокатки различных профилей, в настоящее время отсутствует единая, обладающая универсальностью и пригодная к практическому применению на действующих прокатных станах научно-обоснованная концепция разработки оптимальных режимов прокатки. Существующие методики совершенствования режимов прокатки обладают значительными недостатками, не позволяющими рассматривать их в качестве научного задела для разработки эффективных режимов производства профилей из рельсовых сталей. К указанным недостаткам относятся: узкая специализация применительно к определенному марочному и профильному сортаменту получаемого проката, отсутствие комплексного подхода к выбору параметра оптимизации.

2. Необходимой теоретической базой для разработки методики совершенствования режимов производства проката из рельсовых сталей является наличие научно-обоснованных данных о количественной взаимосвязи показателей качества готового проката и технико-экономических показателей его производства с измеряемыми термомеханическими параметрами прокатки, химическим составом и структурой прокатываемой стали. При этом получение указанных данных требует проведения комплекса экспериментальных лабораторных и теоретических исследований, поскольку использование имеющихся данных других исследователей по рассматриваемой тематике в значительной степени ограничено в связи с существенными изменениями технологии производства, состава и структуры рельсовых сталей, произошедшими в последнее десятилетие.

3. В настоящее время значимый практический интерес представляет собой направление по переработке отбраковки непрерывнолитых заготовок рельсовых сталей в мелющие шары с повышенными эксплуатационными характеристиками, что обусловлено отсутствием выраженных дефектов на таких заготовках (отбракованных в связи с ужесточением требованием внутренней нормативной документации предприятий-производителей рельсов), значительной величиной указанной отбраковки и высокой рентабельностью производства мелющих шаров повышенной твердости и ударной стойкости. При этом сдерживающим фактором для развития данного направления является имевшее место в последнее десятилетие изменение химического состава и структуры рельсовых сталей.

4. Одним из наиболее потенциально эффективных направлений в рамках разработки материалосберегающих режимов производства проката является создание новых экономичных материалов для восстановления прокатных валков наплавкой. Данный факт обусловлен, во-первых, наличием значительного резерва по уменьшению затрат на производство проката при снижении расхода прокатных валков за счет повышения их стойкости и снижения затрат на ремонт, и, во-вторых, исчерпанием ресурса методик восстановления прокатных валков с использованием традиционных наплавочных материалов.

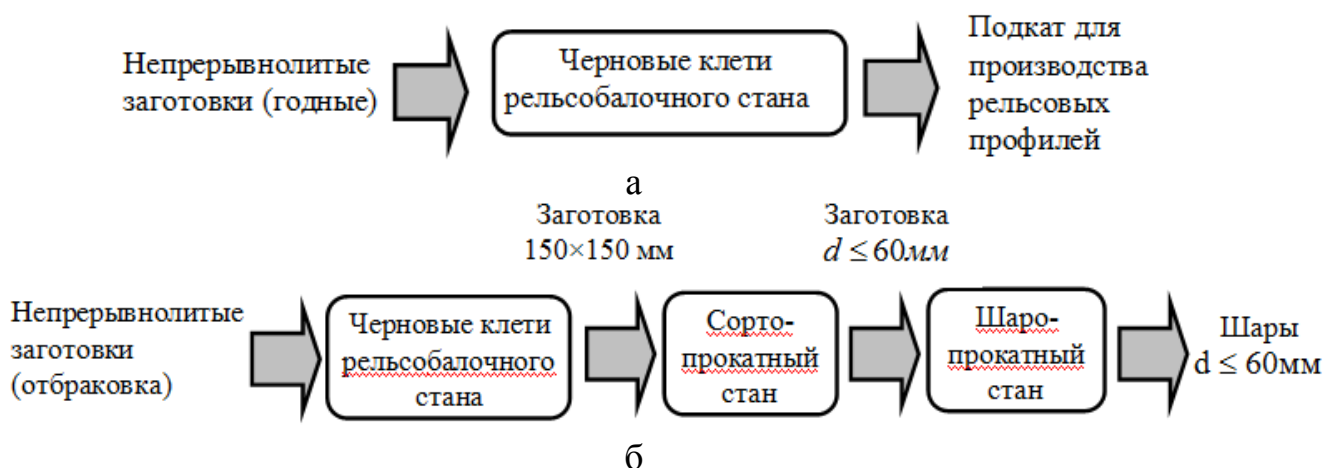
На основании проведенного анализа сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе разработаны концептуальные основы и алгоритм применения на практике методики совершенствования режимов производства проката из рельсовых сталей на основе комплексного параметра оптимизации.

В качестве объектов применения методики выступают (рисунок 1): технология прокатки рельсовых профилей в черновых клетях универсальных рельсобалочных станов; технология прокатки сортовых заготовок и мелющих шаров из отбраковки непрерывнолитых заготовок рельсовых сталей. Выбор указанных объектов применения методики обусловлен следующим:

1. Схема прокатки рельсов на современных универсальных рельсобалочных станах включает в себя прокатку в реверсивных черновых клетях, где происходят основные обжатия и прокатку в группе универсальных клетей, основной задачей которых является формирование профиля рельсов. В соответствии с этим наибольшее влияние на эффективность режима прокатки оказывают параметры деформации именно в черновых клетях.

2. В настоящее время на предприятиях, являющихся основными производителями рельсов, имеет место значительная отбраковка непрерывнолитых заготовок из-за несоответствия их химического состава и макроструктуры требованиям внутренней нормативной документации. Рядом металлургических предприятий освоено массовое производство мелющих шаров из указанной отбраковки; при этом, поскольку геометрические размеры непрерывнолитых заготовок не позволяют производить непосредственно из них шары на станах поперечно-винтовой прокатки, то технологическая схема включает в себя производство промежуточных сортовых заготовок.



а – прокатка рельсов в черновых клетях универсального рельсобалочного стана;
 б – производство мелющих шаров из отбраковки непрерывнолитых заготовок рельсовых сталей

Рисунок 1 – Объекты применения методики совершенствования режимов прокатки рельсовых сталей

В разработанной методике в качестве комплексного параметра оптимизации выступает обобщенная функции желательности Харрингтона, учитывающая совокупное влияние таких частных критериев оптимизации, как энергоэффективность, качество готового проката, материаловсбережение и производительность:

$$D = d_{\text{э}}^{m_{\text{э}}} \cdot d_{\text{к}}^{m_{\text{к}}} \cdot d_{\text{м}}^{m_{\text{м}}} \cdot d_{\text{п}}^{m_{\text{п}}}, \quad (1)$$

где $d_{\text{э}}$, $d_{\text{к}}$, $d_{\text{м}}$, $d_{\text{п}}$ – частные показатели желательности по энергоэффективности, качеству проката, материаловсбережению и производительности соответственно; $m_{\text{э}}$, $m_{\text{к}}$, $m_{\text{м}}$, $m_{\text{п}}$ – коэффициенты весомости частных показателей желательности ($m_{\text{э}} + m_{\text{к}} + m_{\text{м}} + m_{\text{п}} = 1$).

Значения коэффициентов весомости определяются исходя из сравнительного анализа резервов по снижению затрат или потерь в стоимостном выражении.

Частные показатели желательности экспоненциально зависят от безразмерных величин, которые в свою очередь имеют взаимосвязь с натуральными показателями:

$$d_i = \exp(-\exp(-y_i)) = \frac{1}{e^{1/e^{y_i}}}, \quad (2)$$

$$y_i = a_0 + a_1 \cdot x_i \quad (3)$$

где y_i – безразмерная величина, x_i – натуральные показатели.

Разработанная методика направлена на совершенствование режимов производства проката из рельсовых сталей, поэтому предполагает наличие базовых режимов прокатки для каждого вида рассматриваемой прокатной продукции (рисунок 1). В качестве таких режимов выступают режимы прокатки, используемые на соответствующих прокатных станах (рельсобалочный, сортовой, шаропрокатный) на момент проведения исследований.

В качестве параметра, определяющего энергоэффективность режимов прокатки, использован удельный расход электроэнергии по клетям:

$$A_{\text{ЭЛ}} = \frac{A_{\text{Д}\Sigma}}{\eta_{\text{СТ}} \cdot \eta_{\text{ДВ}} \cdot m}, \quad (4)$$

где $A_{\text{Д}\Sigma}$ – суммарная работа деформации, кДж; $\eta_{\text{СТ}}$, $\eta_{\text{ДВ}}$ – к.п.д. стана и электродвигателя соответственно; m – масса заготовки, т.

$$A_{\text{Д}\Sigma} = (p_{\text{CP}})_{\text{CP}} \cdot V \cdot n \cdot (\ln 1/\eta)_{\text{CP}}, \quad (5)$$

где p_{CP} – контактное давление металла на валки, МПа; V – объем заготовки, м³; n – количество проходов; $1/\eta$ – коэффициент обжатия.

Анализ составляющих формул (4, 5) показывает, что наибольшую сложность представляет определение величины среднего контактного давления, поскольку данный параметр пропорционален сопротивлению пластической деформации (СПД) – характеристики, для определения достоверных значений которой применительно к новым маркам стали отсутствуют надежные аналитические методики:

$$p_{\text{CP}} = n_{\sigma} \cdot \sigma_s, \quad (6)$$

где n_{σ} – коэффициент напряженного состояния металла; σ_s – СПД, МПа.

Величина СПД одновременно зависит от термомеханических параметров прокатки (температура, скорость и степень деформации) и от химического состава и структуры деформируемой стали. В связи с этим предложен подход, согласно которому СПД при определенном сочетании термомеханических параметров деформации определяется не конкретным числом, а диапазоном значений, называемым интервалом равной вероятности (ИРВ) и представляющим собой разность между максимально и минимально возможными значениями СПД, получаемыми при наиболее условно «неблагоприятном» и «благоприятном» химическом составе стали.

Определение максимального и минимального значений СПД в рамках ИРВ проводится по следующему алгоритму. На первом этапе, на основании экспериментальных исследований получают уравнение регрессии, устанавливающее взаимосвязь между параметрами деформации и СПД для химического состава рассматриваемой стали, соответствующему среднему содержанию основных химических элементов в фактическом интервале их варьирования:

$$\sigma_{s(\text{CP})} = f(t; u; \varepsilon), \quad (7)$$

где t – температура прокатки, °С; u – скорость деформации, с⁻¹; ε – степень деформации.

На следующем этапе для различных сочетаний термомеханических параметров деформации определяется относительное отклонение верхней и нижней границ ИРВ сопротивления деформации от значений, соответствующих «среднему» химическому составу стали:

$$\Delta_{B(i)} = \frac{\sigma_{s(B)i} - \sigma_{s(\text{CP})i}}{\sigma_{s(\text{CP})i}}; \quad \Delta_{H(i)} = \frac{\sigma_{s(\text{CP})i} - \sigma_{s(H)i}}{\sigma_{s(\text{CP})i}}, \quad (8)$$

где $\sigma_{s(B)_i}$ и $\sigma_{s(H)_i}$ и $\sigma_{s(cp)_i}$ – СПД, соответствующее верхней и нижней границам ИРВ и «среднему» химическому составу стали, МПа.

На третьем этапе рассчитываются максимально и минимально возможные значения сопротивления деформации при заданном сочетании термомеханических параметров:

$$\sigma_{s(max)} = \sigma_{s(cp)} \cdot (1 + \Delta_{B(cp)}); \quad \sigma_{s(min)} = \sigma_{s(cp)} \cdot (1 - \Delta_{H(cp)}) \quad (9)$$

где $\Delta_{B(cp)}$, $\Delta_{H(cp)}$ – средние арифметические значения относительных отклонений верхней и нижней границ ИРВ сопротивления деформации, МПа.

Следует отметить, что максимально возможное значение СПД является лимитирующим с точки зрения допустимой нагрузки на основное и вспомогательное оборудование прокатного стана, а минимальное значение и величина ИРВ характеризуют степень загрузки двигателей приводов прокатных клеток.

В разработанной методике параметром, характеризующим качество готового проката, является отбраковка готовой продукции из-за наличия недопустимых поверхностных и внутренних дефектов, либо при отсутствии контроля качества поверхности и структуры проката в потоке станов – отбраковка проката по результатам механических испытаний.

Указанная отбраковка представляет собой функцию вероятностей образования дефектов в процессе прокатки ($p_{обр}$) и выкатываемости дефектов, имеющих на исходных заготовках ($p_{вык}$):

$$БД = f(p_{обр}; p_{вык}) \quad (10)$$

При этом вероятность образования дефектов связана с влиянием параметров прокатного передела, а вероятность выкатываемости дефектов – с влиянием параметров сталеплавильного передела, поскольку она зависит от размеров дефектов на исходных заготовках.

Показателем, характеризующим вероятность образования дефектов при прокатке, является степень использования запаса пластичности (СИЗП):

$$\psi = \frac{\Lambda}{\Lambda_p} = \frac{\Lambda}{\int_0^{t_p} H \cdot d\tau}, \quad (11)$$

где Λ – накопленная степень деформации сдвига; Λ_p – предельная степень деформации сдвига до разрушения; H – интенсивность скоростей деформации сдвига; t_p – время разрушения.

Поскольку СИЗП распределяется неравномерно по сечению прокатываемого профиля в процессе деформации и с учетом того факта, что прокатка производится за несколько проходов для анализа используется максимальное среднее значение СИЗП по проходам:

$$\psi_{max(cp)} = \frac{\sum_{i=1}^n \psi_{max(i)}}{n}, \quad (12)$$

где $\psi_{max(i)}$ – максимальные значения СИЗП; n – количество проходов.

В качестве параметра, характеризующего вероятность выкатываемости дефектов, предложено использовать коэффициенты выкатываемости дефектов по глубине и ширине (для поверхностных дефектов) и сечению (для внутренних дефектов):

$$K_h = \frac{h_0}{h_1}; K_b = \frac{b_0}{b_1}; K_S = \frac{S_0}{S_1} \quad (13)$$

где h_0 и h_1 – глубина поверхностного дефекта до и после деформации, мм; b_0 и b_1 – ширина поверхностного дефекта до и после деформации, мм; S_0 и S_1 – площадь поперечного сечения внутреннего дефекта до и после деформации, мм².

С точки зрения влияния на отбраковку готового проката значимым является значение суммарных коэффициентов выкатываемости:

$$K_{h(\Sigma)} = \prod_{i=1}^n K_{h(i)}; K_{b(\Sigma)} = \prod_{i=1}^n K_{b(i)}; K_{S(\Sigma)} = \prod_{i=1}^n K_{S(i)} \quad (14)$$

где $K_{h(i)}$, $K_{b(i)}$, $K_{S(i)}$ – коэффициенты выкатываемости дефектов по проходам; n – количество проходов.

При этом прогнозные суммарные коэффициенты выкатываемости дефектов необходимо определять с учетом доли дефектов, отнесенных к группам в зависимости от их пространственной ориентации и расположения:

$$K_{h(\Sigma)\text{общ}} = \sum_{i=1}^n K_{h(\Sigma)i} \cdot D_i; K_{b(\Sigma)\text{общ}} = \sum_{i=1}^n K_{b(\Sigma)i} \cdot D_i; K_{S(\Sigma)\text{общ}} = \sum_{i=1}^n K_{S(\Sigma)i} \cdot D_i, \quad (15)$$

где D_i – доля дефектов определенной группы в общем их количестве.

Таким образом, уровень отбраковки готового металлопроката является функцией среднего максимального значения СИЗП и коэффициента суммарной выкатываемости дефектов по проходам:

$$B_{D\Pi} = f(\psi_{\max(\text{ср})}; K_{h(\Sigma)}; K_{b(\Sigma)}); B_{DВ} = f(\psi_{\max(\text{ср})}; K_{S(\Sigma)}) \quad (16)$$

где $B_{D\Pi}$, $B_{DВ}$ – отбраковка готового проката по дефектам поверхности и внутренним дефектам соответственно, %.

При расчете прогнозных значений отбраковки проката для нового режима прокатки учитывается изменение параметров с учетом доли их влияния:

$$B_{D\Pi(\text{ИЗМ})} = \frac{B_{D\Pi(\text{БАЗ})}}{\left(\frac{\psi_{\max(\text{ср})_{\text{БАЗ}}}{\psi_{\max(\text{ср})_{\text{ИЗМ}}} \cdot D_{\Pi} + \left(\frac{K_{h(\Sigma)_{\text{ИЗМ}}}{K_{h(\Sigma)_{\text{БАЗ}}} + \frac{K_{b(\Sigma)_{\text{ИЗМ}}}{K_{b(\Sigma)_{\text{БАЗ}}}} \right) / 2 \cdot D_C \right)}; \quad (17)$$

$$B_{DВ(\text{ИЗМ})} = \frac{B_{DВ(\text{БАЗ})}}{\left(\frac{\psi_{\max(\text{ср})_{\text{БАЗ}}}{\psi_{\max(\text{ср})_{\text{ИЗМ}}} \cdot D_{\Pi} + \frac{K_{S(\Sigma)_{\text{ИЗМ}}}{K_{S(\Sigma)_{\text{БАЗ}}}} \cdot D_C \right)}, \quad (18)$$

где $B_{D\Pi(\text{БАЗ})}$, $B_{DВ(\text{БАЗ})}$ – уровень отбраковки готового проката по дефектам поверхности и внутренним дефектам соответственно при использовании базового режима прокатки, %; $B_{D\Pi(\text{ИЗМ})}$, $B_{DВ(\text{ИЗМ})}$ – уровень отбраковки

готового проката по дефектам поверхности и внутренним дефектам соответственно при использовании нового режима прокатки, %; D_C , D_{Π} – доля влияния параметров сталеплавильного и прокатного передела на отбраковку готового проката.

В связи с тем фактом, что определение степени влияния технологических параметров прокатного передела на вероятность образования дефектов методами математической статистики является практически нереализуемым в силу крайне незначительного интервала их изменения в рамках одного режима прокатки целесообразным является определение доли влияния на отбраковку готового проката параметров сталеплавильного передела, а влияние параметров прокатного передела в этом случае составит оставшуюся долю:

$$D_{\Pi} = (1 - D_C) = (1 - k_{\text{COB}(C)}), \quad (19)$$

где $k_{\text{COB}(C)}$ – совокупный коэффициент детерминации влияния параметров сталеплавильного передела на отбраковку готового проката.

Следует отметить, что необходимым условием получения адекватных данных о доле влияния параметров различных переделов на отбраковку проката являются дополнительные металлографические исследования характерных дефектов.

Для приведения показателя, характеризующего калибровку валков, к измеряемому виду предложено использовать коэффициент подобия формы подката и калибра:

$$K_{\Pi\Phi} = \frac{S_0 / \Pi_0}{S_1 / \Pi_1}, \quad (20)$$

где S_0 , S_1 – площади поперечного сечения раската до и после прокатки в калибре соответственно, мм^2 ; Π_0 , Π_1 – периметры поперечного сечения раската до и после прокатки в калибре соответственно, мм.

Наиболее благоприятная схема напряженного состояния металла формируется при $K_{\Pi\Phi} = 1$.

В соответствии с применяемым подходом аналитические зависимости максимальной СИЗП по сечению раскатов и коэффициентов выкатываемости дефектов от параметров прокатки получают на основании предварительных экспериментальных исследований для расширенного интервала изменения параметров прокатки:

$$\psi_{\max} = f(t, u, \lambda, K_{\Pi\Phi}); \quad (21)$$

$$K_{(h,b,S)} = f(\lambda, K_{\Pi\Phi}). \quad (22)$$

В качестве параметра, характеризующего материалосбережение, выбран удельный расход прокатных валков, который является функцией средних значений усилия прокатки по проходам, среднего коэффициента подобия формы подката и калибра прокатных валков, машинного времени прокатки:

$$A_B = f(P_{\text{CP}}[\sigma_s; t; u; \varepsilon]; K_{\Pi\Phi(\text{CP})}; T_{\text{ПР}}), \quad (23)$$

где P_{CP} – среднее усилие прокатки по проходам, МН; $T_{\text{ПР}}$ – машинное время прокатки, с.

Количественная взаимосвязь между характеристиками деформируемой стали, параметрами ее деформации и удельным расходом прокатных валков устанавливается на основании данных для различных клетей анализируемого стана, полученных применительно к базовому режиму прокатки. Полученные аналитические зависимости удельного расхода валков от параметров прокатки экстраполируются на вновь разрабатываемые режимы прокатки.

Для оценки влияния режимов прокатки на производительность стана применяется «тактовый подход». В рамках данного подхода производится расчет тактов работы отдельных независимых участков стана (нагрева, прокатки, порезки, термообработки) и затем из полученных тактов выбирается максимальный, выступающий в роли такта работы всего прокатного стана:

$$T_{\text{ст.}} = T_{\text{max}} \{T_1; T_2; \dots; T_n\}, \quad (24)$$

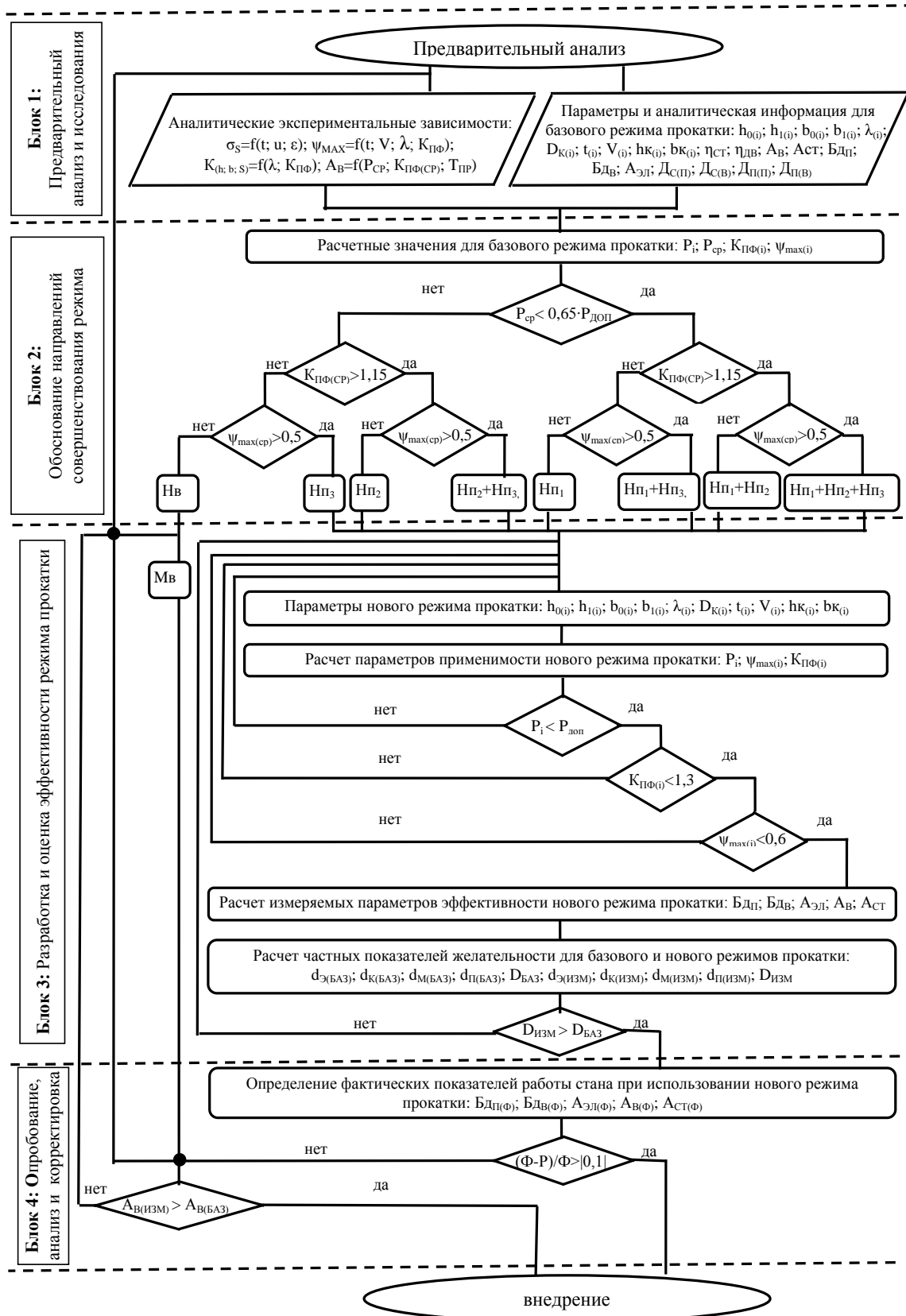
где $T_{\text{ст.}}$ – такт работы прокатного стана, с; T_1, T_2, T_n – такт работы участков прокатного стана, с.

Алгоритм применения методики включает четыре блока (рисунок 2).

Первый блок связан с формированием базы исходных данных. При этом такие данные в зависимости от метода их получения можно разбить на две группы: не требующие проведения дополнительных исследований (информация о параметрах базового режима прокатки и фактических показателях работы прокатного стана при его использовании); аналитические зависимости (уравнения регрессии), полученные на основании дополнительных исследований и устанавливающие взаимосвязь между частными параметрами оптимизации и измеряемыми температурно-скоростными и геометрическими параметрами прокатки.

Второй блок связан с обоснованием конкретного направления (направлений) совершенствования режимов производства проката. В рамках данного блока с использованием данных, ранее полученных для базового режима прокатки, проводятся расчеты показателей, характеризующих возможность интенсификации режима прокатки, целесообразность корректировки используемой калибровки валков и используемых температурно-скоростных параметров прокатки. Для выбора конкретного направления совершенствования режима прокатки обоснованы граничные условия.

Третий блок включает в себя разработку параметров нового режима прокатки и оценку его применимости и эффективности по сравнению с базовым режимом. Критерием применимости нового режима прокатки является отсутствие превышения допустимой нагрузки на основное оборудование стана, а критерием эффективности – сравнительный анализ значений комплексного параметра оптимизации (функции желательности Харрингтона) при использовании базового и нового режимов прокатки. Поскольку согласно принятому подходу обобщенная функция желательности определяется с учетом коэффициентов весомости частных критериев оптимизации, то в рамках данного блока производится обоснование значений указанных коэффициентов. В случае невыполнения условий применимости и эффективности нового режима прокатки производится корректировка его параметров с повторной проверкой соответствия вышеприведенным условиям.



*Нп₁, Нп₂, Нп₃ – направления по совершенствованию режима прокатки путем интенсификации режима обжатий, изменения калибровки и температурно-скоростных параметров соответственно; Нв, Мв – направление и конкретные мероприятия по снижению расхода валков соответственно; Φ , P – значения фактических и расчетных показателей при использовании нового режима прокатки.

Рисунок 2 – Алгоритм применения методики совершенствования режимов производства проката из рельсовых сталей

Четвертый блок включает в себя опытно-промышленное опробование нового режима прокатки в условиях действующего прокатного стана, сравнительный анализ фактических показателей работы стана при его использовании с расчетными данными и, при необходимости, корректировку методики определения прогнозных значений измеряемых показателей путем ввода дополнительных поправочных коэффициентов.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния параметров деформации, химического состава и структуры заготовок рельсовых сталей различных марок на их пластичность и СПД, проведенные в рамках создания теоретической базы и реализации возможности практического применения разрабатываемой методики совершенствования режимов производства проката из рельсовых сталей.

Исследования СПД проводили с использованием методов горячих механических испытаний на кручение и осадку, что позволило повысить точность получаемых результатов. Для экспериментальных исследований СПД методом осадки использован модуль «Hydrawedge» установки «Gleeble System 3800». Испытания проводили путем одноосного сжатия цилиндрических образцов между двумя плоскими бойками. Режим испытаний моделировал деформацию в условиях действующих рельсобалочных и сортопрокатных станов: интервал изменения степени деформации составил от 0,05 до 0,40, скорости деформации – от 5 до 15 с⁻¹, температуры деформации – от 900 °С до 1150 °С.

В качестве объекта экспериментальных исследований методом горячей осадки использованы образцы непрерывнолитых заготовок рельсовой стали марки Э76ХСФ 25 плавов текущего производства электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК». При выборе образцов руководствовались получением максимального интервала изменения содержания основных химических элементов. Отбор проб проводили с поверхности заготовок и на глубине 50 мм (сечение непрерывнолитых заготовок – 300×360 мм). Схема вырезки образцов выбрана исходя из возможности получения информации о пластических характеристиках стали в различных зонах непрерывнолитых заготовок.

Исследования СПД и пластичности методом горячего кручения проводили с использованием специализированной лабораторной установки. При проведении экспериментальных исследований СПД методом кручения термомеханические параметры варьировали в тех же пределах, что и при испытаниях методом осадки. Экспериментальные исследования пластичности проводили при температуре 1100 °С, что обусловлено максимальной пластичностью рельсовых сталей при данной температуре (по результатам ранее проведенных исследований других авторов). В качестве объекта исследований использованы образцы непрерывнолитых заготовок сталей Э76ХСФ (25 плавов), Э76Ф (10 плавов) и Э90ХАФ (10 плавов) производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» и 10 плавов конвертерной стали марки К76Ф производства ПАО «Мечел». Отбор проб проводили от трех зон кристаллизации заготовок – корковой зоны, зоны столбчатых кристаллов и центральной зоны, что позволило оценить влияние структуры металла на пластичность и СПД.

Сопротивление пластической деформации определяли по формуле:

$$\sigma = \frac{12\sqrt{3}}{\pi \cdot d_0^3} M, \quad (25)$$

где d_0 – диаметр образца до испытания, мм; M – крутящий момент, Н·мм.

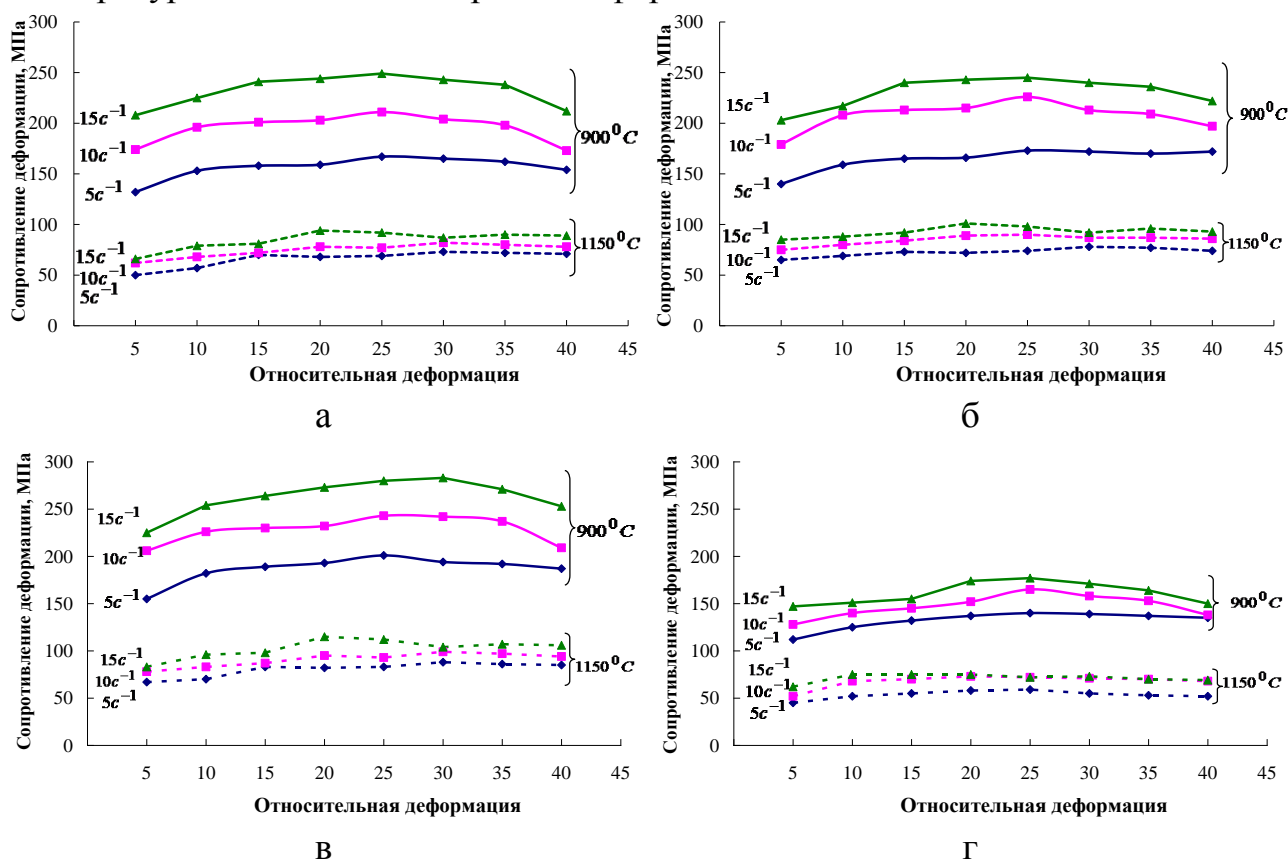
Критерий пластичности рассчитывали по формуле:

$$\lambda_p = \frac{\pi \cdot d_0 \cdot z}{l_0}, \quad (26)$$

где z – число оборотов до разрушения; l_0 , d_0 – длина и диаметр исходных цилиндрических образцов соответственно, мм.

Анализ результатов исследований СПД стали Э76ХСФ аналогичного химического состава, проведенных с использованием горячей осадки и горячего кручения, показал, что различие не превышает 7 %, что подтверждает адекватность полученных данных.

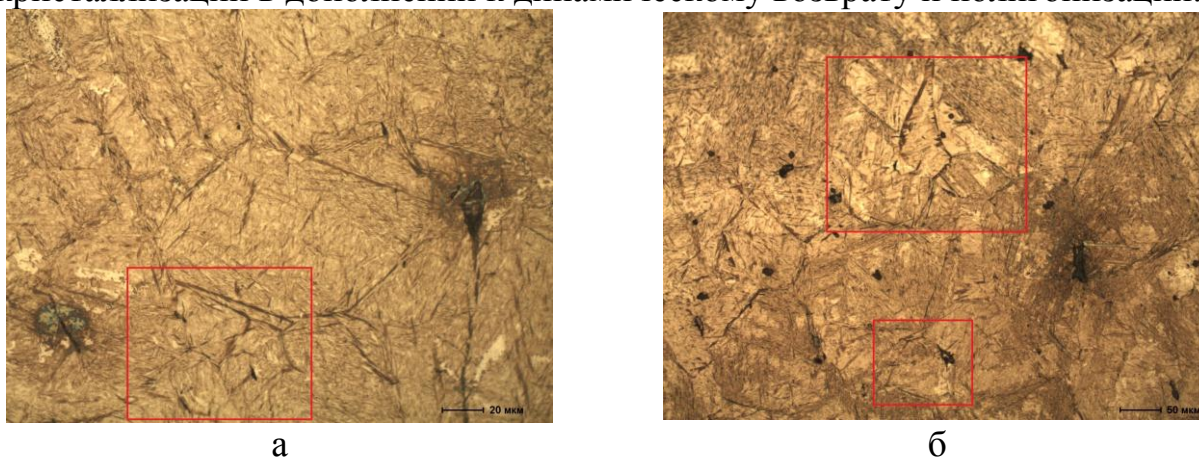
По результатам проведенных экспериментальных исследований установлено, что зависимость СПД рельсовых сталей от относительной деформации является параболической с максимумом при степенях деформации 0,20-0,30 (рисунок 3). При этом характер зависимости сохраняется для всех значений температуры и скорости деформации в рассматриваемом интервале их изменения, хотя и становится менее выраженным при повышении температуры и снижении скорости деформации.



а – Э76ХФ; б – Э76ХСФ; в – Э90ХАФ; г – К76Ф

Рисунок 3 – Зависимость сопротивления деформации рельсовых сталей от термомеханических параметров прокатки

С целью обоснования полученных зависимостей проведена фиксация высокотемпературного состояния образцов (закалка в воде после горячей деформации). Исследуемые образцы деформировались со скоростью 2 с^{-1} при температуре $1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$, степень деформации составила 0,25. По результатам проведенных металлографических исследований на границах зерен стали, величина которых по ГОСТ 5639-82 соответствует № 8 и № 9, выявлены группы зерен значительно меньшего размера (№ 13, 14 по ГОСТ 5639-82) – рисунок 4. При этом такая микроструктура характерна, как для образцов из центральной зоны непрерывнолитых заготовок, так и для образцов из корковой зоны. Полученные данные свидетельствует о протекании динамической рекристаллизации в дополнении к динамическому возврату и полигонизации.



а – корковая зона; б – центральная зона

Рисунок 4 – Микроструктура стали К76Ф после горячей деформации

По полученным результатам снижение температуры и повышение скорости деформации при одной и той же степени деформации обуславливает увеличение СПД (рисунок 3), что согласуется с общепринятыми представлениями.

Проводя сравнительный анализ СПД рассматриваемых марок рельсовых сталей при аналогичных условиях (рисунок 3) можно сделать вывод, что наименьшим СПД обладает сталь марки К76Ф, а наибольшим – сталь марки Э90ХАФ.

Результаты обобщения полученных данных о влиянии термомеханических параметров деформации на СПД в виде уравнений регрессии, полученные для химического состава рельсовых сталей, соответствующего среднему содержанию основных химических элементов, представлены ниже.

Сталь Э76ХФ

$$\sigma_s = 3607 \cdot e^{-3,315 \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)} \cdot \varepsilon^{0,161} \cdot u^{0,005}; \quad (27)$$

Сталь Э76ХСФ

$$\sigma_s = 3449 \cdot e^{-3,198 \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)} \cdot \varepsilon^{0,156} \cdot u^{0,004}; \quad (28)$$

Сталь Э90ХАФ

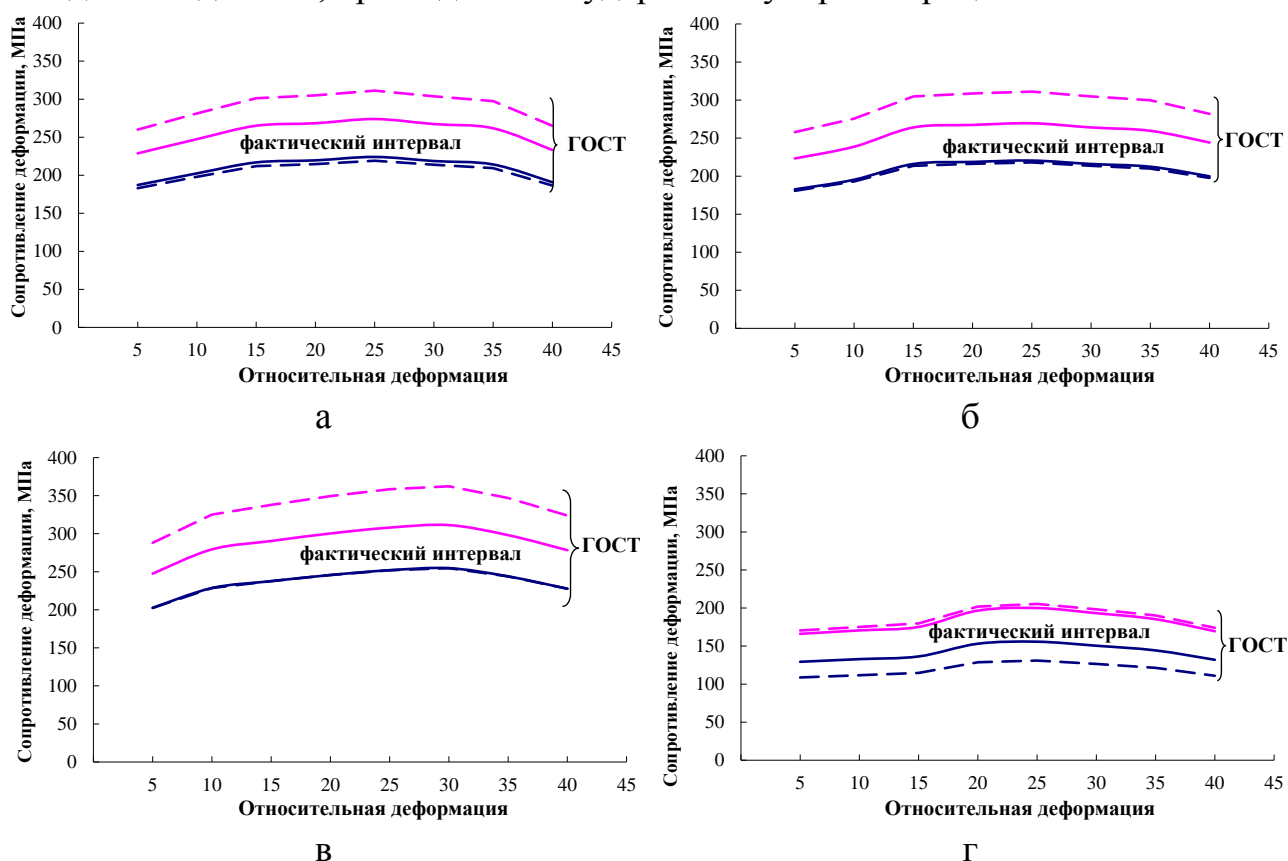
$$\sigma_s = 3746 \cdot e^{-3,178 \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)} \cdot \varepsilon^{0,145} \cdot u^{0,003}; \quad (29)$$

Сталь К76Ф

$$\sigma_s = 2651 \cdot e^{-3,212 \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)} \cdot \varepsilon^{0,148} \cdot u^{0,005}. \quad (30)$$

По результатам статистических исследований, проведенных стандартным методом множественного регрессионного анализа, установлено, что в фактическом интервале варьирования содержания химических элементов в рельсовых сталях всех рассматриваемых марок значимое влияние на повышение их СПД оказывает увеличение концентрации углерода, марганца, ванадия, азота, серы и фосфора.

По результатам расчетов СПД рельсовых сталей, проведенных с использованием полученных уравнений регрессии, величина ИРВ при варьировании содержания химических элементов в рамках фактического интервала их изменения составила 17-22 % от значений, полученных при среднем содержании в ней основных химических элементов. При экстраполяции полученных данных для интервала изменения химических элементов в рамках требований ГОСТ Р 51685-2013 величина ИРВ составила 34-38 %. На рисунке 5 представлен пример зависимости ИРВ сопротивления деформации от степени деформации для одного из рассматриваемых сочетаний термомеханических параметров прокатки. Полученные зависимости обобщены в виде базы данных, прошедшей государственную регистрацию.



а – Э76ХФ; б – Э76ХСФ; в – Э90ХАФ; г – К76Ф

Рисунок 5 – Зависимость ИРВ сопротивления деформации рельсовых сталей от степени деформации ($u = 15 \text{ с}^{-1}$; $t = 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

Характеризуя механизм влияния концентрации перечисленных химических элементов на СПД рельсовых сталей можно отметить, что полученные данные о влиянии содержания углерода, фосфора и серы в стали на сопротивление деформации согласуются с общепринятыми представлениями, а

влияние азота и ванадия на СПД связано с образованием нитридов и карбонитридов ванадия – рассматриваемые рельсовые стали легируются ванадием, являющемся нитридообразующим элементом.

Адекватность полученных зависимостей влияния химического состава рельсовых сталей на их СПД подтверждена результатами промышленного эксперимента, проведенного в условиях рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК» методом осциллографирования параметров работы двигателей. По полученным данным моменты на валу двигателей при прокатке рельсов из заготовок стали Э76ХФ «неблагоприятного» химического состава на 21-27 % превышают нагрузку на двигатели при прокатке заготовок «благоприятного» состава.

По результатам исследований влияния микроструктуры непрерывнолитых заготовок рельсовых сталей на их СПД установлено, что абсолютные значения СПД снижаются по мере удаления от поверхности заготовок к их осевой зоне (рисунок 6). В количественном выражении СПД зоны столбчатых кристаллов в 1,12 раза ниже по отношению к корковой зоне, а для центральной зоны снижение СПД по сравнению с корковой зоной составляет 1,18 раза. Выявленные закономерности изменения СПД по сечению непрерывнолитых заготовок обусловлены различием в величине зерна.

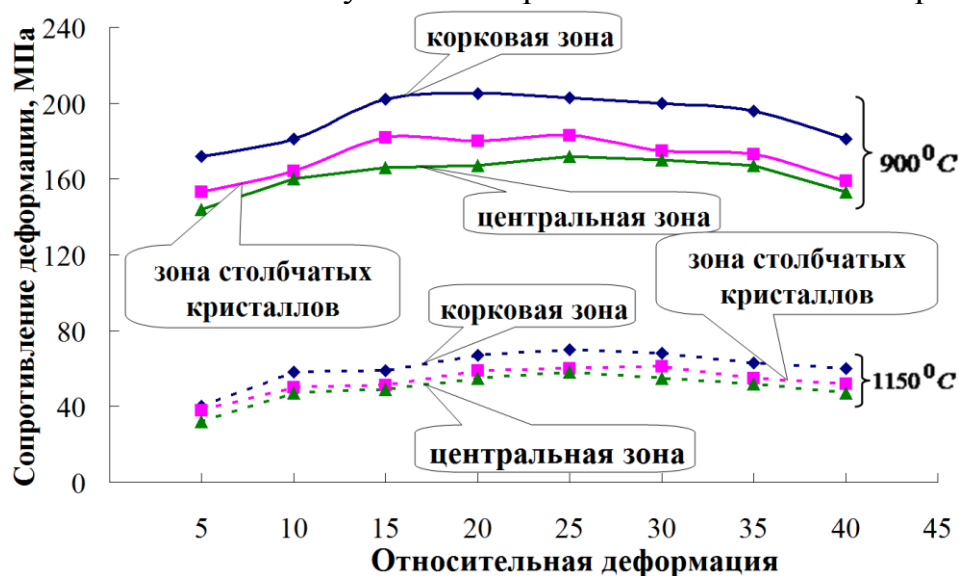


Рисунок 6 – Сопротивление деформации по зонам непрерывнолитых заготовок рельсовой стали К76Ф

Исследования горячей пластичности проводили в два этапа. На первом этапе исследовали закономерности изменения пластичности рельсовой стали марки К76Ф от температуры деформации (зависимости пластичности сталей Э76ХФ и Э90ХАФ от температуры деформации получены ранее другими авторами), на втором этапе – зависимости максимальной пластичности рельсовых сталей марок К76Ф, Э76Ф, Э76ХФ и Э90ХАФ от их химического состава при различных скоростях деформации.

По результатам экспериментальных исследований установлено (рисунок 7), что при увеличении температуры деформации в интервале 900-1150 °C для корковой зоны и в интервале 900-1100 °C для остальных зон кристаллизации

непрерывнолитых заготовок критерий пластичности стали К76Ф возрастает, после чего происходит значительное его снижение. При этом наиболее выраженный максимум пластичности характерен для корковой зоны.

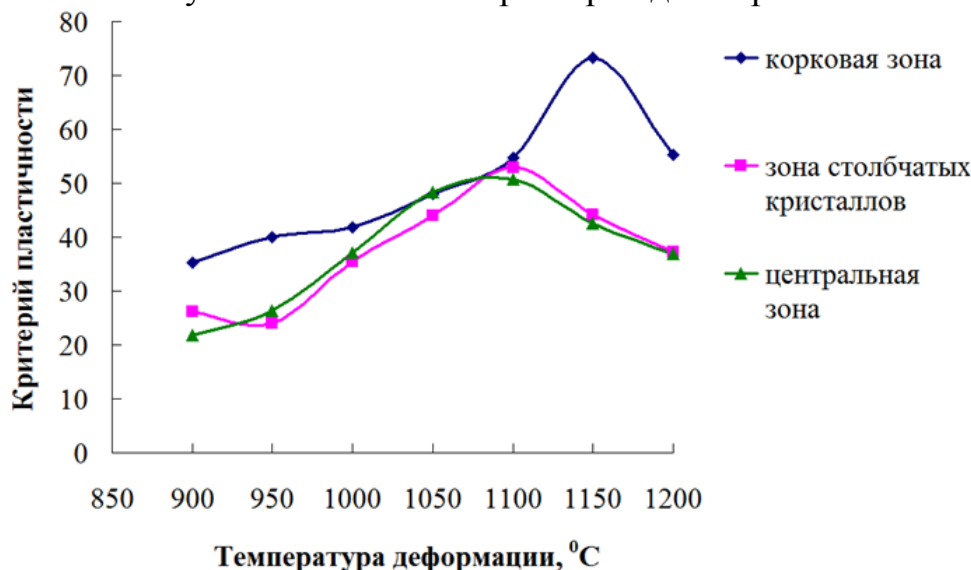


Рисунок 7 – Зависимость пластичности непрерывнолитых заготовок рельсовой стали К76Ф по зонам кристаллизации от температуры деформации

В результате исследований влияния химического состава сталей К76Ф, Э76ХФ, Э76ХСФ и Э90ХАФ и скорости их деформации на максимальную пластичность установлен аналогичный характер зависимостей для всех рассматриваемых марок рельсовых сталей. В анализируемых пределах изменения содержания химических элементов повышение концентрации углерода, азота, ванадия серы и фосфора в стали приводит к снижению пластичности; при этом с увеличением скорости деформации критерий пластичности уменьшается вне зависимости от химического состава сталей. В количественном выражении уменьшение максимальной пластичности рельсовых сталей при увеличении скорости деформации от 1 с^{-1} до 10 с^{-1} составляет 27-36 %.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований процессов образования и трансформации дефектов рельсов и нерельсовых профилей, получаемых из отбраковки заготовок рельсовых сталей. Указанные исследования проведены в рамках получения исходных данных для практической реализации методики совершенствования режимов производства проката из рельсовых сталей.

Исследования проводили в три этапа: моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) металла в процессе прокатки рельсовой стали в калибрах различной формы; лабораторные исследования образования и трансформации дефектов методами физического моделирования; исследования происхождения характерных дефектов готового проката.

Для моделирования НДС металла применяли программный комплекс DEFORM-2D, принцип работы которого основан на методе конечных элементов. В качестве параметра, характеризующего НДС металла при

прокатке, использовали критерий Кокрофта-Лэтэма, рассчитываемый по формуле:

$$D = \int_0^{\bar{\varepsilon}} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon}, \quad (31)$$

где $\bar{\varepsilon}$ – накопленная пластическая деформация; $d\bar{\varepsilon}$ – приращение накопленной деформации; σ^* – максимальное главное растягивающее напряжение; $\bar{\sigma}$ – интенсивность напряжений.

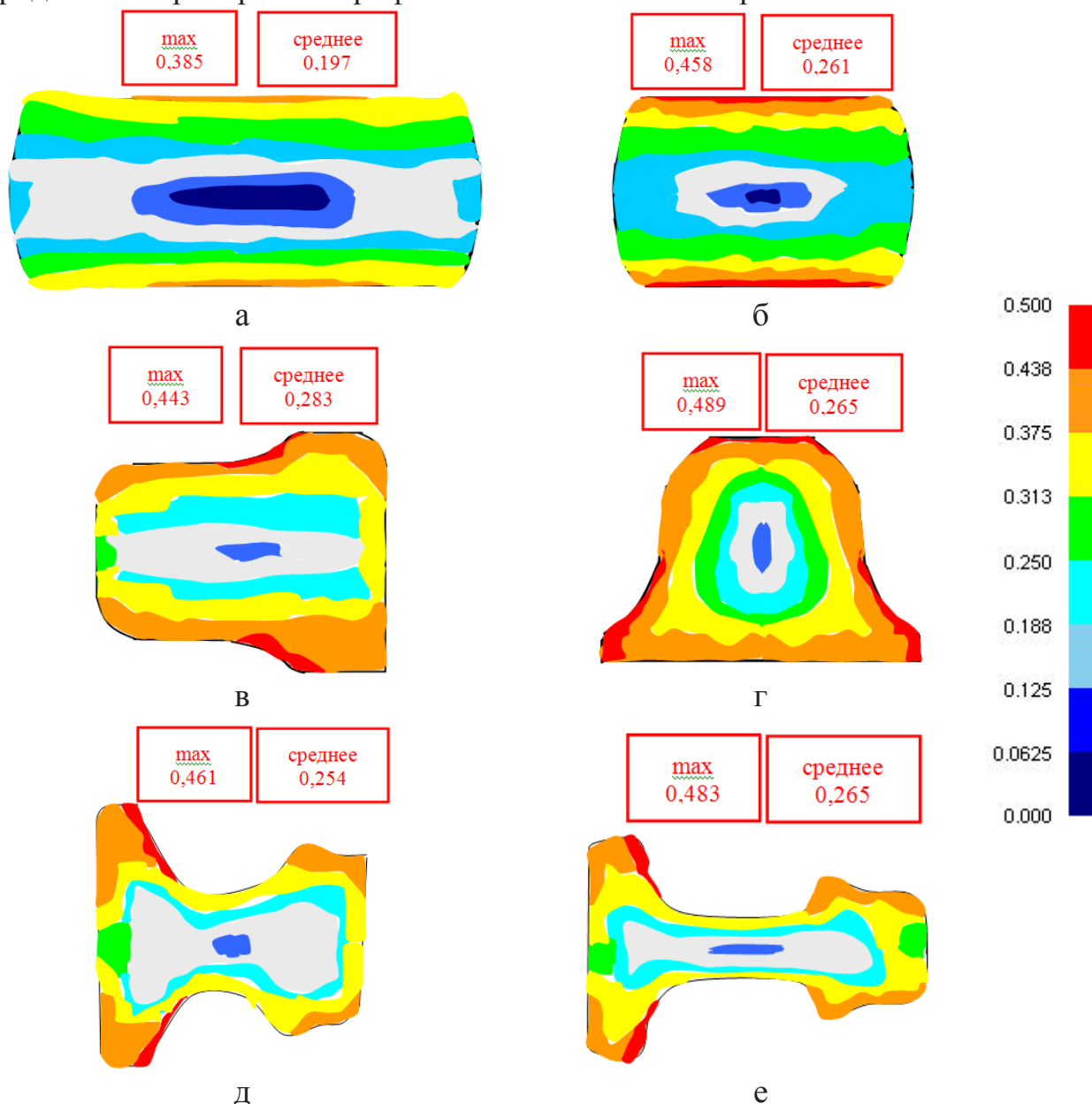
В качестве объекта исследования использовали режимы прокатки железнодорожных рельсов и заготовок сечением 150×150 мм на рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК», заготовок диаметром 60 мм и шаров такого же диаметра на сортопрокатном и шаропрокатном станах ОАО «ГМЗ». При проведении моделирования использовали экспериментальные зависимости СПД от термомеханических параметров деформации (27-30).

Второй этап исследований, заключающийся в определении закономерностей образования и трансформации поверхностных и внутренних дефектов при деформации в калибрах различной формы, проводили методом физического моделирования с использованием лабораторного прокатного стана «Дуо-80». Исследовали процессы образования и выкатываемости дефектов в ящичных калибрах, используемых при производстве рельсов и заготовок квадратного сечения в черновых клетях универсального рельсобалочного стана, калибрах, используемых при производстве заготовок круглого сечения на сортовом стане. В качестве объектов исследований выступали свинцовые образцы с размерами сторон сечения, соответствующими в масштабе 1:10 сечению заготовок, используемых на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК» и сортовом стане ОАО «ГМЗ». Для исследования закономерностей течения металла использовали образцы с предварительно нанесенной на их поверхность координатной сеткой. Для определения закономерностей трансформации дефектов в процессе прокатки применяли образцы с предварительно нанесенными на их поверхность дефектами в виде трещин, ориентированных в различном направлении относительно направления прокатки (продольном, поперечном, с углом наклона 15°, 30°, 45°), а также с искусственными внутренними дефектами круглого сечения, ориентированными вдоль оси прокатки и расположенными на различном расстоянии от поверхности и боковых граней образца. Для оценки выкатываемости дефектов использовали вышеприведенные коэффициенты (14).

В рамках третьего этапа проводили исследования характерных дефектов готового проката методами металлографического и рентгенофазового анализа и исследования влияния технологических факторов на качество поверхности и макроструктуры проката, отбраковку по результатам механических испытаний методом пассивного эксперимента с использованием стандартной методики множественного регрессионного анализа.

Полученные результаты моделирования НДС металла при прокатке рельсов из стали марки Э76ХФ в черновых клетях рельсобалочного стана (рисунок 8) свидетельствуют о крайне неравномерном характере

распределения критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению раската.



а, б, в – второй, шестой и седьмой проходы в первой черновой клет;

г, д, е – первый, третий и пятый проходы во второй черновой клет

Рисунок 8 – Распределение критерия Кокрофта-Лэтэма в поперечном сечении раската при прокатке рельсов из стали Э76ХФ в черновых клетях

В осевой зоне раскатов независимо от формы калибров значения указанного критерия минимальны, что объясняется неполным проникновением деформации вглубь раската.

Максимальные значения критерия Кокрофта-Лэтэма для ящичных калибров имеют место в приповерхностных слоях вблизи вертикальной оси калибров (рисунки 8 а, б), что обусловлено отсутствием горизонтальных перемещений металла в указанной зоне раската (имеют место только вертикальные деформации). При прокатке в калибрах сложной формы («трапеция», «лежащая трапеция», рельсовые калибры) имеют место локальные зоны с максимальным значением критерия Кокрофта-Лэтэма,

расположенные в местах формирования подошвы профиля (рисунки 8 г-е); при этом для прокатки в калибре типа «трапеция» характерно наличие такой зоны также в приповерхностном слое вблизи вертикальной оси калибра (рисунок 8 г).

При прокатке рельсов из сталей марок Э90ХАФ и К76Ф характер НДС металла по сечению раскатов аналогичен прокатке рельсов из стали Э76ХФ (рисунок 8), но при этом максимальные и средние значения критерия Кокрофта-Лэтэма для стали Э90ХАФ выше в среднем на 8 %, а для стали К76Ф ниже на 31 % по сравнению со сталью Э76ХФ, что объясняется различием СПД указанных сталей при аналогичных условиях деформации.

На основании обработки данных с использование регрессионного и дисперсионного анализа установлено, что увеличение вытяжек и повышение количества кантовок способствуют снижению величины максимального значения критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению раската, что обусловлено влиянием неравномерности распределения температуры на формирование благоприятной схемы НДС металла. Так повышение вытяжек (деформаций) при прокатке приводит к разогреву поверхностных слоев металла, в результате чего разница их температуры с осевыми слоями раската уменьшается, а при кантовке раскатов происходит обновление слоев металла, непосредственно контактирующих с прокатными валками, что также приводит к уменьшению температурной неоднородности.

Применительно к прокатке в калибрах сложной формы, используемых в черновых клетях рельсобалочного стана («трапеция», «лежащая трапеция», «рельсовые калибры»), в дополнении к приведенным параметрам значимое влияние на снижение максимальных значений критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению раската оказывает также повышение степени подобия формы подката и калибра.

Ниже представлены полученные уравнения регрессии, позволяющие определять прогнозные максимальные значения критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению раскатов при деформации заготовок стали Э76ХФ в калибрах различной формы:

- ящичные калибры без предварительной кантовки раската:

$$D_{\max} = 25,031 \cdot 1,012^n \cdot e^{-0,0025 \cdot t} (-0,0437 \cdot \lambda + 0,3864), \quad (32)$$

- ящичные калибры с предварительной кантовкой раската:

$$D_{\max} = 19,256 \cdot 1,012^n \cdot e^{-0,0024 \cdot t} (-0,0257 \cdot \lambda + 0,3538), \quad (33)$$

- калибры сложной формы без предварительной кантовки раската*:

$$D_{\max} = 20,61 \cdot 1,012^n \cdot K_{\Pi\Phi}^{0,2} \cdot e^{-0,0023 \cdot t} (-0,0346 \cdot \lambda + 0,3401), \quad (34)$$

- калибры сложной формы с предварительной кантовкой раската*:

$$D_{\max} = 12,812 \cdot 1,012^n \cdot K_{\Pi\Phi}^{0,25} \cdot e^{-0,0020 \cdot t} (-0,0302 \cdot \lambda + 0,3460) \quad (35)$$

* в случае если $K_{\Pi\Phi} < 1$ для расчетов используются значения $1/K_{\Pi\Phi}$.

Аналогичные уравнения получены для рельсовых сталей марок К76Ф, Э90ХАФ.

Анализ результатов моделирования прокатки заготовок сечением 150×150 мм из рельсовых сталей в черновых клетях рельсобалочного стана и заготовок диаметром 60 мм из данных сталей на сортопрокатном стане показал, что полученные зависимости максимального значения критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению раската от параметров прокатки рельсов (32, 33) позволяют с достаточной степенью достоверности прогнозировать величину указанного параметра и применительно к условиям прокатки указанных заготовок.

Результаты моделирования прокатки шаров диаметром 60 мм из рельсовых сталей свидетельствуют, что критерий Кокрофта-Лэтэма имеет максимальные значения в зоне под ребордой. Данный факт объясняется тем, что в указанной зоне происходит разделение шаров – соответственно критерий Кокрофта-Лэтэма по мере прокатки повышается до 1, то есть до разрыва перемычки. Указанная особенность НДС металла при поперечно-винтовой прокатке шаров обуславливает неэффективность подхода, ранее примененного к оценке вероятности образования дефектов в процессе прокатки рельсов и сортовых заготовок и заключающегося в определении максимального значения критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению раската. В данном случае более правомерно анализировать максимальные значения указанного критерия за исключением зон воздействия реборд. По полученным данным повышение температуры деформации в интервале от 900 до 1250 °С обуславливает значимое снижение максимального значения критерия Кокрофта-Лэтэма в осевой зоне шаров, что согласуется с имеющимися данными о влиянии температуры деформации на образование «рыхлости» в центральной зоне шаров при поперечно-винтовой прокатке.

В ходе экспериментальных исследований закономерностей течения металла в ящичных калибрах, проведенных методом нанесения координатной сетки, установлены следующие основные закономерности:

1. Коэффициент вытяжки поверхностных слоев раската по длине и ширине образцов имеет выраженный неравномерный характер (рисунок 9 а). Наибольшей вытяжке подвергаются зоны, прилегающие к торцам раската, что обусловлено отсутствием внешних зон при прокатке. При этом заметно бóльшая вытяжка характерна для участка, прилегающего к торцу раската противоположному относительно входного торца, что объясняется различием скоростей течения металла в зонах отставания и опережения. Длина участков, на которых имеет место отмеченная повышенная продольная вытяжка поверхностных слоев раската, составляет порядка 15 % от общей длины образца после прокатки; при этом на данных участках раската больший коэффициент вытяжки характерен для центральной части образцов по сравнению с боковыми кромками. Выявленная неравномерность распределения продольных вытяжек по ширине поверхностного слоя раската объясняется тем, что вблизи боковых кромок часть металла идёт на уширение, так как металлу с энергетической точки зрения предпочтительнее течь в поперечном, чем в продольном направлении.

2. Коэффициент вытяжки поверхностных слоев раската значительно превышает вытяжку осевых слоев, в результате чего после прокатки торец раската приобретает форму, заметно отличную от плоской. При этом распределение коэффициентов вытяжки по сечению раската в значительной степени определяется формой очага деформации (отношением длины дуги захвата к средней высоте полосы до и после прокатки – $l_d/h_{ср}$) – зависимость неравномерности коэффициентов вытяжек от формы очага деформации имеет выраженный степенной характер (рисунок 9 б).

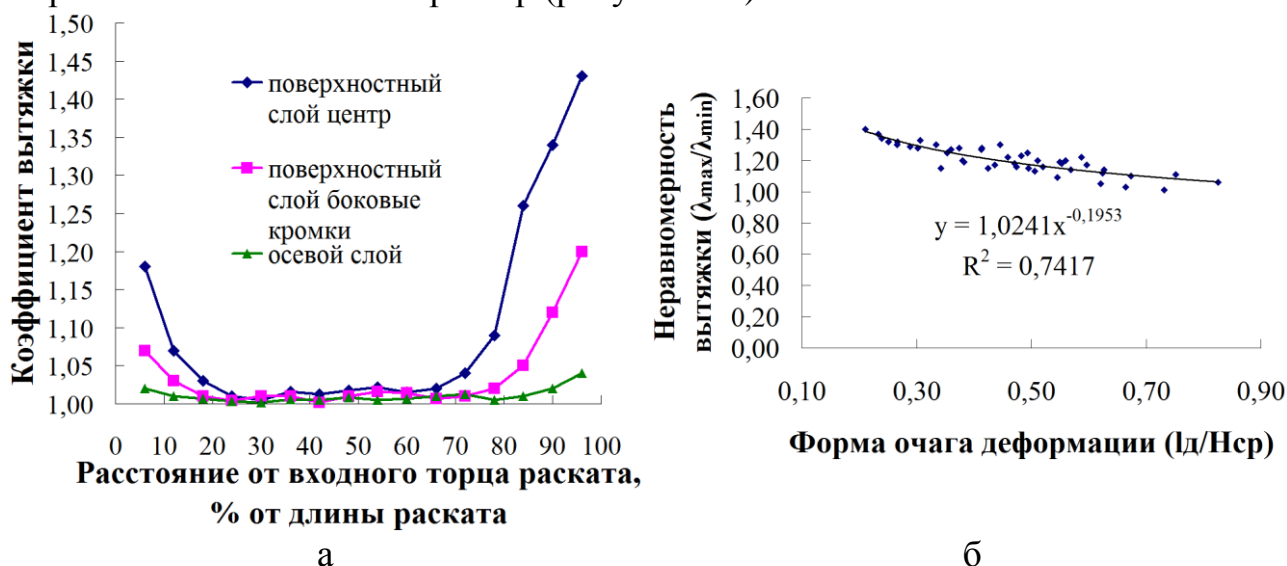


Рисунок 9 – Закономерности распределения коэффициентов вытяжки по длине и сечению раската (а) и в зависимости от формы очага деформации (б) при прокатке в ящичных калибрах

Закономерности течения металла при прокатке в калибре типа «лежачая трапеция» в целом аналогичны вышеприведенным данным для ящичных калибров за исключением распределения коэффициентов вытяжек по поверхностям граней, приконтактных с валками. Указанный факт обусловлен несимметричной формой данного калибра относительно вертикальной оси в отличие от предыдущего по ходу прокатки ящичного калибра и соответствующей неравномерностью деформаций по ширине раската.

По полученным данным (рисунок 10 а) при прокатке в калибре типа «лежачая трапеция» коэффициенты вытяжки поверхностных слоев в зоне калибра, соответствующей будущей подошве рельсового профиля, значительно ниже по сравнению с коэффициентами вытяжки в месте формирования будущей головки профиля. При прокатке в калибре типа «трапеция» неравномерность коэффициентов вытяжки поверхностных слоев раската по ширине контактных граней не наблюдается (рисунок 10 б), что объясняется симметричной относительно вертикальной оси формой калибра и задаваемого в калибр исходного подката.

Исследования выкатываемости поверхностных дефектов показали (рисунок 11), что применительно к условиям прокатки во всех типах исследуемых калибров интенсивность уменьшения размеров дефектов значимо определяется их расположением и пространственной ориентацией. По

полученным данным наиболее интенсивно выкатываются продольные дефекты, а наименьшая интенсивность характерна для поперечных относительно оси прокатки дефектов. Данный факт объясняется тем, что при прокатке в калибрах в условиях стесненного уширения вытяжка в продольном направлении по абсолютной величине значительно превышает вытяжку в поперечном направлении. Дефекты, расположенные под углом относительно оси прокатки, по интенсивности выкатываемости занимают промежуточное положение между продольными и поперечными дефектами; при этом различие их коэффициентов выкатываемости в зависимости от угла наклона к направлению прокатки не является значимым.

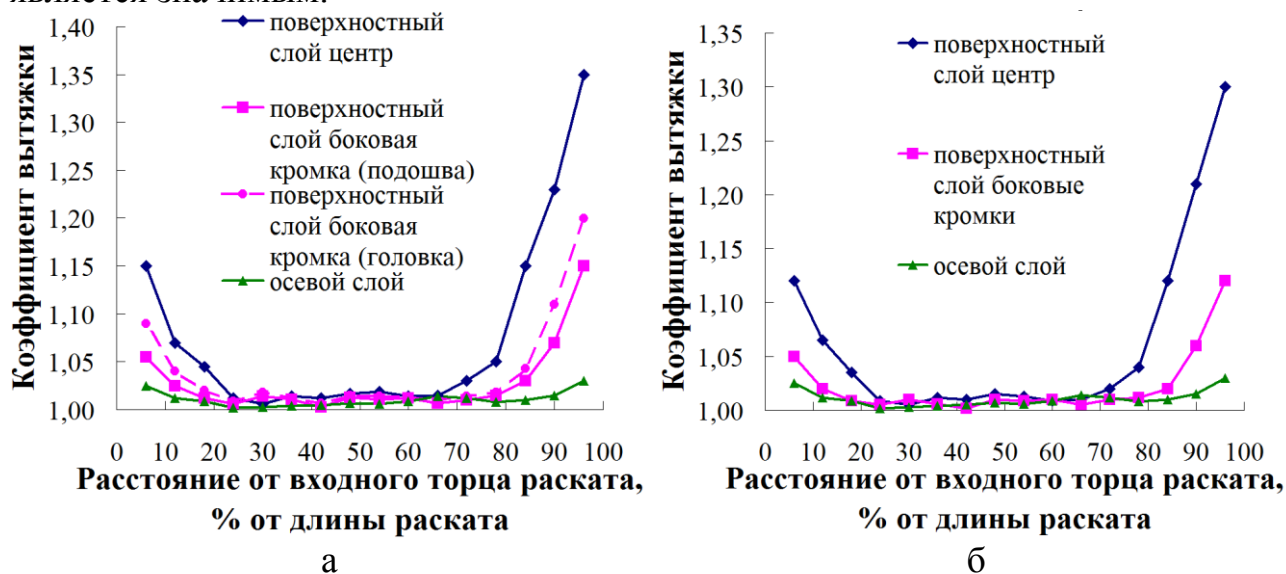


Рисунок 10 – Закономерности распределения коэффициентов вытяжки по длине и сечению раската при прокатке в калибрах типа «лежачая трапеция» (а) и «трапеция» (б)

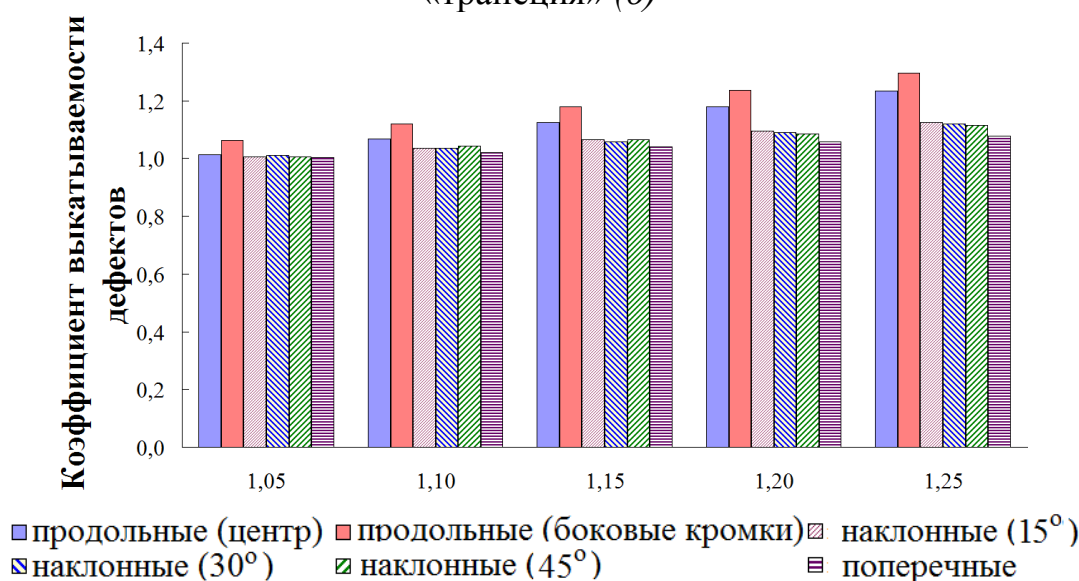


Рисунок 11 – Зависимость выкатываемости поверхностных дефектов по глубине от их расположения и коэффициентов вытяжки

Также установлено, что коэффициент выкатываемости по глубине продольных дефектов, расположенных на ребрах раската, выше в 1,04-1,09 раза

по сравнению с выкатываемостью дефектов, расположенных по центру грани, контактирующей с валками при прокатке. Данный факт объясняется формированием наименее благоприятной схемы НДС металла в приповерхностной зоне раскатов, расположенной вблизи вертикальной оси калибра.

Определено, что увеличение коэффициента вытяжки при прокатке повышает выкатываемость поверхностных дефектов независимо от их расположения и пространственной ориентации.

При этом влияние коэффициента вытяжки на выкатываемость дефектов имеет линейный характер:

- продольные дефекты в центральной части грани раската:

$$K_h = 1,102 \cdot \lambda - 0,143; K_b = 0,781 \cdot \lambda + 0,189; \quad (36)$$

- продольные дефекты вблизи боковых кромок раската:

$$K_h = 1,161 \cdot \lambda - 0,156; K_b = 0,839 \cdot \lambda + 0,206; \quad (37)$$

- дефекты, расположенные под углом 15-45° к направлению прокатки:

$$K_h = 0,589 \cdot \lambda + 0,388; K_b = 0,516 \cdot \lambda + 0,461 \quad (38)$$

- поперечные дефекты:

$$K_h = 0,371 \cdot \lambda + 0,613; K_b = 0,302 \cdot \lambda + 0,685, \quad (39)$$

где λ – коэффициент вытяжки.

Применительно к внутренним дефектам установлено, что повышение коэффициента вытяжки способствует увеличению выкатываемости дефектов, при этом коэффициент выкатываемости линейно снижается при движении от поверхности к сердцевине образца:

$$K_S = 0,329 + 0,703 \cdot \lambda - 0,13 \cdot \frac{h_D}{h_0}, \quad (40)$$

где λ – коэффициент вытяжки; h_D – расстояние от поверхности до продольной оси дефекта, мм; h_0 – высота полосы до деформации, мм.

В рамках исследований происхождения характерных дефектов проката из рельсовых сталей установлено следующее:

1. Внутренние дефекты рельсов, являющиеся причиной их отбраковки по результатам ультразвукового контроля (УЗК), можно условно разделить на два вида (рисунок 12): дефекты относительно больших размеров (длиной до 5 мм) с локализацией в их области расположения скоплений неметаллических включений (встречаются в 85 % случаев); дефекты относительно малых размеров (длиной до 1 мм) без скоплений неметаллических включений (встречаются в 15 % случаев). По результатам рентгенофазового анализа (рисунок 13) установлено, что неметаллические включения в области расположения дефектов первого типа преимущественно представляют собой непластичные соединения Al_2SiO_5 , SiO_2 , Al_2O_3 и легкоплавкие включения FeS , также встречаются включения в виде MnS .

Проведенными статистическими исследованиями показано, что относительная степень влияния параметров производства стали на вероятность отбраковки рельсов по результатам УЗК составляет 75 %.

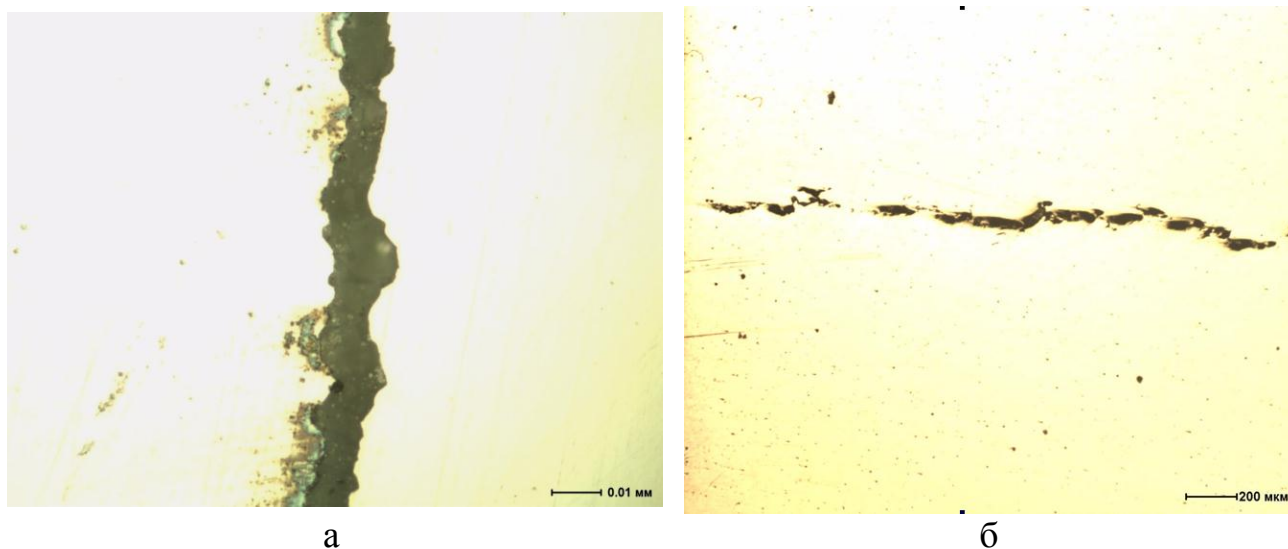


Рисунок 12 – Характерные внутренние дефекты железнодорожных рельсов из электросталей со скоплениями (а) и без скоплений (б) неметаллических включений, выявленные при ультразвуковом контроле

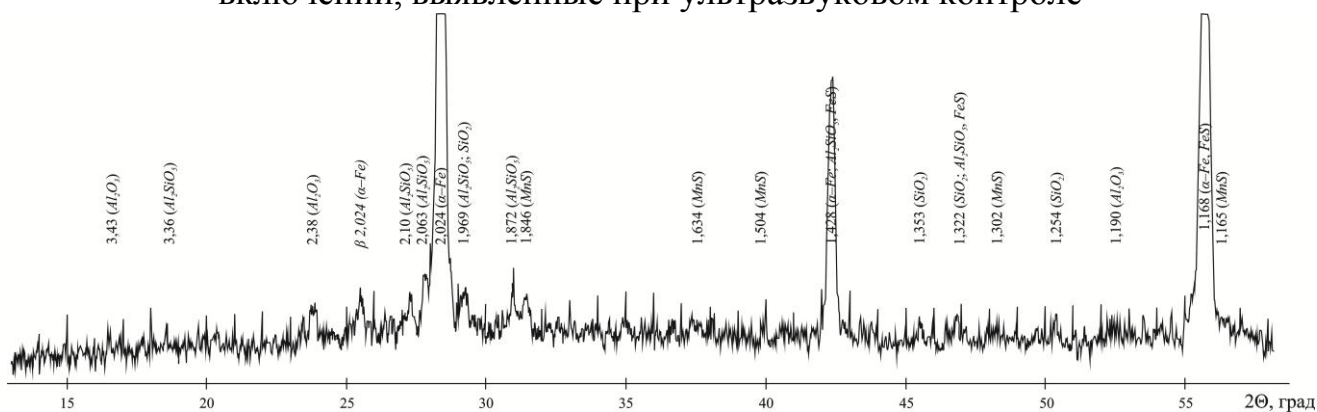


Рисунок 13 – Рентгенограмма области локализации дефектов рельсов

2. Поверхностные дефекты рельсов, являющиеся причиной их отбраковки по результатам вихретокового контроля, можно условно разделить на два вида: дефекты прокатного происхождения (прокатные плены); поверхностные трещины сталеплавильного происхождения. При этом относительная степень влияния параметров сталеплавильного передела на уровень отбраковки рельсов по поверхностным дефектам составляет 39 %.

3. Вероятность раскола мелющих шаров, произведенных из отбраковки заготовок рельсовой стали, при испытаниях на ударную стойкость на 48 % определяется химическим составом стали и на 23 % – температурой прокатки заготовок. Дополнительно проведенными экспериментальными исследованиями показано, что оптимальным химическим составом для производства мелющих шаров обладают стали марок 76ХФ и 76Ф.

В пятой главе представлены результаты разработки новых эффективных режимов прокатки рельсовых профилей (железнодорожных и остряковых рельсов) из сталей массового сортамента и режимов прокатки мелющих шаров из отбраковки заготовок рельсовых сталей с использованием вышеприведенной (глава 2) методики.

На основании анализа существующих режимов прокатки рельсовых профилей на рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК», проведенного в соответствии с применяемой методикой, определены направления их совершенствования: повышение интенсивности режима обжатий и совершенствование калибровки валков в черновых клетях. Основными отличительными особенностями разработанных режимов прокатки железнодорожных и остряковых рельсов от существующих режимов их прокатки явились: снижение количества проходов во второй черновой клети (с 5 до 3 при производстве железнодорожных рельсов и с 7 до 5 при производстве остряковых рельсов) за счет перераспределения обжатий между проходами (таблицы 1, 2); изменение формы рельсовых калибров, используемых во второй черновой клети с целью повышения степени подобия исходных подкатов и рельсовых калибров (рисунки 14, 15).

Проведенный с использованием разработанной методики сравнительный анализ значений обобщенного параметра оптимизации свидетельствует об эффективности новых режимов прокатки рассматриваемых рельсовых профилей (таблица 3).

Результаты опытно-промышленного опробования и внедрения разработанных режимов прокатки железнодорожных и остряковых рельсов на рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК» подтвердили их эффективность. При внедрении нового режима прокатки железнодорожных рельсов достигнуто улучшение следующих показателей относительно базового режима их прокатки: удельный расход электроэнергии снижен на 0,51 кВт·ч/т, удельный расход прокатных валков черновых клетей уменьшен на 0,51 кг/т, отбраковка рельсов по дефектам поверхности снизилась на 0,78 %. Экономическая эффективность, подтвержденная Актом внедрения, составила 121,051 млн. руб./год при доле участия автора диссертации 20 % или 24,210 млн. руб. Опытно-промышленное опробование нового режима прокатки остряковых рельсов показало улучшение следующих показателей производства относительно существующего (базового) режима их прокатки: удельный расход электроэнергии снизился на 0,49 кВт·ч/т, снижение отбраковки по дефектам поверхности составило 0,5 %. Ожидаемый экономический эффект от внедрения нового режима прокатки остряковых рельсов составляет 29,7 млн. руб/год.

Проведенный анализ существующих режимов прокатки заготовок сечением 150×150 мм на рельсобалочном стане и заготовок диаметром 60 мм на сортопрокатном стане, используемых в технологической цепочке производства мелющих шаров из отбраковки непрерывнолитых заготовок рельсовых сталей (рисунок 1), показал отсутствие резерва для интенсификации режимов обжатий и изменения температурных параметров прокатки; при этом направление по совершенствованию формы калибров не рассматривалось ввиду применения для производства указанных заготовок только калибров простой формы.

На основании полученного результата в соответствии с разработанной методикой в качестве основного направления для совершенствования режимов прокатки сортовых заготовок из отбраковки рельсовых сталей выбрано снижение расхода прокатных валков.

Таблица 1 – Режимы прокатки железнодорожных рельсов в черновых клетях

Номер черновой клетки	Базовый режим				Новый режим		
	№ прохода	Н, мм	В, мм	Δh, мм	Н, мм	В, мм	Δh, мм
1	0	300	360	—	300	360	—
	1	кантовка на 90°			260	375	40
		305	310	55			
	2	257	320	48	кантовка на 90°		
					317	270	58
	3	кантовка на 90°			266	280	51
		260	267	60			
	4	215	277	45	кантовка на 90°		
					291	276	61
	5	кантовка на 90°			кантовка на 90°		
257		220	20	222	229	54	
6	232	225	25	кантовка на 90°			
				207	240	22	
7	кантовка на 90°						
	210	246	15				195,5
2	1	кантовка на 90°			кантовка на 90°		
		200,5	250	45,5	80	220,5	110
	2	194,5	250	6	53	229,5	27
	3	80	215,3	90	42	238,5	11
	4	55	222,9	25			
	5	43	234	12			

Таблица 2 – Режимы прокатки остряковых рельсов в черновых клетях

Номер черновой клетки	Базовый режим				Новый режим		
	№ прохода	H, мм	B, мм	Δh, мм	H, мм	B, мм	Δh, мм
1	0	300	365	—	300	365	—
	1	кантовка на 90°			кантовка на 90°		
		300	308	65	300	308	65
	2	255	318	45	240	318	60
	3	кантовка на 90°			кантовка на 90°		
		260	265	58	260	250	58
	4	210	275	50	210	260	50
	5	кантовка на 90°			кантовка на 90°		
		225	216	50	195	220	65
	6	198	221	27	кантовка		
180					205	40	
7	кантовка на 90°			кантовка на 90°			
	180	206	41	192	194	13	
2	1	кантовка на 90°			кантовка на 90°		
		198	194	8	159	206	35
	2	кантовка на 90°			143	215	16
		165	210	29			
	3	148	215	17	кантовка на 90°		
					100,2	156	59,4
	4	кантовка на 90°			96,5	161,5	3,7
		103	158	51			
	5	103	158	0	94,5	163,5	2
	6	94,5	164	8,5			
7	92,5	165	2				

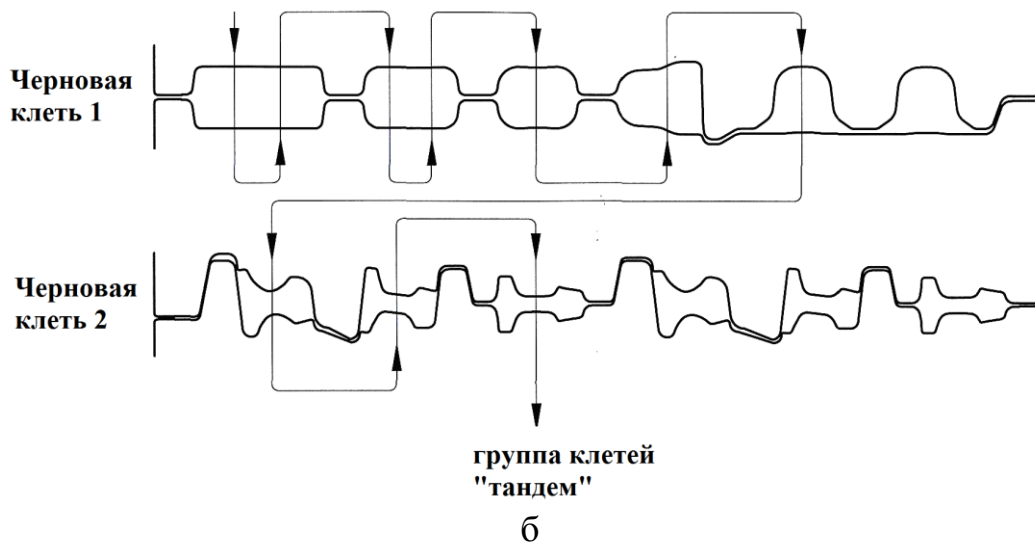
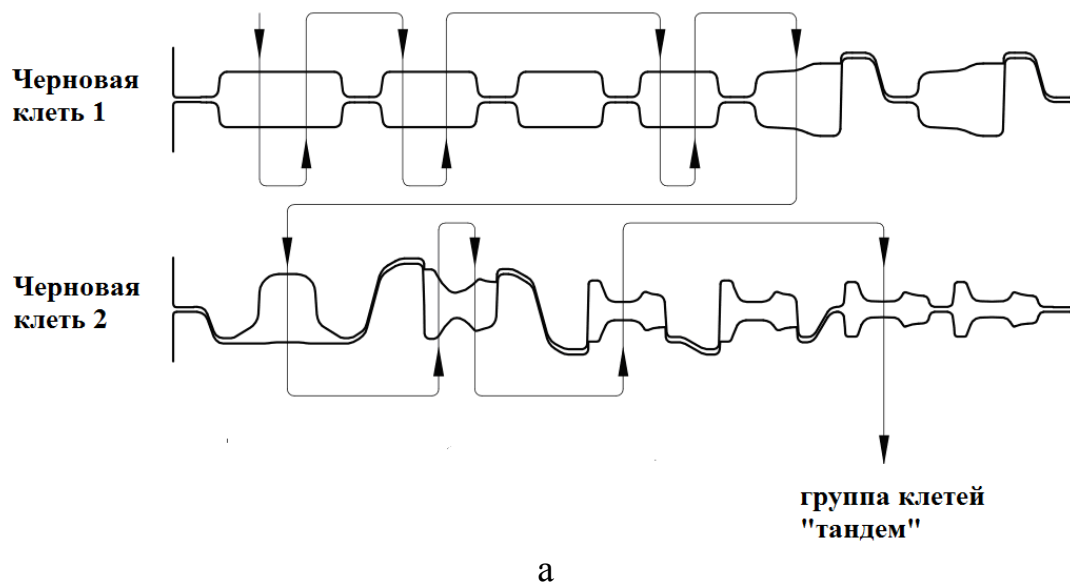


Рисунок 14 – Схемы прокатки железнодорожных рельсов в черновых клетях по базовому (а) и разработанному (б) режимам

Таблица 3 – Сравнительная эффективность режимов прокатки рельсов

Режим прокатки	Частные показатели желательности								Обобщенная функция желательности	
	энерго- эффективность		качество проката		материало- сбережение		производитель- ность			
	Э76ХФ	Э90ХАФ	Э76ХФ	Э90ХАФ	Э76ХФ	Э90ХАФ	Э76ХФ	Э90ХАФ	Э76ХФ	Э90ХАФ
Железнодорожные рельсы										
базовый	0,56	0,52	0,51	0,51	0,48	0,53	0,50	0,50	0,50	0,52
новый	0,63	0,63	0,61	0,61	0,71	0,74	0,74	0,74	0,68	0,69
Острьяковые рельсы*										
базовый	0,57	-	0,51	-	0,52	-	0,41	-	0,49	-
новый	0,66	-	0,61	-	0,70	-	0,67	-	0,66	-

* острьяковые рельсы из стали Э90АФ не производятся

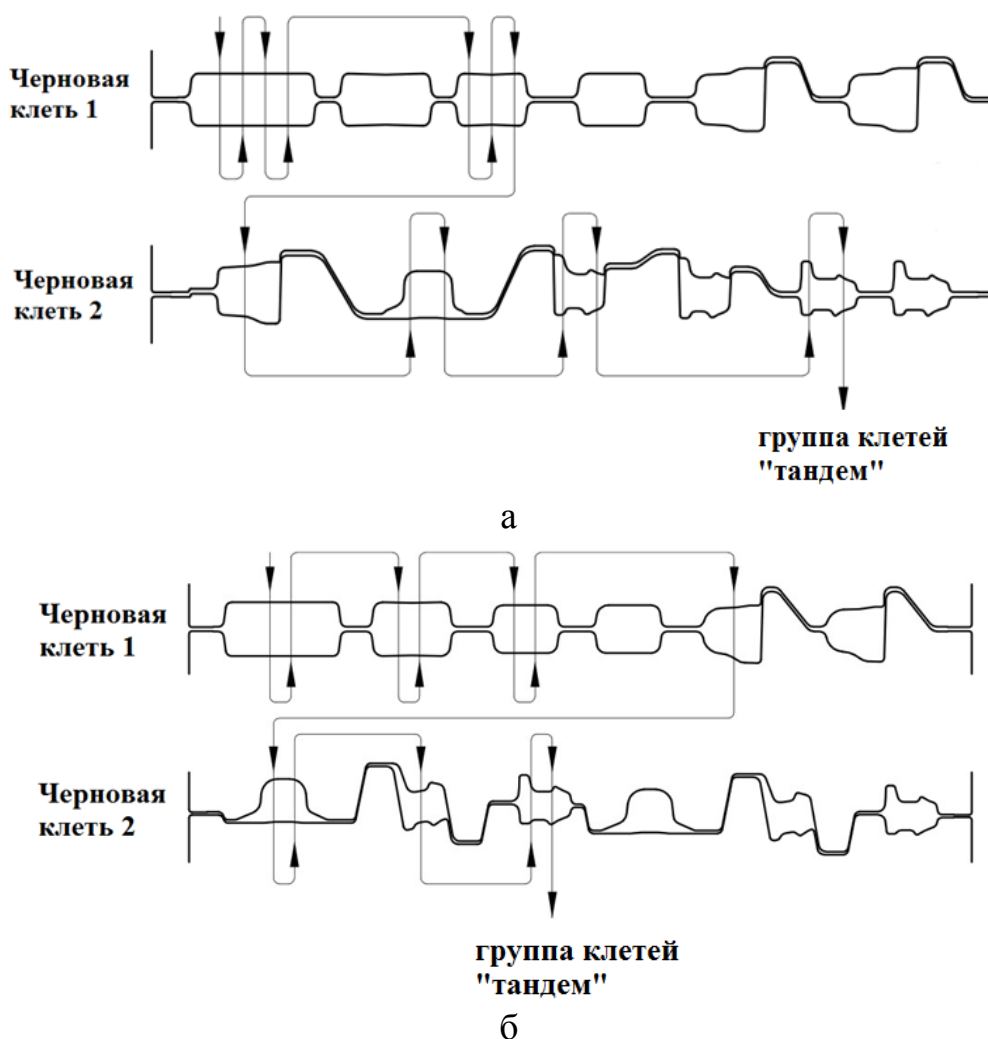


Рисунок 15 – Схемы прокатки остряковых рельсов в черновых клетях по базовому (а) и разработанному (б) режимам

При этом в соответствии с принятой концепцией о приоритете методов снижения расхода прокатных валков, не требующих значительных изменений технологии и повышения затрат, выбран направление по совершенствованию состава наплавочных материалов, используемых для восстановления прокатных валков.

В качестве объекта оптимизации выбран сортопрокатный стан ОАО «ГМЗ», что обусловлено следующими факторами:

- на данном стане имеет место повышенный расход прокатных валков при прокатке заготовок из рельсовых сталей, поскольку указанные марки стали, обладающие повышенным сопротивлением деформации, не являются его традиционным сортаментом в отличие от рельсобалочного стана;
- на указанном стане в отличие от рельсобалочного стана в настоящее время фактически используется технология наплавки прокатных валков, при этом для наплавки применяют традиционные материалы.

Комплекс экспериментальных исследований по оптимизации состава наплавочных материалов, используемых для восстановления прокатных валков, явился теоретической базой для разработки новой порошковой наплавочной проволоки на основе техногенных отходов (углеродфторсодержащей пыли

газоочистки алюминиевого производства). Указанная порошковая проволока нового состава получила патентную защиту и прошла опытно-промышленное опробование для наплавки комплектов валков обжимной клетки «900», клеток «1» и «2» стана «500» ОАО «ГМЗ», по результатам которого зафиксировано увеличение продолжительности срока эксплуатации валков на 17-21 % относительно прокатных валков, наплавленных с использованием порошковой проволоки традиционного состава (марки ПП-Нп-35В9Х3СФ). При этом стоимость процесса наплавки снижена на 160-870 руб. на 1 кг наплавленного слоя в зависимости от компонентного состава в рамках фактически опробованного интервала изменения содержания химических элементов. Вышеприведенная технико-экономическая эффективность восстановления прокатных валков с использованием порошковой проволоки нового состава подтверждена соответствующей Справкой.

Применительно к режиму прокатки мелющих шаров из рельсовых сталей в качестве основного направления его совершенствования выбрано изменение температурного режима деформации, что обосновано технологическими особенностями процесса поперечно-винтовой прокатки и ранее полученными данными о значимом влиянии температуры прокатки шаров на уровень их отбраковки.

На основании расчетов обобщенной функции желательности установлен оптимальный температурный интервал прокатки – 1030-1100 °С (рисунок 16). При этом в соответствии с базовым режимом прокатки шаров на ОАО «ГМЗ» температура прокатки ограничена значением не более 980 °С и фактически находится в диапазоне 900-980 °С. С учетом того факта, что повышение температуры прокатки, а, следовательно, и температуры нагрева под прокатку, обуславливает повышение безвозвратных потерь металла в виде угара (рисунок 16), и, кроме того, потенциально, снижение твердости шаров (за счет увеличения размера зерна), оптимальной является температура прокатки, соответствующая нижнему значению полученного диапазона – 1030 °С.

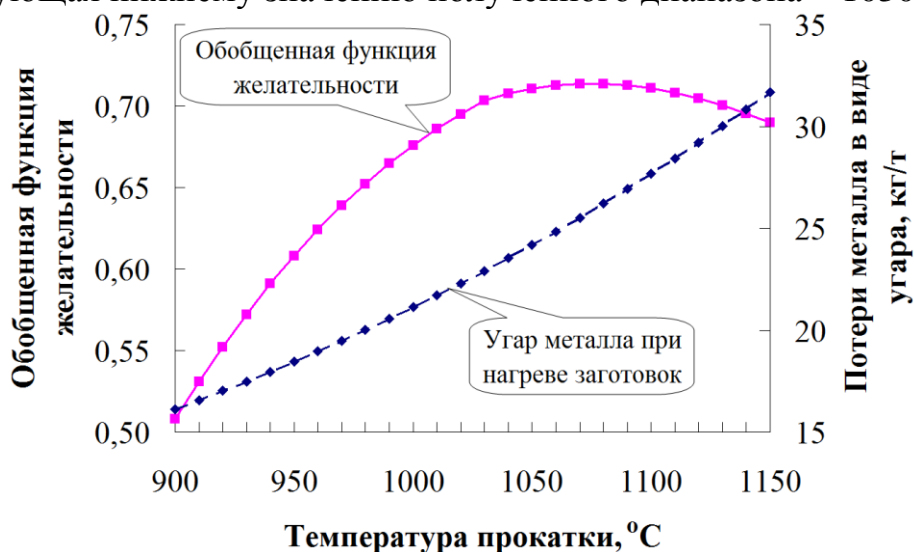


Рисунок 16 – Эффективность температурных режимов прокатки шаров из рельсовых сталей K76Ф, Э76ХФ

Опытно-промышленное опробование нового температурного режима прокатки шаров из рельсовой стали, проведенное в условиях ОАО «ГМЗ», показало увеличение их ударной стойкости за счет снижения количества внутренних трещин (таблица 4).

Таблица 4 – Влияние температурного режима прокатки на качество шаров, полученных из отбраковки заготовок рельсовой стали марки К76Ф

Режим прокатки*	Показатель			
	Доля шаров, выдержавших испытания на ударостойкость, %	Доля шаров с внутренними трещинами, %	Средний балл зерна после термообработки	Твердость после термообработки, HRC
Базовый	86	12	5,8	56
Новый	100	0	5,2	56

* испытано по 50 шаров, прокатанных по каждому режиму из заготовок одной плавки

Ожидаемый экономический эффект от внедрения нового режима прокатки мелющих шаров из отбраковки рельсовых сталей составляет 22,5 млн. руб/год, что подтверждено соответствующим Актом использования результатов исследований.

Заключение

1. Разработаны концептуальные основы и алгоритм применения на практике методики совершенствования режимов производства проката из рельсовых сталей на основе комплексного параметра оптимизации, учитывающего влияние параметров деформации на частные критерии оптимизации по энергоэффективности, качеству готового проката, материалосбережению и производительности стана.

2. Установлены, теоретически обоснованы и обобщены в виде аналитических зависимостей закономерности изменения сопротивления пластической деформации и пластичности рельсовых сталей марок К76Ф, Э76ХФ, Э76ХСФ и Э90ХАФ при варьировании термомеханических параметров их деформации и химического состава в рамках фактического и допустимого интервалов изменения, в том числе:

- показано, что при увеличении относительной деформации сопротивление пластической деформации изменяется по параболическому закону с достижением максимума при степенях деформации 0,20-0,30 независимо от температуры и скорости деформации;

- на основании металлографических исследований установлено, что наличие максимума на кривых текучести рельсовых сталей обусловлено протеканием динамической рекристаллизации;

- показано, что снижение температуры и повышение скорости деформации при одной и той же степени деформации обуславливает увеличение сопротивления пластическому деформированию;

- определено, что увеличение содержания углерода, марганца, ванадия, азота, серы и фосфора в пределах фактического изменения их концентраций обуславливает повышение сопротивления пластической деформации;

- установлено, что сопротивление пластической деформации снижается по мере удаления от поверхности к центральной зоне непрерывнолитых заготовок, что обусловлено влиянием размера зерна;

- обосновано, что увеличение концентрации углерода, азота, ванадия серы и фосфора приводит к снижению максимальной пластичности; при этом с увеличением скорости деформации критерий пластичности уменьшается вне зависимости от химического состава сталей.

3. Определены и обобщены в виде аналитических зависимостей закономерности влияния параметров деформации на формирование схемы напряженно-деформированного состояния металла и выкатываемости дефектов в процессе прокатки рельсов, сортовых заготовок и мелющих шаров из рельсовых сталей, в том числе:

- определено, что вне зависимости от формы калибров используемых для прокатки рельсов в черновых клетях универсального рельсобалочного стана, заготовок квадратного сечения в указанных клетях, заготовок круглого сечения в условиях сортового стана увеличение коэффициентов вытяжки по проходам, повышение температуры начала прокатки и дополнительные кантовки раската способствуют формированию более благоприятной схемы НДС металла; при этом для условий прокатки рельсов в специализированных «рельсовых» калибрах на формирование благоприятной схемы НДС дополнительное положительное влияние также оказывает повышение степени подобию формы калибров и исходного подката;

- показано, что при производстве шаров на стане поперечно-винтовой прокатки повышение температуры деформации в интервале температур горячей прокатки обуславливает формирование более благоприятной схемы НДС металла;

- применительно к калибрам, используемым на начальной стадии прокатки рельсовых профилей и при прокатке сортовых заготовок из рельсовых сталей, установлена значительная неравномерность коэффициентов вытяжки поверхностных слоев раската по длине и ширине, а также неравномерность вытяжки по сечению раската; показано, что наибольшей вытяжке подвергаются поверхностные зоны, прилегающие к торцам раската, а зависимость неравномерности коэффициентов вытяжек по сечению раската от формы очага деформации имеет выраженный степенной характер;

- показано, что при деформации в калибрах простой формы коэффициенты вытяжки по проходам, расположение и пространственная ориентация поверхностных дефектов оказывают значимое влияние на их выкатываемость; установлено, что наиболее интенсивно, как по глубине, так и по ширине выкатываются продольные дефекты, а наименее интенсивно – поперечные дефекты, при этом выкатываемость дефектов увеличивается при повышении коэффициента вытяжки по линейному закону вне зависимости от их пространственной ориентации и месторасположения.

4. С использованием новой методики совершенствования режимов производства проката из рельсовых сталей на основе комплексного параметра оптимизации, разработаны эффективные режимы прокатки рельсовых

профилей, обеспечивающие повышение качества готовой продукции и технико-экономических показателей ее производства, в том числе:

- новый режим прокатки железнодорожных рельсов на рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК», внедрение которого позволило получить экономический эффект 121,051 млн. руб./год (при доле участия автора диссертационной работы 20 % или 24,210 млн. руб.) за счет снижения удельного расхода электроэнергии на 0,51 кВт·ч/т, уменьшения расхода прокатных валков черновых клетей на 0,51 кг/т, снижения отбраковки рельсов по дефектам поверхности на 0,78 % (подтверждено Актом внедрения);

- новый режим прокатки остряковых рельсов на рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК», в ходе опытно-промышленного опробования которого достигнуто снижение удельного расхода электроэнергии на 0,49 кВт·ч/т и уменьшение отбраковки рельсов по дефектам поверхности на 0,5 % (ожидаемый экономический эффект от внедрения составляет 29,7 млн. руб./год).

5. В соответствии с принятой концепцией совершенствования режимов производства проката из рельсовых сталей разработан новый наплавочный материал на основе техногенных отходов для восстановления прокатных валков станов, специализирующихся на прокатке сортовых заготовок из отбраковки рельсовых сталей. Указанный материал получил патентную защиту, эффективность его применения подтверждена опытно-промышленным опробованием восстановления валков сортопрокатного стана ОАО «ГМЗ» – достигнуто увеличение продолжительности компании валков на 17-21 % при снижении стоимости процесса наплавки на 160-870 руб. на 1 кг наплавленного слоя, что подтверждено соответствующей Справкой.

6. Опираясь на методику совершенствования режимов производства проката из рельсовых сталей на основе комплексного параметра оптимизации разработан новый температурный режим прокатки мелющих шаров из отбраковки заготовок рельсовой стали К76Ф, по результатам опытно-промышленного опробования которого в условиях ОАО «ГМЗ» установлено повышение качества микроструктуры и увеличение ударной стойкости производимых шаров. Ожидаемая экономическая эффективность применения указанного режима прокатки, подтвержденная Актом использования результатов исследования, составляет 22,5 млн. руб./год.

7. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» и используются при подготовке научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлению 22.06.01 «Технологии материалов», направленность «Обработка металлов давлением», что подтверждено соответствующей Справкой.

Список публикаций по теме диссертационной работы

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Уманский, А. А. Исследования закономерностей течения металла и трансформации дефектов при прокатке в черновых клетях универсального рельсобалочного стана / А. А. Уманский, А. Б. Юрьев, Л. В. Думова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 10. – С. 712-720.

2. Исследования напряженно-деформированного состояния металла на начальной стадии прокатки железнодорожных рельсов / А. А. Уманский, А. Б. Юрьев, В. В. Дорофеев, Л. В. Думова. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 8. – С. 550-560.

3. Уманский, А. А. Разработка технологии производства мелющих тел с повышенными эксплуатационными свойствами из отбраковки рельсовых сталей / А. А. Уманский, А. С. Симачев, Л. В. Думова. // Черные металлы. – 2021. – № 5. – С. 57-62.

4. Исследование неметаллических включений в различных зонах кристаллизации рельсовой стали марки Э90ХАФ / А. С. Симачев, Т. Н. Осколкова, А. А. Уманский, А. В. Головатенко. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 2. – С. 135-142.

5. Уманский, А. А. Исследования неметаллических включений в рельсах из электросталей, легированных хромом / А. А. Уманский, А. В. Головатенко, А. С. Симачев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2019. – Т. 62. – № 12. – С. 936-942.

6. Исследования пластичности и сопротивления деформации хромистых рельсовых сталей / А. А. Уманский, А. В. Головатенко, М. В. Темлянцев, В. В. Дорофеев. // Черные металлы. – 2019. – № 6. – С. 24-28.

7. Исследования пластичности и сопротивления деформации легированных рельсовых сталей в температурном интервале прокатки / Уманский А. А., Головатенко А. В., Симачев А. С. [и др.]. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2019. – Т. 62. – № 6. – С. 452-460.

8. Уманский, А. А. Разработка теоретических основ энергоэффективного производства железнодорожных рельсов с повышенными эксплуатационными свойствами / А. А. Уманский, В. В. Дорофеев, Л. В. Думова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2020. – Т. 63. – № 5. – С. 318-326.

9. Уманский, А.А. Исследование влияния макро- и микроструктуры стальных помольных шаров на их ударную стойкость / Уманский А. А., Головатенко А. В., Осколкова Т. Н. [и др.]. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2019. – Т. 62. – № 4. – С. 283-289.

10. Исследование влияния микроструктуры непрерывнолитых заготовок рельсовой стали К76Ф на сопротивление пластической деформации / А. А. Уманский, М. В. Темлянцев, А. С. Симачев, Л. В. Думова. // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2020. – № 2. – С. 32-37.

11. Совершенствование режимов прокатки рельсовых профилей специального назначения при их производстве на универсальном рельсобалочном стане // А. А. Уманский, В. В. Дорофеев, А. В. Головатенко, А. В. Добрянский. // Черные металлы. – 2018. – № 10. – С. 38-42.

12. Разработка новых порошковых проволок для наплавки. Порошковые проволоки с использованием углеродфторсодержащих материалов для ремонта прокатных валков / Козырев Н. А., Крюков Р. Е., Усольцев А. А., Уманский А. А., Соколов П. Д. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – № 1 (1417). – С. 77-87.

13. Анализ и разработка калибровки прокатных валков для производства асимметричных рельсовых профилей в условиях универсального рельсобалочного стана / Дорофеев В. В., Уманский А. А., Головатенко А. В. [и др.]. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60. – № 12. – С. 941-947.

14. Уманский, А. А. Разработка теоретических основ определения энергосиловых параметров прокатки при освоении новых марок рельсовых сталей / А. А. Уманский, А. В. Головатенко, В. Н. Кадыков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60. – № 10. – С. 804-810.

15. Уманский, А. А. Совершенствование режимов прокатки железнодорожных рельсов в обжимных клетях универсального рельсобалочного стана / А. А. Уманский, А. В. Головатенко, В. Н. Кадыков // Черные металлы. – 2016. – № 11 (1019). – С. 16-21.

16. Повышение качества наплавленного слоя прокатных валков путем совершенствования состава порошковых проволок / Козырев Н. А., Кибко Н. В., Уманский А. А. [и др.]. // Технология машиностроения. – 2016. – № 10. – С. 26-31.

17. Уманский, А. А. Совершенствование режимов прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане с использованием методов физического моделирования процессов деформации / А. А. Уманский, А. В. Головатенко, В. Н. Кадыков // Производство проката. – 2016. – № 7. – С. 27-32.

18. Уманский, А. А. Исследование и разработка новых составов порошковой проволоки для наплавки прокатных валков, обеспечивающих повышение эксплуатационных характеристик наплавленного металла / А. А. Уманский, Н. А. Козырев, Д. А. Титов // Производство проката. – 2016. – № 5. – С. 43-47.

19. Кадыков, В. Н. Построение математической модели развития торцевой утяжки раската при реверсивной прокатке / В. Н. Кадыков, А. А. Уманский // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2006. – № 6. – С. 14-16.

Патенты и свидетельства о регистрации базы данных

20. Патент РФ 2661126, МПК В 23 К 35/36, В 23 К 35/368. Шихта порошковой проволоки / Козырев Н. А., Уманский А. А., Крюков Р. Е. [и др.]; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет» (RU). – № 2017121945, заявлено: 21.06.2017; опубл.: 11.07.2018. Бюл. №20.

21. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №202062081. Сопротивление пластической деформации рельсовых сталей марок 76ХФ, 76ХСФ, 90ХАФ / А. А. Уманский, А. С. Симачев, Л. В. Думова; правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет» (RU). – №2020620497; заявлено: 23.03.2020; опубл.: 20.05.2020.

Статьи в зарубежных изданиях (из списка Scopus, Web of Science)

22. Patterns of changes in the plastic and deformation characteristics of rail steels alloyed with chromium in the temperature range of hot rolling / A. A. Umansky, A. V. Golovatenko, A. S. Simachev, V. V. Dorofeev. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 866(1). – 012015.

23. Simachev, A. S. Research of non-metallic inclusions of E90KhAF rail steel / A. S. Simachev, T. N. Oskolkova, A. A. Umansky // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 866(1). – 012014.

24. Umansky, A. A. Analysis of the main trends in the development of the production of grinding balls in Russia and abroad / A. A. Umansky, A. V. Golovatenko, A. N. Prudnikov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 866(1). – 012032.

25. Umansky, A. A. The problems of mastering the production of special purpose railway products in the conditions of universal rail-and-structural steel mill / A. A. Umansky, A. V. Golovatenko, V. V. Dorofeev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 411. – 012076.

26. Golovatenko, A. V. Analysis of the main trends in the development of rail production in Russia and abroad / A. V. Golovatenko, A. A. Umansky, V. V. Dorofeev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 150. – 012002.

27. Golovatenko, A. V. Improvement of rolling modes of long length rails on the universal rail and structural steel mill "eVRAZ ZSMK" / A. V. Golovatenko, A. A. Umansky, V. N. Kadykov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 150. – 012028.

28. Development of mathematical models and methods for calculation of rail steel deformation resistance of various chemical composition / A. A. Umansky, A. V. Golovatenko, V. N. Kadykov, L. V. Dumova. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 150. – 012029.

Монографии

29. Кадыков, В. Н. Формирование качества стальных заготовок / В. Н. Кадыков, А. А. Уманский, Е. В. Протопопов. – Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ. – 2012. – 220 с.

Подписано в печать . . . 2021. Формат 60х84 1/16

Бумага писчая. Печать офсетная. Усл. печ. л.

Тираж 100 экз. Заказ

Отпечатано в редакции ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
индустриальный университет»

654007, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный р-н,
ул. Кирова, зд. 42