

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Штайгер Максим Григорьевич

**ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ МЕТАЛЛА
РЕЛЬСОВОГО СТЫКА В УСЛОВИЯХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ**

05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2021

Работа выполнена на кафедре «Машиностроительные технологии и материалы» Института «Авиамашиностроение и транспорт» ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент,
Балановский Андрей Евгеньевич

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

Фарбер Владимир Михайлович,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента
России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург,
профессор кафедры термообработки и
физики металлов;

Добужская Алина Борисовна,
кандидат технических наук,
АО «Уральский институт металлов»,
г. Екатеринбург, заведующий
лабораторией металловедения и
термообработки.

Защита состоится «24» июня 2021 года в 16:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.04.08 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (Зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=2238>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета  Селиванова Ольга Владимировна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Основными направлениями развития железнодорожного транспорта являются увеличение скорости подвижного состава, полезной нагрузки, надежности и безопасности его эксплуатации. Это требует существенного улучшения механических свойств колесных пар и рельсов, способных снизить износ и повысить сопротивляемость контактно усталостным разрушениям. По этим причинам металлургическими компаниями совместно с научно-исследовательскими организациями проведены интенсивные исследования, направленные на разработку нового способа дифференцированного упрочнения головки перлитных рельсов, приводящего к существенному сокращению межпластинчатого расстояния в структуре перлита. Рельсовые перлитные стали с межпластинчатым расстоянием $\sim 0,10-0,12$ мкм, характеризуются повышенной абразивной износостойкостью, усталостной прочностью и стойкостью к контактным и усталостным дефектам по сравнению с перлитной структурой после традиционной объёмной закалки. Эти исследования включены в основные требования к рельсовым сталям ГОСТ Р 51685-2013. В соответствии с планами развития ОАО «РЖД» до 2030 года в области верхнего строения пути основным направлением технической политики является расширение применения бесстыкового пути взамен звеньев, выполненного с использованием контактной сварки с оплавлением. Практика эксплуатации бесстыкового пути на российских железных дорогах показывает, что, несмотря на качественный состав рельсовой перлитной стали, разработанный отечественными металлургами, и оптимальные режимы сварки, предложенные специалистами ВНИИЖТ, количество дефектов сварных швов остается высоким.

Степень разработанности темы исследования. Большой объём исследований перлитных сталей проведен как отечественными (Л.И. Тушинский, В.Н. Гриднев, В.М. Счастливец, В.И. Изотов, А.А. Батаев, А.В. Макаров, Л.Г. Коршунов, Д.А. Мирзаев, И.Л. Яковлева, Т.И. Табатчикова, Р.А. Саврай и др.), так и зарубежными авторами (E.H Engel, R. Mehl, J.D. Embury, R.M. Ficher, H. Ohmori, A.T. Davenport, M. Gensamer, E.B. Pearsall, W.S. Pellini, J.R. Low и др.). Результаты исследований структурообразования, проведенных с использованием классической оптической микроскопии, фиксирующей только факт образования структур перлита, феррита, мартенсита, бейнита в зоне термического влияния рельсового стыка, вошли в нормативные документы, связанные с технологическим процессом контактной сварки рельсов оплавлением, последующей термообработкой и

контролем рельсового стыка. Они представлены в работах А.И. Николина, В.А. Резанова, Е.А. Шура, С.И. Кучук-Яценко, Л.А. Андреевой, В.М. Федина и других ученых.

Необходимо признать, что до сих пор при исследовании рельсовых сталей большое внимание уделялось изучению макроструктуры, механических и трибологических свойств при различных термических и механических воздействиях. В тоже время, такие важные параметры перлитной структуры рельсовой стали после дифференцированной закалки с прокатного нагрева и последующей сварке, отвечающие за прочностные и пластические свойства, как: 1) толщина цементитной пластины, 2) межпластинчатое расстояние, 3) размер перлитной колонии, перлитного блока, 4) малоугловые, большеугловые границы зёрен и субзёрен, пока не исследованы. Слабо освещены вопросы взаимосвязи морфологии перлита со свойствами сварных рельсовых стыков. Сказанное выше определяет актуальность постановки настоящих исследований. Это позволило сформулировать рекомендации по возможности управления параметрами перлитной структуры как в процессе производства рельсовой стали, так и в последующих способах обработки (сварка, термообработка, упрочнение и т.д.).

Целью работы является выявление структурных особенностей, способствующих повышению физико-механических свойств перлита, образующегося в высокоуглеродистых рельсовых сталях в условиях термомеханического воздействия в процессе сварки.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Исследован металл в зоне термического влияния со структурой тонкопластинчатого, грубопластинчатого и частично сфероидизированного перлита с использованием взаимодополняющих методов оптической, электронной и атомно-силовой микроскопии.

2. Исследованы структура, текстура металла зоны термического влияния (ЗТВ) рельсового стыка с использованием анализа картин дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD анализ) и установлены ее особенности на микро-, мезо- и макромасштабном уровне.

3. Определено влияние структуры перлита металла в ЗТВ на механические свойства.

4. Разработаны рекомендации по применению неразрушающего контроля металла в ЗТВ по оценке структуры и остаточных напряжений.

5. Разработаны рекомендации по корректировке параметров контактной сварки рельсовых стыков.

Объектом исследования является сваренный стык железнодорожного рельса для бесстыкового пути путевой инфраструктуры, имеющий поперечное сечение в виде простой геометрической фигуры, симметричной относительно одной или более осей.

Предметом исследования явились особенности структуры металла в зоне термического влияния на макро-, мезо- и микроуровнях, структурные изменения и механические напряжения, влияющие на эксплуатационную стойкость рельсового стыка.

Научная новизна

1. Исследование металла в зоне термического влияния рельсового стыка, полученного при помощи контактной сварки с оплавлением, впервые выполнено путём многоуровневого подхода (на микро-, мезо- и макромасштабном уровне) несколькими взаимодополняющими методами. Установлены особенности морфологии структуры перлитной рельсовой стали (прямолинейная форма пластин, прерывистая с разрывами и изогнутыми пластинами цементита в области линии сплавления). Найдено, что межпластинчатое расстояние, являющееся важным морфологическим признаком структуры перлита, меняется от 90 до 167 нм в пределах перлитной колонии и имеет отличия в продольном и поперечном направлениях. С ростом температуры аустенизации при сварке и последующем охлаждении межпластинчатое расстояние в перлите изменяется по ширине ЗТВ, что ответственно за неоднородность твердости и предела текучести металла в ЗТВ. Поскольку они связаны со средним межпластинчатым расстоянием в виде функции $\sim \lambda^{-1/2}$. В области линии сплавления средний размер зерна аустенита составляет 254 мкм и далее по мере удаления от нее снижается до 65,3 мкм на расстоянии 5 мм, 18,1 мкм – 10 мм.

2. Установлено, что в процессе контактной сварки оплавлением металла возникает существенная неоднородность структуры и текстуры на микро- и мезомасштабном уровне по всему локальному объёму рельсового стыка. Вблизи линии сплавления вследствие уменьшения размера зерна доля большеугловых границ зерен составляет 0,40-0,50 и увеличивается до значения $\sim 0,72$ на границе раздела частичной сфероидизации перлита. Увеличение доли малоугловых границ зерен до $0,6 \pm 0,02$ в области линии сплавления, связывается с накоплением дислокаций вследствие пластической деформации при осадке рельсов в процессе сварки в месте контактного соединения.

3. Показано, что при испытании на ударную вязкость величина фасетки излома уменьшается с уменьшением размера аустенитного зерна перлитного блока, при незначительном изменении размера перлитной колонии. В большинстве случаев трещины с ветвлением распространяются по нескольким смежным перлитным колониям и меняют

направление на границе блока. Доминирующей субструктурой, влияющей на ударную вязкость рельсовых сталей, является перлитный блок, определяемый как область, окруженная высокоугловыми $\Theta < 15^\circ$ границами феррита.

Теоретическая и практическая ценность работы

1. Данная работа развивает структурные и физические представления о явлениях, возникающих при высокотемпературном деформационном воздействии на высокоуглеродистые рельсовые стали в ЗТВ сварного стыка, морфологических особенностях перлита и количественных значений параметров структуры.

2. Представленные экспериментальные результаты по особенностям перлитной структуры в ЗТВ на различных масштабных уровнях могут быть использованы для корректировки технологических параметров (время сварки, усилие осадки и т.д.) существующих технологических линий сварки рельсов, а также для разработки новых способов сварки и термической обработки.

3. Сформулированы рекомендации по режимам термообработки, обеспечивающим минимизацию снижения твердости в ЗТВ рельсового стыка в процессе сварки.

4. Проведенные исследования будут рекомендованы соответствующим департаментам ОАО «РЖД» для организации контроля структурных характеристик металла ЗТВ рельсового стыка.

5. Предложено использовать метод на основе шумов Баркгаузена для неразрушающего контроля структуры металла при производстве рельса и в ЗТВ рельсового стыка после сварки.

6. Результаты исследований использованы при выполнении лабораторных работ: «Современные методы исследования полиморфных превращений в сталях» для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям «Материаловедение», «Технология, оборудование и система качества сварочного производства».

7. Результаты исследования используются в курсе лекции по дисциплине «Сварка давлением» и «Материаловедение при сварке» на кафедре «Машиностроительные технологии и материалы» ИрНИТУ.

Методология и методы исследования. Методологической основой исследования послужили труды ведущих отечественных и зарубежных ученых в области изучения перлитных сталей, зарубежные и государственные стандарты РФ, а также теоретические положения по влиянию структуры перлита на механические свойства сталей. Среднее истинное межпластинчатое расстояние (λ_0) было получено из электронных микрофотографий в соответствии с процедурой пересечения Андервуда, в которой автор

для оценки среднего истинного расстояния λ_0 рекомендует сначала определить среднее случайное расстояние λ_r . Для этого на электронную микрофотографию накладывается круглая тестовая сетка диаметром d_c . Подсчитывается количество n пересечений пластин карбида с испытательной сеткой. Эта процедура повторяется для ряда случайно выбранных полей. Затем средний случайный интервал λ_r вычисляется по формуле: $\lambda_r = \pi \cdot d_c \cdot nM$, где M - увеличение микрофотографии. Салтыков С.А. показал, что для перлита с постоянным интервалом внутри каждой колонии среднее истинное расстояние λ_0 связано со средним случайным интервалом λ_r соотношением: $\lambda_0 = 0,5\lambda_r$. Работа выполнена с использованием комплекса современных методов теоретического и экспериментального исследования: оптической, электронной и атомно-силовой микроскопии; анализа картин дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD анализ); механических испытаний; использованием методов математической статистики и вычислительного пакета прикладных программ Microsoft Office.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты металлографических исследований структуры с использованием оптической, электронной и атомно-силовой микроскопии.
2. Результаты оценки текстуры, суб-зеренной и зеренной структуры металла в зоне термического влияния.
3. Результаты фактографических исследований и критериев оценки сопротивляемости металлов контактно-усталостным повреждениям.
4. Результаты исследований распределения твердости и микротвердости в зоне термического влияния.
5. Результаты неразрушающего контроля твердости и остаточных напряжений в сварном стыке методом шумов Баркгаузена.

Содержание диссертации соответствует областям исследований паспорта научной специальности 05.16.09 – Материаловедение (по отраслям): 1. Теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры материалов, с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств, с целью обеспечения надежности и долговечности материалов и изделий; 2. Установление закономерностей физико-химических и физико-механических процессов, происходящих на границах раздела в гетерогенных структурах; 6. Разработка и совершенствование методов исследования и контроля структуры, испытание и определение физико-механических и эксплуатационных свойств материалов на образцах и изделиях; 11. Развитие методов прогнозирования и оценка остаточного ресурса материалов в машиностроении.

Достоверность полученных результатов определяется использованием при проведении экспериментов современных методов исследований, новейших измерительных приборов и аппаратуры, а также воспроизводимостью и непротиворечивостью результатов, полученных различными методами, и обеспечена применением широко известного математического аппарата; корректностью постановки задач; удовлетворительным совпадением результатов исследований с данными других авторов. Эксперименты проведены с должным количеством испытаний с использованием статистических методов оценки погрешности измерения. При математическом моделировании использованы лицензионные программные пакеты Siemens NX и ANSYS.

Личный вклад автора заключается в формулировании задач, подготовке исходных материалов, проведения экспериментов, обобщении экспериментальных данных и сопоставлении их с известными литературными данными, формулировании выводов по результатам исследований. Все результаты, приведенные в диссертации, получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на:

IX Международном Конгрессе «Цветные металлы и минералы-2017», г. Красноярск, 11–15 сентября 2017 г.; Международном семинаре «Комплексное оснащение лабораторий контроля качества», г. Санкт-Петербург, 18 апреля 2018 г.; VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации)», г. Иркутск, 26–28 апреля 2018 г.; Международной конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» 21–26 Мая 2018 г.; Международной научно-практической конференции «Байкал 2018», Ольхонский район, 11–20 июня 2018 г.; 13 Международная конференция «Современные проблемы машиностроения», г. Новосибирск, 12 - 14 декабря 2018 г.; IX Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации)», г. Иркутск, 24–26 апреля 2019 г.; X Международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона», г. Иркутск, 21 – 24 мая 2019 г.; X Международной научно-технической конференции «Инновации в машиностроения», г. Кемерово, 26 – 29 ноября 2019 г.

Публикации: По теме диссертации опубликованы 22 научные работы, из них в изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ – 8, в том числе 6 статей в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы. Работа содержит 248 страницы основного текста, 145 рисунков и 15 таблиц. Состоит из оглавления, введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 270 наименований.

Основное содержание работы

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы с обоснованием актуальности темы, отражены цель работы и задачи исследования, показана ее теоретическая и практическая значимость, научная новизна, степень достоверности и разработанности.

В первой главе представлен краткий обзор экспериментальных и теоретических работ, посвященных проблеме влияния структурных параметров рельсовой стали на механические и химические свойства. Дан обзор работ, посвященных сварке рельсовых сталей, методам исследования структуры, контролю рельсового стыка после сварки. По результатам изучения состояния вопроса были сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе описаны материалы исследования, методы механических испытаний и структурных исследований; проведены сравнительные исследования различных способов анализа структурного фактора в сварных стыках рельсовых сталей марки К76Ф. Химический состав стали К76Ф мас. %: 0,71-0,82 С; 0,25-0,6 Si; 0,75-1,25 Mn; до 0,025 S; до 0,025 P; 0,03- 0,15 V; до 0,04 Al по ГОСТ Р 51685-13. Исследуемые рельсовые стыки подвергались стандартной технологии сварки в соответствии с ТУ 0921-326-01124323-2015. Для подготовки образцов использовался фрезерный 5-ти координатный обрабатывающий центр DMG HSC75V Linear. Для изучения микрорельефа профилометр Taylor Hobson Form Talysurf i200 с компьютерным управлением. Для металлографических исследований применяли металлографические микроскопы Микромед МЕТ-2 и Axio Scop M2m (Carl Zeiss). Для измерения микротвердости микротвердомеры «Shimadzu HNV-2Т» и ПМТ-3. Исследование микроструктур, кристаллографических параметров материалов, качественный и количественный фазовый и элементный анализ веществ, проводили на двухлучевом сканирующем микроскопе (многолучевая система) JIB-4500, электронной пушкой LaB₆ и ионной пушкой выполняет функции сканирующего электронного микроскопа (далее «SEM») и сфокусированного ионного луча (далее «FIB»). Измерения амплитуды шумов Баркгаузена (магнитошумовой метод исследования) проводились с помощью цифрового анализатора Rollscan 300. Механические испытания проводили на сервогидравлической испытательной установке Instron 8801.

Третья глава посвящена исследованию и установлению взаимосвязи механических свойств зоны термического влияния сварного стыка (дисперсность, морфология и дефектность цементита) с особенностями перлитной структуры и характером разрушения рельсовой стали. Представлены результаты исследования структур с использованием оптической, электронной и атомно-силовой микроскопии, метода анализа картин дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD анализ).

Оптическая микроскопия. Основные наблюдаемые различия структуры в головке, шейке, подошве рельса заключались в геометрических размерах ЗТВ стыка, связанные с тепловой мощностью в процессе сварки и толщиной металла. Для минимизации описания представлены только результаты, полученные при исследовании в головке рельса, поскольку именно эта область обладает наибольшей однородностью исходной структуры, и в ней непосредственно происходит контакт колеса и рельса. Металлографический анализ подтвердил, что основным структурным элементом ЗТВ является пластинчатый перлит. Вдоль линии сплавления (ширина ~125 - 200 мкм) зафиксировано частичное обезуглероживание с выделениями доэвтектоидного феррита по границам аустенитных зерен (рис.1а). Здесь расстояние между пластинами цементита настолько велико, что хорошо наблюдается даже в оптическом микроскопе (рис.1а, 1б). Пластины цементита деформированы (см рис.1а-в). Размер перлитной колонии изменяется с расстоянием от центральной линии сварного шва до основного металла и напрямую связан с размером аустенитных зерен в конце сварки. Вследствие технологической операции осадки в конце процесса сварки расплавленный металл полностью вытесняется из стыка и происходит формирование сварного соединения в твердой фазе в условиях динамическая рекристаллизация. Размер аустенитного зерна и размеры перлитных колоний в каждой области металла ЗТВ зависят от пиковой температуры (на стадии нагрева термического цикла сварки).

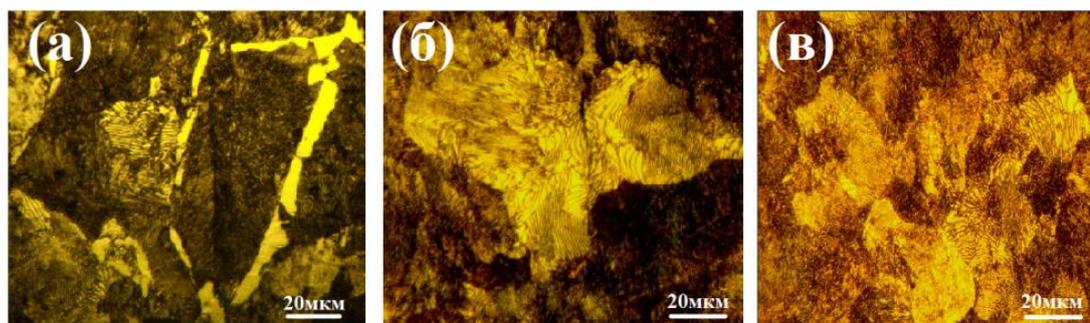


Рисунок 1 – Структура металла в ЗТВ рельсового стыка (оптический микроскоп): а - пластинчатый перлит и доэвтектоидный феррит (линия сплавления); б и в - пластинчатый перлит на расстоянии 2 и 4 мм от линии сплавления, соответственно

Термические циклы сварки показывают, что температура в области линии сплавления составляет 1200-1380°C, аустенитное зерно большое, что приводит к формированию на стадии охлаждения больших перлитных колоний. В тоже время в области ЗТВ средний размер колоний перлита уменьшается, поскольку колонии формируются из рекристаллизованного мелкого аустенита. Установлено, что вследствие низкой разрешающей способности оптической микроскопии в современных рельсовых сталях невозможно определить размеры колоний и морфологические свойства в тонкопластинчатом перлите (0,09-0,17 мкм).

Электронная микроскопия. Использование электронно-микроскопических методов исследований позволяет провести точные количественные измерения морфологических особенностей перлита в ЗТВ рельсового стыка. На рис. 2 представлены структура перлита с четкими изображениями цементитных и ферритных пластин, сфероидизированных частиц перлита в области высоко отпуска в ЗТВ. Было статистически обработано межпластинчатое расстояние в перлите. Определены два характерных параметра полностью перлитной микроструктуры: среднее истинное межпластинчатое расстояние и конкретный интерфейс перлитных колоний. В соответствии с ГОСТ Р 51685-2013 на рельсы, микроструктура головки термоупрочненных рельсов должна представлять собой пластинчатый перлит не выше 4-го балла по шкале ГОСТ 8233 (не более 0,60 мкм). В ней допускаются мелкие разрозненные участки феррита не выше 2-го балла по шкале 7 (95% перлита и 5% феррита) ГОСТ 8233, образования бейнита не допускается. Известно, что межпластинчатое расстояние в объемнозакаленных рельсах составляет 85-100 нм, в то время как в рельсах, закаленных с прокатного нагрева в зависимости от режима закалки, эта величина составляет 105-160 нм.

При исследовании дисперсности перлита установлена *первая особенность* – неоднородность дисперсности перлита по площади ЗТВ в сварном стыке от 80 нм до 320 нм, которая существенно больше структурной неоднородности исходного состояния рельсовой стали (зерна перлита, структурно свободного феррита и «псевдоперлита») рис.3.

Следующей особенностью перлита является строение цементитных пластин, имеющих дефекты формы, отверстия, расщепления, разрывы, разветвления, мостики, а также кривизну цементитных пластин, субструктуры, элементы, колонии и блоки.

На рис. 4, представлены гистограммы колоний и блоков перлита в областях металла ЗТВ рельсового стыка, нагретых до различных температур аустенизации во время сварки.

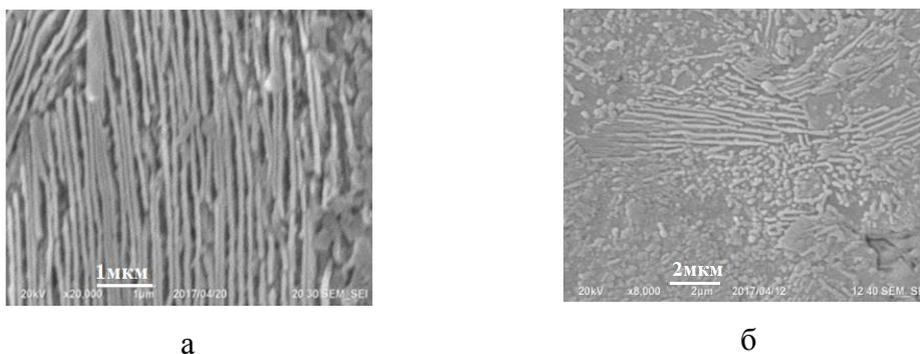


Рисунок 2 – Микроструктура перлита в ЗТВ (РЭМ):
 а - пластинчатый перлит; б - сфероидизированный перлит

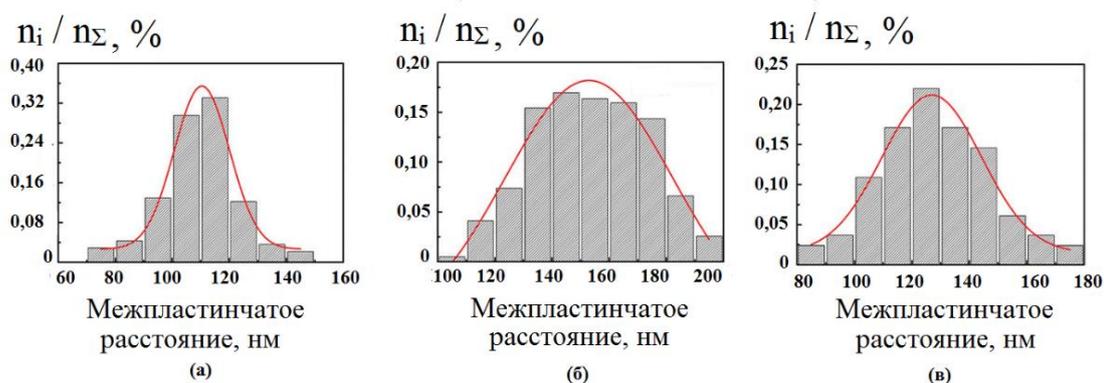


Рисунок 3 – Межпластинчатое расстояние в перлите: а – исходный рельс;
 б и в - после сварки на расстоянии 3 и 6 мм от линии сплавления, соответственно

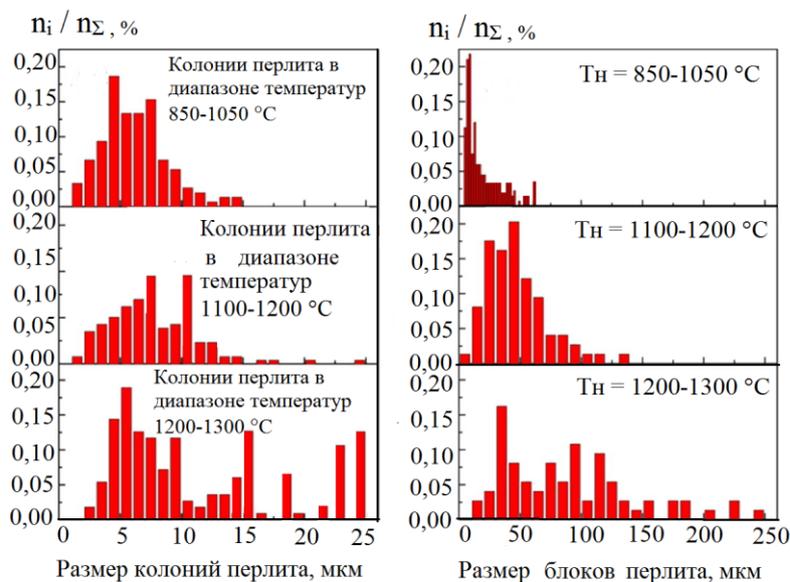


Рисунок 4 – Гистограммы распределения колоний и блоков перлита в областях металла
 ЗТВ рельсового стыка, нагретых до различных температур аустенизации во время
 сварки

Установлено, что всем образцам присуще узкое распределение по размеру перлитной колонии, практически не зависящее от размера зерна аустенита в диапазоне 4-25 мкм. Тем не менее, существует относительно широкий диапазон размеров перлитного блока (~250 мкм), особенно для крупных аустенитных зерен при температуре аустенизации ~1250 °С.

Атомно-силовая микроскопия дополнила и уточнила данные о морфологических параметрах структуры перлита. Обнаружено (рис. 5), что с уменьшением температуры аустенизации толщина пластинчатого цементита возрастает, а отношение толщины пластин цементита и феррита – увеличивается с ростом температуры аустенизации. Показано, что толщина пластин цементита (рис. 5) даже в пределах нескольких пластин не однородна, как и межпластинчатое расстояние в перлите (рис. 3, красный круг) и может по данным электронной микроскопии сместиться в большую сторону. В области с частичной трансформацией ЗТВ зафиксирована новая морфология перлита с частичной сфероидизацией цементита по длине цементитной пластины, что невозможно обнаружить оптическими методами контроля. В работе представлено обобщение полученных результатов в виде соотношения между твердостью и параметрами межпластинчатого расстояния, и морфологией перлита, перлитной колонии и размером аустенитного зерна в ЗТВ рельсового стыка.

Показано, что утоненные цементитные пластины создают меньшую деформацию несоответствия на когерентных границах феррит/цементит, что может ослабить концентрацию напряжений и предотвратить возникновение трещин. В более «толстом» (0,12 мкм) феррите больше плотность дислокации, где она постепенно заменяется скольжением в ограниченном слое. В связи с этим отношение толщины пластин цементит/феррит может применяться для оценки пластичности, особенно при сопоставимом межпластинчатом расстоянии и выступать в качестве структурного критерия для сопротивляемости контактно усталостному разрушению.

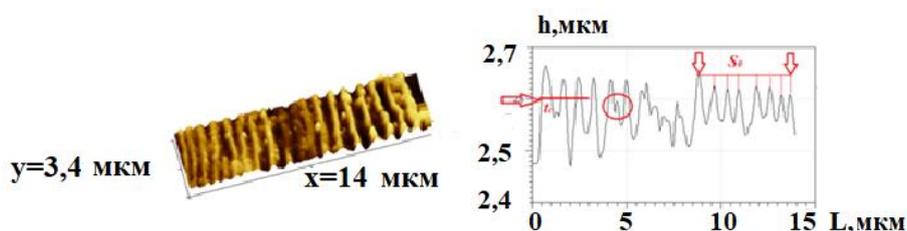


Рисунок 5 – Атомно-силовая микроскопия структуры перлита

Анализ картин дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD анализ). Известно, что ферритная фаза ВСС в перлитных сталях может быть проиндексирована с

помощью анализа EBSD. Анализ текстуры в области поверхности исходного рельса до сварки и на глубине 10 мм под поверхностью показывает достаточно изотропное распределение ориентации. Статистический анализ функции распределения аксиальных компонент текстуры $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$, $\langle 112 \rangle$, $\langle 113 \rangle$ и $\langle 115 \rangle$ составил 4,91, 8,87, 4,51, 14,3, 10,9 и 16,6% соответственно. Количество компонент $\langle 110 \rangle$, $\langle 112 \rangle$, $\langle 113 \rangle$ и $\langle 115 \rangle$ было относительно высоким, тогда как содержание $\langle 100 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ было сравнительно низким. В процессе сварки при приложении осадочного усилия число полос скольжения увеличивается (рис. 6). Системы скольжения скользили по направлению $\{110\} \langle 111 \rangle$ и $\{112\} \langle 111 \rangle$. Кристаллографический анализ в области линии сплавления выявил образование кристаллов ориентации $(110) [11\bar{3}]$ - Госс $(110) [001]$. Анализ макротекстуры с помощью рентгеновской дифракции дает количественную информацию о распределении кристаллографических ориентаций и ориентации зерен, возникающих в процессе производства рельса, последующей сварки и термообработки, также возможно позволяет оценить неоднородность кристаллографической текстуры по глубине поверхности рельса, связанной с деформацией при трении между колесами и рельсом во время движения поездов. Использование данного метода в наших дальнейших работах позволит проследить эволюция микроструктуры и кристаллографической ориентации в различных участках ЗТВ.

Проведенные исследования перлитной структуры рельсовой стали на основе многоуровневого подхода несколькими взаимодополняющими методами позволили выдвинуть гипотезу, что в зоне сварного стыка формируется новый материал, отличающийся по химическому составу и свойствам от основного металла рельса. Формирования в различных участках в линии сплавления доэвтектоидного феррита является доказательством различия в химическом составе материала сварного рельсового стыка (снижение содержания углерода) по сравнению с основным металлом рельса.

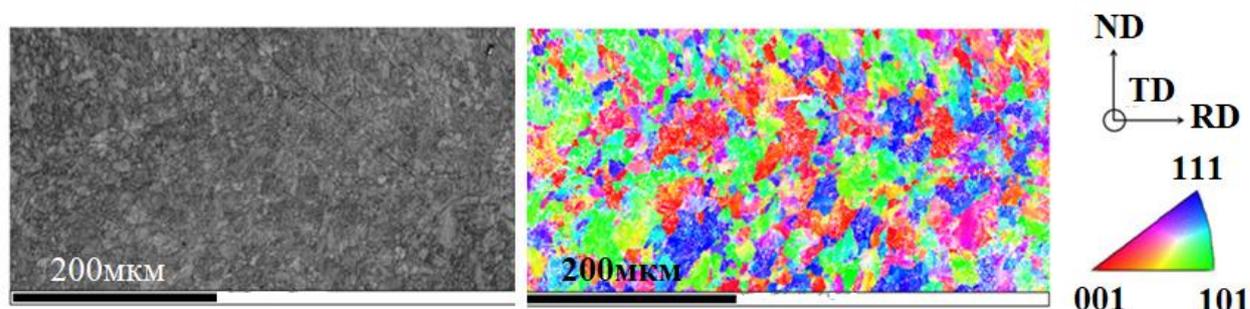


Рисунок 6 – Карта контрастов зернёной структуры и ориентировка по плоскостям скольжения

Отношение структура - свойство нового материала в ЗТВ рельсового стыка характеризуется сильной неоднородностью. С учетом результатов исследований структуры предложены критерии оценки качества металла в ЗТВ стыка.

Например, микроструктурный параметр качества (морфология пластин, межпластинчатое расстояние, размер перлитных блоков и колоний, размер аустенитного зерна, размер сфероидизированных частиц цементита, отношение пластинчатого и сфероидизированного перлита, количество доэвтектоидного феррита в области сплавления). В качестве первого шага предлагаются критерии характерного размера X микроструктуры металла в ЗТВ стыка. Выбрано отношение межпластинчатого расстояния в перлите исходного основного металла рельса и в зоне термического влияния. За единицу принято среднее значение межпластинчатого расстояния в перлите в головке рельса для стали К76Ф на глубине 5мм, т.е. $l=132\text{нм}$ в исходном состоянии. Микроструктурный параметр качества (МПК) равный: $0,75-0,91 < 1$ – соответствует хорошему качеству микроструктуры рельсового стыка ($\lambda=145-185\text{нм}$), сокращено – МПК₁; уменьшение МПК до $0,66-0,75 < 1$ – среднее качество микроструктуры ($\lambda=185-200\text{нм}$) – МПК₂; МПК в диапазоне $0,47- 0,66 < 1$ – рассматривается как низкое качество микроструктуры ($\lambda=200-280\text{нм}$) – МПК₃.

В четвертой главе рассмотрены вопросы контроля структуры в ЗТВ рельсового стыка с учетом новых экспериментальных данных, полученных с использованием современных методов исследований. Установлено, что механические свойства металла ЗТВ сварного стыка отличаются от свойств основного металла рельса. По таким показателям как временное сопротивление есть небольшое снижение. Предел текучести, наоборот, демонстрирует незначительное увеличение, существенное различие зафиксировано в относительном сужении. Показано, что с повышением температуры аустенизации в ЗТВ сварного стыка прочность на растяжение и относительное удлинение рельсовой стали постепенно уменьшаются, но энергия разрушения образца при испытаниях на ударную вязкость практически не изменяется. Размер зерна аустенита влияет на прочность не так сильно, как другие параметры перлитной структуры, например, межпластинчатое расстояние.

Обнаружено, что ударная вязкость основного металла рельса в области шейки либо находится на минимуме требований (не менее 15 Дж/см^2), либо в диапазоне $7-12 \text{ Дж/см}^2$, что не соответствует требованиям ГОСТ Р 51685-2013 (рис.7). Стабильные показатели по ударной вязкости, соответствующие нормативу, зафиксированы у подошвы рельса. Головка рельса показывает нестабильные значения ударной вязкости. Изучении влияния

микроструктурных параметров на ударную вязкость в перлитных сталях с помощью регрессионного анализа показало, что размер перлитной колонии является важным параметром, т.к. границы колоний могут выступать в качестве препятствий для распространения трещин расщепления.

Найдено, что в образце с небольшим (до 20 мкм) аустенитным зерном грани расщепления часто образуются отдельными перлитными колониями, тогда как в образце с крупным зерном аустенита (до 300 мкм) один фасет расщепления обычно содержит несколько колоний. Наши исследования ориентационных отношений между перлитными колониями показали, что для того, чтобы создать единый фасет расщепления соседние колонии должны иметь ориентацию, близкую к ориентации феррита. Неоднородное распределение ударной вязкости у основного металла рельса и металла в ЗТВ рельсового стыка показано на рис. 7. На рис. 8 приведена микроструктура граней скола образца рельсового стыка в области линии сплавления.

Около 70% всех границ блоков могут эффективно препятствовать распространению трещины. Для остальных границ, через которые проходит трещина, примерно у половины смежных блоков наблюдаются углы разориентации между их ферритными плоскостями $\{100\} < 15^\circ$, тогда как разориентация остальных границ находятся в диапазоне $15-50^\circ$.

Схема вырезки образцов

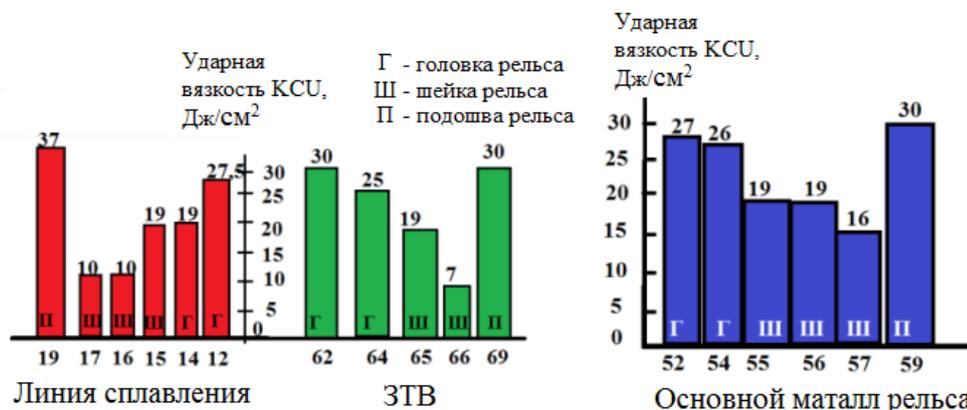
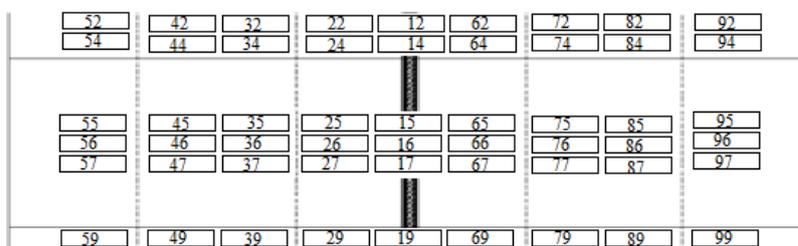
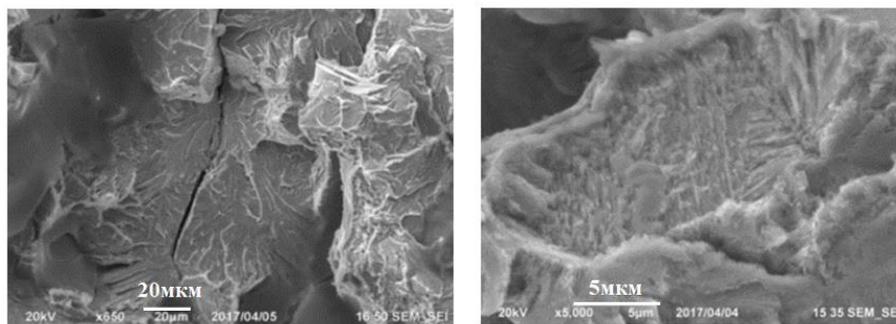


Рисунок 7 – Гистограмма значений ударной вязкости в сварном рельсовом стыке (линия сплавления, ЗТВ) и у основного металла



а

б

Рисунок 8 – Поверхность разрушения образца рельсового стыка после испытаний на ударную вязкость: а - в области линии сплавления, б - фасетка расщепления трещины ударного образца в области линии сплавления

По сечению рельсового стыка существуют не только локальные области низких значений ударной вязкости (шейка по линии сплавления, см. рис.7), но и целые обширные зоны (рис.9). Установлено, что механические свойства металла перлита в ЗТВ рельсового стыка могут быть связаны с микроструктурными параметрами: межпластинчатый расстоянием, размером колоний и блоков. Показано, что межпластинчатое расстояние контролирует прочность пластинчатого перлита. Исследованиями влияния микроструктурных параметров на ударную вязкость в перлитных сталях с помощью регрессионного анализа установлено, что размер перлитной колонии является важным параметром, а границы колоний могут выступать в качестве препятствий для распространения трещин расщепления.

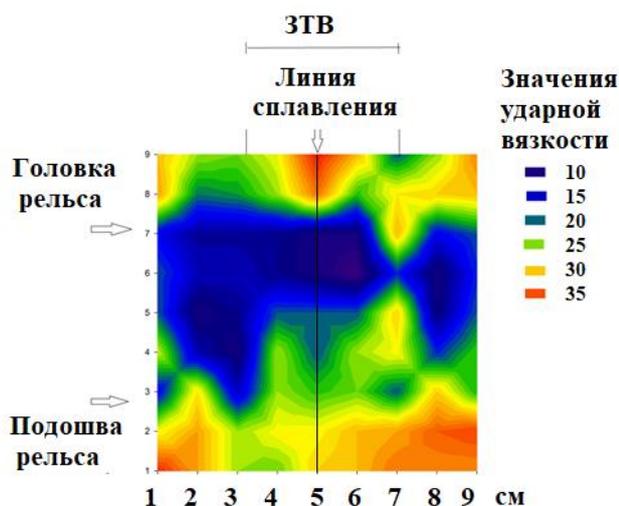


Рисунок 9 – Картирование значений ударной вязкости в рельсовом стыке по линии сплавления и ЗТВ

На рис. 10 представлены зависимость шумов Баркгаузена-твердость, на основании которого разработаны рекомендации по совершенствованию технологии сварки рельсового стыка и последующего контроля качества структуры. С целью контроля этих параметров были проведены исследования реальных сварных стыков.

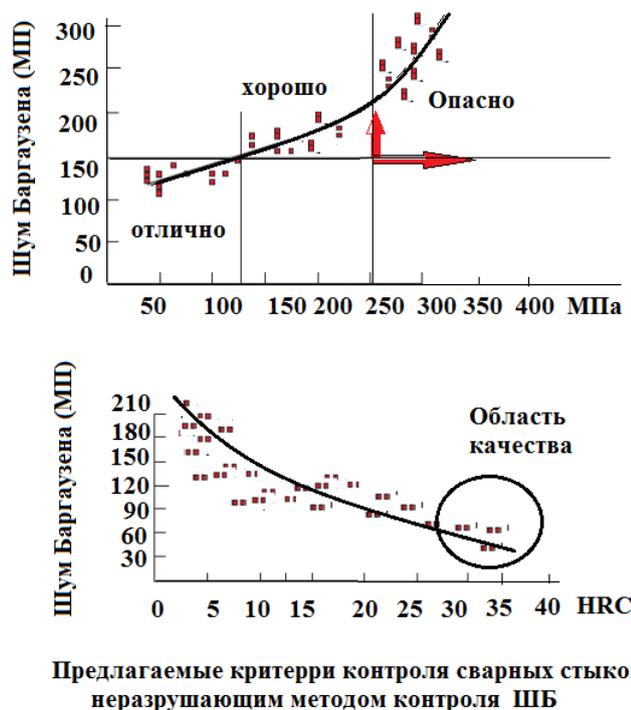


Рисунок 10 – Графики оценки качества сварки рельсовых стыков на рельсосварочных предприятиях

На основании анализа существующих способов неразрушающего контроля структуры был выбран способ магнитных шумов Баркгаузена вследствие высокой чувствительности к структурным и деформационным изменениям в поверхностном слое металла (до 3мм). Для отработки методики из основного металла и ЗТВ были вырезаны пластинки для тарировки на приборе четырехточечного изгиба и образцы для тарировки твердости. Для всех структурных состояний были построены тарированные графики соотношения магнитных шумов с остаточными напряжениями и твердостью.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате выполнения диссертационной работы, направленной на установление особенностей влияния структуры металла на эксплуатационные свойства рельсового стыка, получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ структуры рельсового стыка в зоне термического влияния и по линии сплавления. Установлены основные структуры металла в ЗТВ рельсового стыка: доэвтектоидный феррит, перлит различной морфологии (пластинчатый, сфероидизированный, вырожденный). Показано, что для оценки качества сварки и термообработки рельсового стыка оптическая металлография не обладает достаточной разрешающей способностью и не способна обеспечить количественные измерения морфологических параметров структуры перлита.

2. Электронной микроскопией определены основные морфологические особенности структуры перлита металла в ЗТВ рельсового стыка: межпластинчатое расстояние, толщину ферритной и цементитной пластин, размеры перлитной колонии и перлитного блока. Показана высокая неоднородность дисперсности перлита в ЗТВ по объёму рельсового стыка. Неоднородность дисперсности перлита в головке рельса составляет 60-140нм, в шейке – 120-185 нм, в подошве – 110-196нм.

3. Показано, что размер аустенитного зерна и, следовательно, размеры перлитных колоний в каждой области ЗТВ рельсового стыка зависят от пиковой температуры в момент сварки. Размер зерна аустенита в области линии сплавления составляет 254 мкм и далее по мере удаления от нее снижается до 65,3 мкм (расстояние 5 мм), 18,1 мкм (расстояние 10 мм). В области линии сплавления формируются перлитные колонии размером 30-55 мкм. В области рафинирования зерна средний размер колонии перлита составил 9 мкм, поскольку они сформированы из рекристаллизованного мелкого аустенита.

4. Найдена модификация перлита с частичной сфероидизацией цементита, отличающаяся от чисто сфероидизированной морфологии тем, что цементитные пластинки внешне выглядят, как пластиночные, но уже диспергированы и сформированы в многочисленные сферы, которые находятся в площади «материнской» пластины цементита и имеют низкие значения микротвердости.

5. Установлено, что характерной особенностью перлитной структуры металла ЗТВ являются ее дефектность и несовершенство в виде разрывов, разветвлений, отверстий, мостиков и искривлений, изгибов и кривизны цементитных пластин в перлитной колонии. На основе зафиксированных особенностей структуры перлита вычислены параметры качественных отношений, в частности, соотношение толщин пластин цементита и феррита для каждой области ЗТВ.

6. Показано, что механические свойства металла со структурой перлита в ЗТВ рельсового стыка связаны с микроструктурными параметрами (межпластинчатым расстоянием, размером колонии и размером блока, толщиной ферритной и цементитной

пластины). Установлено, что межпластинчатое расстояние строго контролирует прочность пластинчатого перлита. С помощью регрессионного анализа микроструктурных параметров установлено, что размер перлитной колонии является важным структурным параметром, контролирующим ударную вязкость, т.к. границы колоний могут выступать в качестве препятствий для распространения трещин расщепления. Установлено, что около 70% измеренных большеугловых границ варьирующиеся в диапазоне от 19° до 33° могут эффективно препятствовать распространению трещины.

7. С помощью фрактографического анализа найдено, что размер граней скола на поверхностях разрушения варьируется от нескольких микрон до нескольких десятков микрон. Показано, что размер зерна аустенита (в диапазоне от 20 до 60 мкм) не влияет на ударную вязкость. Блоком управления ударной вязкости рельсовой стали является размер перлитной колонии.

8. Предложено рассматривать металл в ЗТВ сварного стыка как новый материал, отличающийся по химическому составу и структуре от рельсовой стали, и оценивать его по параметрам качества, используя на первом этапе микроструктурный параметр качества МПК, определяемый на основе отношения межпластинчатого расстояния ($0,75-0,91 < 1$) рельсовой стали и металла ЗТВ сварного стыка. Определены три диапазона изменения МПК, отражающие качество микроструктуры рельсового стыка. Предложено использовать текстурный, микроструктурный и мезоструктурный параметры качества металла, отражающие ориентацию зерен в плоскости скольжения, морфологию пластин, межпластинчатое расстояние, размеры перлитных блоков, колоний и аустенитного зерна, а также отношение малоугловых и большеугловых границ зерен.

9. Установлено, что в сварном рельсовом стыке зона снижения твердости связаны с соотношением в структуре пластинчатого и сфероидизированного перлита. Показана возможность регулирования этого соотношения за счет скорости охлаждения ($3-9^\circ\text{C}/\text{с}$) металла в интервале температур $500-700^\circ\text{C}$ после сварки и управления показателями твердости в этой области ЗТВ. Предложены рекомендации по корректировке технологии сварки с целью уменьшения доли сфероидизированного перлита в ЗТВ сварного стыка за счет регулирования скорости охлаждения после сварочного цикла.

10. Показано, что определенный с помощью метода шумов Баркгаузена характер изменения магнитоупругого параметра поперек сварного шва рельсового стыка совпадает с профилем распределения макро- и микротвердости. Контроль твердости и остаточных напряжений в ЗТВ сварного стыка осуществляют с помощью калибровочных графиков. Исходя из этих положений предложен метод неразрушающего контроля структурного

фактора и остаточных напряжений в ЗТВ рельсового стыка. Данный метод контроля микроструктуры рекомендован к внедрению в РСР по сети дорог ОАО «РЖД» в качестве дополнительного способа, неразрушающего контроля качества сварного стыка рельса.

Публикации по теме диссертации

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. Штайгер, М.Г. Анализ технологий для сварки высокопрочных рельсов с позиции структурообразования при строительстве и реконструкции скоростных железнодорожных магистралей. Часть 1 / **М.Г. Штайгер**, А.Е. Балановский // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22. – № 6 (137). – С. 48-74; 1,7 п.л. / 1,5 п.л.

2. Штайгер, М.Г. Анализ технологий для сварки высокопрочных рельсов с позиции структурообразования при строительстве и реконструкции скоростных железнодорожных магистралей (обзор). Часть 2 / **М.Г. Штайгер**, А.Е. Балановский // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22. – № 7 (138). – С. 41-68; 1,7 п.л. / 1,5 п.л.

3. Shtayger, M.G. Application of scanning electronic microscopy for metallography of welded joints of rails / **M.G. Shtayger**, A.E. Balanovsky, V.V. Kondratev, A.I. Karlina, A.S. Govorkov // Advances in Engineering Research Proceedings of the International Conference "Aviamechanical engineering and transport" (AVENT 2018). – 2018. – Vol. 158. – P. 360-364.; 0,3 п.л. / 0,1 п.л. (Web of Science)

4. Balanovsky, A.E. Comparative analysis of structural state of welded joints rails using method of Barkhausen effect and ultrasound / A.E. Balanovsky, **M.G. Shtayger**, V.V. Kondratev, A.I. Karlina, A.S. Govorkov // Journal of physics: conference series. – 2018. – Vol. 1118(1). – P. 012006.; 0,45 п.л. / 0,2 п.л. (Scopus)

5. Konstantinova, M.V. Application of plasma surface quenching to reduce rail side wear / M.V. Konstantinova, A.E. Balanovskiy, V.E. Gozbenko, S.K. Kargapoltsev, A.I. Karlina, **M.G. Shtayger**, E.A. Guseva, B.O. Kuznetsov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560(1). – P. 012146.; 0,45 п.л. / 0,2 п.л. (Scopus)

6. Guseva, E.A. Comparative evaluation of corrosion resistance of wheel and rail steels in various media / E.A. Guseva, S.K. Kargapoltsev, A.E. Balanovskiy, A.I. Karlina, **M.G. Shtayger**, V.E. Gozbenko, M.V. Konstantinova, A.V. Sivtsov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560(1). – P. 012181.; 0,4 п.л. / 0,2 п.л. (Scopus)

7. Kolosov, A.D. Comparative evaluation of austenite grain in high-strength rail steel during welding, thermal processing and plasma surface hardening / A.D. Kolosov, V.E. Gozbenko, **M.G. Shtayger**, S.K. Kargapoltsev, A.E. Balanovskiy, A.I. Karlina, A.V. Sivtsov, S.A. Nebogin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560(1). – P. 012185.; 0,4 п.л. / 0,2 п.л. (Scopus, Web of Science)

8. Shtayger, M.G. Investigation of macro and micro structures of compounds of high-strength rails implemented by contact butt welding using burning-off / **M.G. Shtayger**, A.E. Balanovskiy, S.K. Kargapoltsev, V.E. Gozbenko, A.I. Karlina, Yu.I. Karlina, A.S. Govorkov, B.O. Kuznetsov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560(1). – P. 012190.; 0,45 п.л. / 0,2 п.л. (Scopus)

Другие публикации:

9. Штайгер, М.Г. Инспекционная деятельность ЦТА в путевом комплексе / **М.Г. Штайгер** // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 3. – С. 14-17.; 0,25 п.л. / 0,25 п.л.

10. Штайгер, М.Г. Проблемы качества компонентов путевого комплекса / **М.Г. Штайгер** // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 12. – С. 6-9.; 0,25 п.л. / 0,25 п.л.

11. Штайгер, М.Г. Улучшение эксплуатационных свойств рельсов путём снижения совокупности неметаллических включений в рельсовой стали, возникающих вследствие примесей в легирующем ферросилиции / **М.Г. Штайгер**, А.И. Лисицын, С.В. Палкин, К.С. Елкин, А.Е. Балановский, В.В. Кондратьев, А.И. Карлина // Сборник докладов Девятого международного конгресса «Цветные металлы и минералы – 2017», 11-15 сентября 2017 г., г. Красноярск, Россия. – С. 824-831.; 0,5 п.л. / 0,25 п.л.

12. Штайгер, М.Г. Использование методов сканирующей электронной микроскопии для металлографии рельсовых сталей / **М.Г. Штайгер**, Н.Н. Иванчик, А.И. Лисицын, А.И. Карлина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 4 (56). – С. 189-196.; 0,5 п.л. / 0,2 п.л.

13. Штайгер, М.Г. Сравнительный анализ современных методов исследования структуры рельсовой стали / **М.Г. Штайгер**, А.Е. Балановский // Сборник трудов VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации)», 26-28 апреля 2018 г., г. Иркутск, Россия. – С. 111-120.; 0,6 п.л. / 0,4 п.л.

14. Штайгер, М.Г. Применение методов сканирующей электронной микроскопии для металлографии сварных стыков рельсов / **М.Г. Штайгер**, А.Е. Балановский, В.О. Маласова // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Байкал – 2018», 11-20 июня 2018 г., Ольхонский район, Россия. – С. 317-323.; 0,45 п.л. / 0,2 п.л.

15. Штайгер, М.Г. Результаты металлографического и рентгеновского микроанализа участков рельса категории ДТ350 / **М.Г. Штайгер**, А.Е. Балановский, Н.Н. Иванчик, Б.О. Кузнецов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* – 2018. – № 2 (58). – С. 98-106.; 0,55 п.л. / 0,2 п.л.
16. Штайгер, М.Г. Технология подготовки образцов сварного стыка рельса для комплексного исследования / **М.Г. Штайгер**, А.Д. Колосов, А.Е. Балановский // *Сборник докладов XI Всероссийской научно-практической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири», 27-28 ноября 2018 г., г. Иркутск, Россия.* – С. 72-77.; 0,4 п.л. / 0,2 п.л.
17. Штайгер, М.Г. Современные методы исследования сварных стыков рельсов / **М.Г. Штайгер** // *Сборник трудов IX Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации)», 24-26 апреля 2019 г., г. Иркутск, Россия.* – С. 61-73.; 0,8 п.л. / 0,8 п.л.
18. Штайгер, М.Г. Исследование структуры соединений высокопрочных рельсов, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением / **М.Г. Штайгер** // *Транспортная инфраструктура Сибирского региона.* – 2019. – Т. 1. – С. 567-573.; 0,45 п.л. / 0,45 п.л.
19. Штайгер, М.Г. Применение метода шумов Баркаузена для оценки структуры сварного стыка рельса / **М.Г. Штайгер** // *Сборник трудов X Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении», 26-29 ноября 2019 г., г. Кемерово, Россия.* – С. 443-449.; 0,45 п.л. / 0,45 п.л.
20. Nguyen, Van Chie. Increase in corrosion resistance of carbon steel surface due to plasma surface modification with powder mixtures of NiCrBSi alloy and chrome carbide / Van Chie Nguyen, A.E. Balanovskiy, A.N. Baranov, E.A. Guseva, V.V. Kondrat'ev, **M.G. Shtayger**, A.I. Karlina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2021. – Vol. 1103. – P. 012022.; 0,7 п.л. / 0,4 п.л.
21. Astafyeva, N.A. Structure of the surface layer and the microhardness of highcarbon instrumental steel after laser treatment / N.A. Astafyeva, S.K. Kargapol'tsev, V.E. Gozbenko, Yu.I. Karlina, **M.G. Shtayger**, A.I. Karlina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2021. – Vol. 1111. – P. 012004.; 0,5 п.л. / 0,25 п.л.
22. Nguyen, Van Chie. Influence of plasma arc power on the melting of the envelope layer containing NiCrBSi alloy and the surface coating quality during plasma heating / Van Chie Nguyen, A.E. Balanovskiy, S.K. Kargapol'tsev, V.E. Gozbenko, Yu.I. Karlina, **M.G. Shtayger**, A.I. Karlina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2021. – Vol. 1111. – P. 012044.; 0,5 п.л. / 0,25 п.л.