

На правах рукописи



ШЕВЧЕНКО Роман Алексеевич

**РАЗРАБОТКА СПОСОБА И ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
РЕШЕНИЙ ПРОЦЕССА СВАРКИ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО
УПРОЧНЕННЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ**

Специальность 2.5.8. Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2021

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Козырев Николай Анатольевич**

Официальные оппоненты:

Воронин Николай Николаевич - доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (МИИТ), профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава»

Борц Алексей Игоревич - кандидат технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «ЕвразХолдинг» (ООО «ЕвразХолдинг»), директор по развитию рельсового проката

Ведущая организация:

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»)

Защита состоится «12» ноября 2021 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании на заседании диссертационного совета 24.1.135.02 (Д003.038.02) на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН) по адресу: 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, д. 2/4, e-mail: sbuyakova@ispms.tsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФПМ СО РАН, а также на официальном сайте ИФПМ СО РАН: <http://www.ispms.ru/>

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



С.П. Буюкова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Железнодорожная отрасль РФ имеет стратегическое значение. Она является связующим звеном единой экономической системы, обеспечивает стабильную деятельность промышленных предприятий, своевременный подвоз жизненно важных грузов в самые отдаленные уголки страны, а также является самым доступным транспортом для миллионов граждан. По данным ОАО «РЖД» на 2019 год развернутая длина главных путей является одной из самых протяженных в мире и составляет свыше 124 тыс. км. Одним из основных элементов строения железных дорог являются рельсы. На сегодня, как на железных дорогах Российской Федерации, так и за рубежом, происходит отказ от звеньевой конструкции пути. Одним из основных недостатков звеньевого пути является наличие стыка. Развитие технологий, позволяющих обеспечить возможность получения бесстыкового железнодорожного пути, является актуальным направлением в настоящее время. Следует принимать во внимание, что эксплуатация железнодорожного пути в стране происходит в сложных климатических и эксплуатационных условиях (в стране используются пути совмещенного типа, а не как в Европейских странах - отдельно для промышленного и пассажирского потока).

Сварные соединения являются слабыми участками бесстыкового пути для всех случаев движения (в случае скоростного, высокоскоростного движения и тяжеловесного движения). За 2018 год 56 % изломов рельсов произошло по причине излома по сварному стыку, выявлено 15 % остродефектных рельсов в зоне сварных стыков. Причины этого заключаются в изменении однородности микроструктуры в зонах сварного шва и термического влияния; создании неблагоприятной эпюры внутренних остаточных напряжений; создании при сварке условий для образования внутренних дефектов, являющихся концентраторами напряжений и ослабляющих участок рельса со сварным швом; короблении рельса в зоне сварного шва с последующим образованием «седловин» при эксплуатации. Создание рельсов с ресурсом более 1500 – 2000 млн т возможно только при комплексной оптимизации металлургического качества, структуры металлической матрицы, эпюры остаточных напряжений и прямолинейности.

Диссертационная работа выполнена при финансовой поддержке ФГБУ «Фонд содействия развития малых форм предприятий в научно-технической сфере» в рамках реализации НИР (договор № 11866ГУ/2017 от 03.07.2017 г.) «Разработка технологии сварки и термообработки железнодорожных рельсов, предназначенных для высокоскоростного движения», а также при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках реализации НИР (договор № 20-48-420003\20 от 20.12.2020 г.) «Развитие физико-химических и технологических основ создания принципиально нового способа сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов».

Степень разработанности проблемы

В настоящее время наибольшее распространение получил электроконтактный способ сварки рельсов методом пульсирующего оплавления. Считается, что данный метод наиболее экономичен и технологичен в сравнении с непрерывным оплавлением. При контактной сварке рельсов, так же, как и при других видах сварки происходит нагрев и непрерывное охлаждение металла в зоне термического влияния. При быстром нагреве сварного стыка, которое обеспечивается методом пульсирующего оплавления и

последующим интенсивным охлаждением зоны термического влияния на месте микрообъемов с повышенным содержанием хрома, никеля и углерода формируется высокопрочный слой со структурой мартенсита. Участки мартенсита играют роль концентраторов напряжения и приводят к образованию дефектов в сварных стыках (развитие усталостных трещин в головке, шейке и подошве рельса с хрупким изломом). Данная проблема в процессе изготовления бесстыкового пути при сварке рельсов решается обязательной локальной термической обработкой сварного стыка. Термическая обработка сваренных стыков включает в себя закалку поверхности катания головки рельса и нормализацию подошвы и шейки. Локальная термическая обработка сварного стыка приводит к увеличению и появлению новых зон термического влияния по сравнению с зонами при сварке рельсов электроконтактным способом без термической обработки. В результате зона с пониженной твердостью приводит к локальному повышенному износу поверхности катания головки, происходит смятие и выкрошивание. На сегодняшний день проблема получения сварного соединения рельсов с малой протяженностью зоны термического влияния при достаточной пластичности не решена.

Цель работы

Разработать и обосновать способ сварки железнодорожных рельсов повышенной износостойкости без дополнительной локальной термической обработки, снижающий объем дефектных структур в сварном шве и в зоне термического влияния.

Для достижения цели необходимо решить следующие частные задачи

1. Исследовать закономерность образования зон с пониженной твердостью в сварных соединениях железнодорожных рельсов, полученных электроконтактным способом.
2. Разработать лабораторное оборудование для контактной стыковой сварки оплавлением с возможностью управления охлаждением металла после сварки и исследовать влияние кратковременного воздействия электрического тока во время охлаждения рельсовой стали после электроконтактной сварки на структуру сварного шва и зон термического влияния.
3. Провести промышленное опробование разработанного способа электроконтактной сварки железнодорожных рельсов и определить оптимальные параметры охлаждения сварного соединения рельсов при использовании кратковременного воздействия электрического тока, поддерживающего заданную температуру, необходимую для формирования требуемой структуры сварного соединения и минимальной зоны термического влияния.

Научная новизна

1. Установлена закономерность формирования структуры металла сварного соединения, на основании проведенного моделирования положения критических точек и областей фазового равновесия для рельсовой стали 76ХСФ с помощью пакета программ Thermo-Calc® Version 2019b и исследования распределения температуры при электроконтактной стыковой сварке оплавлением и последующем кратковременном воздействии электрического тока на определенном этапе охлаждения сварного соединения, показана возможность снижения протяженности зоны термического влияния и изменения показателей микротвердости в сварном соединении.

2. Определено и научно обосновано влияние длительности и количества импульсов кратковременного воздействия электрического тока на структуру металла сварного соединения рельсов из электростали 76ХСФ.

3. Экспериментально подтверждено положительное влияние кратковременного воздействия электрического тока во время охлаждения рельсового стыка после сварки на результаты испытаний статического трехточечного изгиба по СТО РЖД 1.08.002-2009 рельсов типа Р65 категории ДТ350.

Практическая значимость, реализация результатов

1. На основании установленных закономерностей формирования структуры сварного соединения при электроконтактной стыковой сварки оплавлением разработан способ контактной стыковой сварки рельсов без использования дополнительной локальной термической обработки (патент РФ № 2641586, патент РФ № 2725821), позволяющий получить минимальную, по сравнению с локальной термической обработкой, протяженность зоны термического влияния с пониженной твердостью.

2. Разработана машина для контактной стыковой сварки и программа работы сварочной машины для производства длиномерный рельсовых плетей, позволяющая без использования дополнительной локальной термической обработки получать требуемую структуру и твердость металла сварного соединения (патент РФ № 2683668).

3. При проведении промышленного опробования на предприятии СТП ООО "РСР-М" (РСР-29) определено, что применение предлагаемого способа позволяет снизить себестоимость одного сварного стыка с 6 315 руб. до 5 522 руб.

4. Результаты научно-квалификационной работы используются в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» (СибГИУ) в учебном процессе при подготовке бакалавров, обучающихся по направлению 22.03.02 «Металлургия», направленность «Металлургия сварочного производства» и магистрантов по направлению 22.04.02 «Металлургия».

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты термодинамического моделирования, показывающие, что для стали 76ХСФ в зависимости от содержания легирующих элементов нагрев до температур в интервале 725 – 840 °С и последующее охлаждение приводит к образованию зернистого перлита, что в свою очередь приводит к снижению твердости.

2. Совокупность экспериментальных данных, устанавливающих взаимосвязь между протеканием кратковременных импульсов электрического тока через сварное соединение рельсов после контактной стыковой сварки пульсирующим методом оплавления и образованием закалочных структур в металле сварного шва и зоне термического влияния.

3. Обоснование увеличения показателей статического трехточечного изгиба: усилия изгиба в 1,25 раза, стрела прогиба в 1,5 раза, а так же уменьшение протяженности зоны с пониженной твердостью в 3 раза и увеличение твердости металла в данных зонах в 1,6 раза относительно результатов, получаемых способом локального индукционного нагрева, в результате использования контактного подогрева, производимого рельсосварочной машиной в момент охлаждения рельсового стыка после сварки, спустя 200 секунд после осадки четырьмя импульсами длительностью 10 секунд при плотности электрического тока 7,5 А/мм².

Методы исследования

Экспериментальные лабораторные исследования проведены в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» на оборудовании кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства, научно-производственного центра «Сварочные процессы и технологии» и в центре коллективного пользования СибГИУ «Материаловедение».

Промышленные исследования проведены в условиях структурного подразделения ООО «РСП-М» рельсосварочного предприятия № 29 (РСП-29).

Исследование образцов проводилось по стандартным методикам на сертифицированном оборудовании в аккредитованных лабораториях ЦКП «Материаловедение» ФГБОУ ВО «СибГИУ» и АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

Достоверность и обоснованность полученных результатов, выводов и рекомендаций подтверждается представительным объемом экспериментальных данных, высокой степенью воспроизводимости результатов экспериментов, использованием статистических методов обработки экспериментальных данных, а также эффективностью предложенных технических решений, подтвержденных результатами лабораторных и промышленных испытаний.

Автору принадлежит:

- анализ современного состояния технологий сварки рельсов;
- постановка задач теоретических и экспериментальных исследований;
- проведение математических расчетов распределения температур металла во время сварки;
- проведение лабораторных и промышленных экспериментов по исследованию влияния кратковременного воздействия электрического тока во время охлаждения рельсового стыка после сварки на механические свойства и структуру металла сварного соединения;
- обработка и обобщение результатов исследований.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии п.3 «Физические процессы в материалах при сварке и родственных технологиях, фазовые и структурные превращения, образование соединений и формирование их свойств», п.4 «Технологические основы сварки плавлением и давлением», п.5 «Тепловые процессы и деформации при сварке, пайке и наплавке», п.6 «Системы стабилизации, программного управления и регулирования параметров технологии сварки и родственных процессов».

Апробация работы

Основные результаты и положения диссертационной работы доложены и обсуждены на научно-технических конференциях: Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения» (г. Новокузнецк, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020 г.), Международной научно-практической конференции «Молодой ученый: вызовы и перспективы» (г. Москва, 2016), Международной научно-практической конференции «Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении» (г. Кемерово, 2017 г.), Международной научно-практической конференции «International scientific and research conference on knowledge-based technologies in development and utilization of mineral resources» (г.

Новокузнецк, 2017 г.), Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» (г. Новокузнецк 2017, 2018, 2019, 2020 г.), Международной научно-технической конференции «Сварка и контроль – 2018» (г. Пермь 2018 г.), Всероссийской конференции-конкурсе студентов и аспирантов «Горно-геологического, нефтегазового, энергетического, машиностроительного и металлургического профиля» (г. Санкт-Петербург, 2019 г.), Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2019 г.).

Публикации

Основное содержание диссертации опубликовано в 52 печатных работах, в том числе 11 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов кандидатских диссертаций и 7 статей в журналах, индексируемых в системе цитирования SCOPUS. Новизна предложенных технических решений защищена 3 патентами Российской Федерации.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы, приложения. Работа изложена на 164 страницах, включая 91 рисунок, 26 таблиц, 4 приложения и содержит список литературы из 148 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, показана степень разработанности темы, определены цель исследований и задачи, решение которых необходимо для ее достижения, сформулирована научная новизна работы, показана практическая значимость, описана методология и методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлена структура научно-квалификационной работы.

В первой главе проанализированы основные тенденции развития электроконтактной сварки железнодорожных рельсов и ее преимуществ относительно других способов сварки рельсов. Высокий градиент температур, реализуемый электроконтактной сваркой методом пульсирующего оплавления способствует образованию на локальных участках с повышенным содержанием хрома, никеля и углерода высокопрочного слоя со структурой мартенсита. Что приводит к образованию дефектов в сварных стыках (развитие усталостных трещин в головке, шейке и подошве рельса с хрупким изломом). В условиях производства длиномерных рельсовых плетей данная проблема решается обязательной локальной термической обработкой сварного стыка индукционными установками. Локальная термическая обработка сварного стыка приводит к увеличению и появлению новых зон термического влияния по сравнению с зонами при сварке рельсов электроконтактным способом без термической обработки. Увеличение линейной величины зон после термической обработки в головке рельса на расстоянии порядка 40-47 мм от сварного стыка и в его подошве на расстоянии 70-75 мм приводит к снижению механических свойств сварного стыка. В результате зона с пониженной твердостью приводит к локальному повышенному износу поверхности катания головки, происходит смятие и выкрошивание. Применяемая технология локальной термической обработки сварных стыков с подстуживанием головки рельса сжатым воздухом не обеспечивает

необходимые механические свойства и геометрию сварного стыка.

В результате проведенного анализа сформулированы и определены основные задачи исследования.

Во второй главе представлен алгоритм разработки технологии сварки железнодорожных рельсов повышенной износостойкости (рисунок 1).



Рисунок 1 – Алгоритм разработки технологии

Приведены методы теоретических расчетов распределения температур при электроконтактной сварке и управляемом охлаждении, а также комплекс методик экспериментальных исследований влияния режимов управляемого охлаждения, производимого путем кратковременного подогрева сварного стыка во время охлаждения после сварки контактным способом на качество сварного шва (механических свойств, макро- и микроструктуры, неметаллических включений).

В третьей главе приведены результаты термодинамического моделирования двойных диаграмм состояния для рельсовой стали, лабораторные исследования влияния режимов управляемого охлаждения, производимого путем кратковременного подогрева сварного стыка во время охлаждения после сварки контактным способом на качество сварного шва.

Для определения критических температур A_{c1} и A_{cm} исследуемой рельсовой стали проведено термодинамическое моделирование двойных диаграмм состояния с использованием программного обеспечения Thermo-Calc® (база данных TCFE) с учетом полученного спектрометрией химического состава (таблица 1) образцов из рельсовой стали Э76ХСФ (рисунок 2).

Образование зон с пониженной твердостью в сварном соединении неизбежно в результате градиента температуры, создаваемого процессом сварки. При повышении содержания легирующих элементов в стали температурная область между критическими точками A_{c1} и A_{cm} увеличивается, что приводит к увеличению протяженности зоны с пониженной твердостью в сварном соединении.

Для получения минимальной протяженности участка с пониженной твердостью производилась сварка на жестких режимах электроконтактным способом пульсирующим методом оплавления, при этом для исключения образования дефектов в виде закалочных структур управляли охлаждением сварного соединения с помощью контактного нагрева. В качестве источником питания для контактного нагрева использовался трансформатор рельсосварочной машины, на которой производили сварку.

Таблица 1 – Химический состав исследуемых образцов

№ образцов	Содержание химических элементов, %							
	C	Mn	Si	Cr	V	P	S	Ni
1	0,76	0,77	0,53	0,37	0,04	0,010	0,010	0,08
2	0,77	0,77	0,53	0,37	0,04	0,012	0,009	0,08
3	0,76	0,77	0,53	0,37	0,04	0,010	0,010	0,08
4	0,77	0,77	0,53	0,37	0,04	0,012	0,009	0,08
5	0,77	0,80	0,56	0,38	0,04	0,008	0,006	0,06
6	0,76	0,78	0,55	0,38	0,04	0,010	0,006	0,07
7	0,76	0,77	0,53	0,37	0,04	0,009	0,005	0,07
8	0,76	0,78	0,55	0,38	0,04	0,010	0,006	0,07
9	0,77	0,80	0,56	0,38	0,04	0,008	0,006	0,06

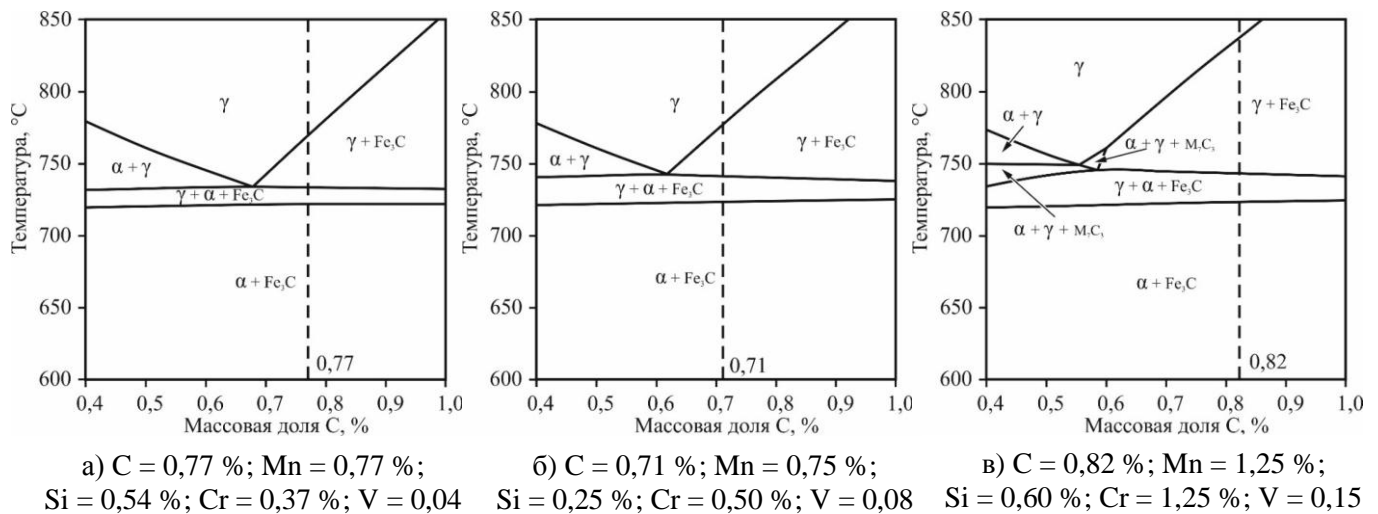


Рисунок 2 – Диаграмма состояния железо-углерод полученная с помощью термодинамических расчетов, показывающая предсказанное равновесие между фазами феррита (α), аустенита (γ) и цементита (Fe_3C)

Управление охлаждением металла после сварки производили путем пропуска переменного электрического тока по заданным режимам. Исследуемыми параметрами управляемого охлаждения являлись: X_1 – время охлаждения после осадки (характеризуется скоростью охлаждения (степень переохлаждения аустенита) и температурой, до которой происходит охлаждение); X_2 – время подогрева (характеризуется температурой, до которой происходит нагрев); X_3 – время охлаждения после подогрева (характеризуется температурой, до которой происходит охлаждение); X_4 – количество импульсов подогрева (характеризуется инкубационным периодом превращения аустенита в перлит).

Для возможности проведения лабораторных экспериментов проведена модернизация сварочной машины МС-2008. Для осуществления подогрева деталей после сварки по описанным выше режимам, сварочная машина оснащена микроконтроллером. В микроконтроллер загружают программу с заданным режимом управляемого охлаждения. На рисунке 3 показано мгновенное распределение температурных полей в зоне термического влияния, после окончания цикла управляемого охлаждения для образцов с наилучшими № 4 и наихудшими № 8

показателями. На рисунках 4 показано как микротвердость зависит от объемной доли структурных составляющих.

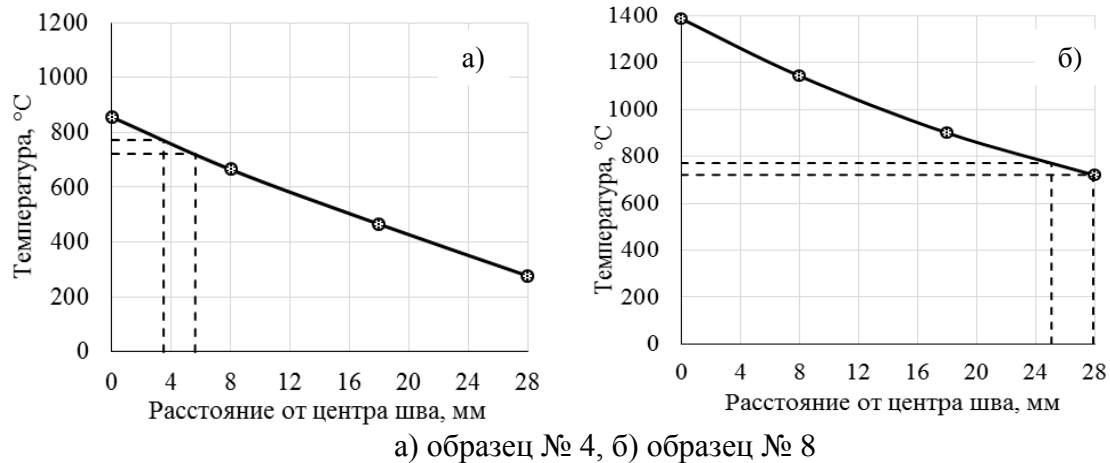


Рисунок 3 – Мгновенное распределение температурных полей в зоне термического

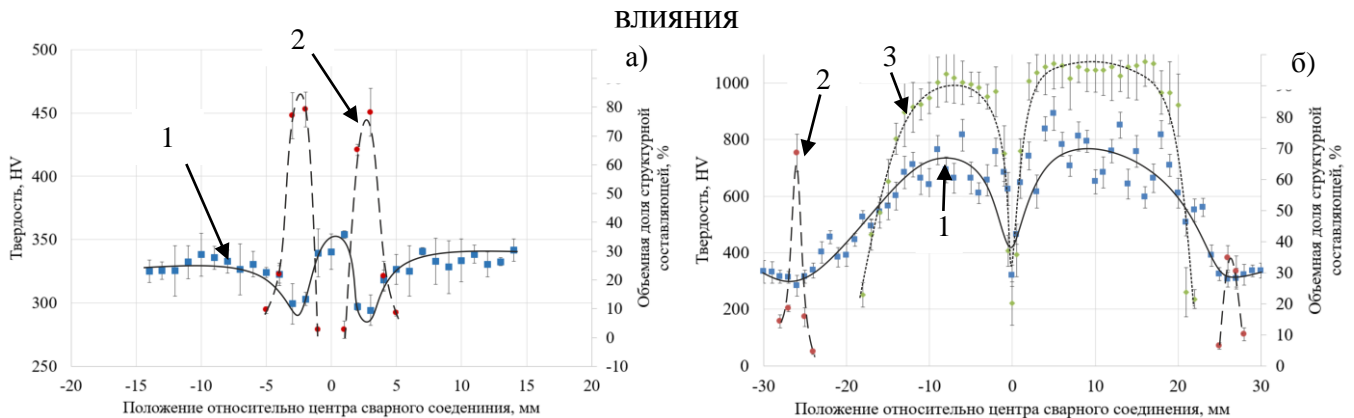


Рисунок 4 – Распределение микротвердости, объемной доли структурных составляющих в сварном соединении

Анализ мгновенного распределения температурных полей в зоне термического влияния образцов показал, что в образцах № 1, 5, 6, 7, 8, 9 распространение тепла от источника кратковременного нагрева происходит на большое расстояние относительно распространения тепла сварки. При этом температура начала превращения в аустенит равная $720\text{ }^{\circ}\text{C}$ для данных образцов зафиксирована на расстоянии от 16,0 до 27,5 мм. Это приведет к увеличению протяженности зон термического влияния. Так же в образцах № 1, 5, 6, 9 температурам между критическими точками A_{cm} ($770\text{ }^{\circ}\text{C}$) и A_{c1} ($720\text{ }^{\circ}\text{C}$) соответствуют максимальные линейные размеры данной области (от 5 до 8,5 мм). Образцы № 2, 3, 4, 7, 8 имеют минимальные линейные размеры (от 2,5 до 3,2 мм) между температурами, которые соответствуют критическим точкам A_{cm} ($770\text{ }^{\circ}\text{C}$) и A_{c1} ($720\text{ }^{\circ}\text{C}$).

На всех образцах присутствует участок со структурой сфероидизированного перлита, имеющий различные размеры в зависимости от режима управляемого охлаждения. При увеличении объемной доли зернистого перлита происходит снижение микротвердости. При наличии и увеличении количества закалочных структур происходит увеличение микротвердости.

На рисунке 5 приведено сравнение значений размеров участка сфероидизации (зернистого) перлита полученных с помощью термодинамического моделирования и

фактической объемной доли зернистого перлита. Полученные данные имеет высокую корреляцию ($R = 0,98$). Отличия расчетных значений от фактических, обусловлены тем, что критические точки A_{cm} и A_{c1} получены с помощью термодинамического моделирования, определяются для равновесного состояния, что отличается от условий процесса сварки. Тем не менее, размеры зоны с пониженной твердостью могут быть спрогнозированы расчетами.

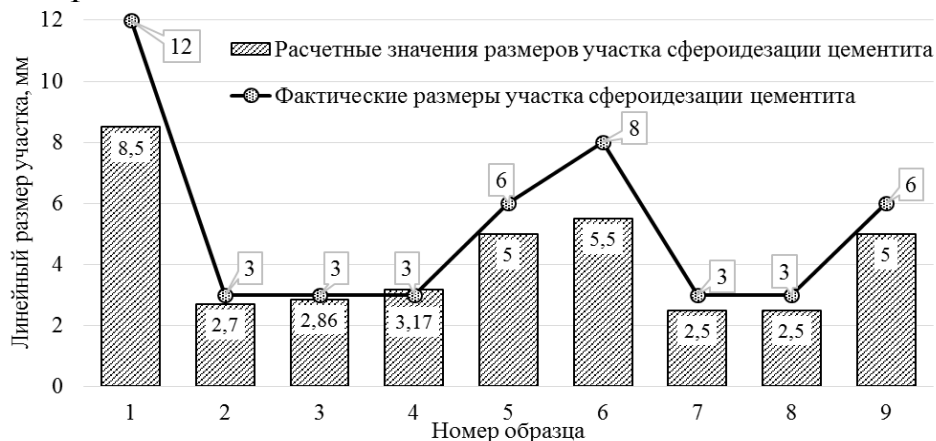


Рисунок 5 – Сравнение расчетных и фактических размеров участков сфероидизации перлита

При изучении макроструктуры сварных соединений лабораторных образцов наблюдается наличие нескольких зон, образованных в результате действия тепла сварки и кратковременного подогрева, используемого для управляемого охлаждения. Можно выделить 4 участка с различными структурами металла.

1. Шов – микроструктура представляет крупнозернистый сорбитообразный перлит. Образование закалочных структур практически на всех образцах отсутствует, даже при скорости охлаждения при которой характерно образование мартенсита для данных сталей. Это обусловлено снижением содержания углерода в сварном шве, в момент оплавления при взаимодействии жидкого металла с атмосферой происходит его окисление. 2. Участок неполного расплавления. Структура образцов № 2, 3, 4, 9 состоит из крупнозернистого сорбитообразного перлита. При исследовании образцов № 1, 6, 8 отмечено наличие крупнозернистой структуры (2-3 номер шкалы ГОСТ 5639-82) с преобладанием мартенситной составляющей, характерной для перегретого металла. Образцы № 5, 7 имеют преобладающую структуру крупнозернистого сорбитообразного перлита и небольшие участки мартенсита размером от 20 до 80 мкм. 3. Участок нормализации – в процессе нагрева протекает фазовое превращение перлита в аустенит и его гомогенизация. Структура образцов № 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9 представляет собой мелкодисперсный перлит. 4. Участок сфероидизации перлита – в процессе нагрева протекает фазовое превращение перлита в аустенит, но вследствие недостаточной температуры и времени, гомогенизация аустенита не происходит. При последующем охлаждении происходит коагуляция цементита на участках оставшегося нерастворенного карбида и укрупнение зерен цементита – сфероидизация. На рисунке представлено распределение твердости,

неметаллических включений и структуры в сварном соединении образца № 4, образец имеет наименьшую протяженность ЗТВ, равномерное распределение твердости, в сварном соединении отсутствуют закалочные структуры.

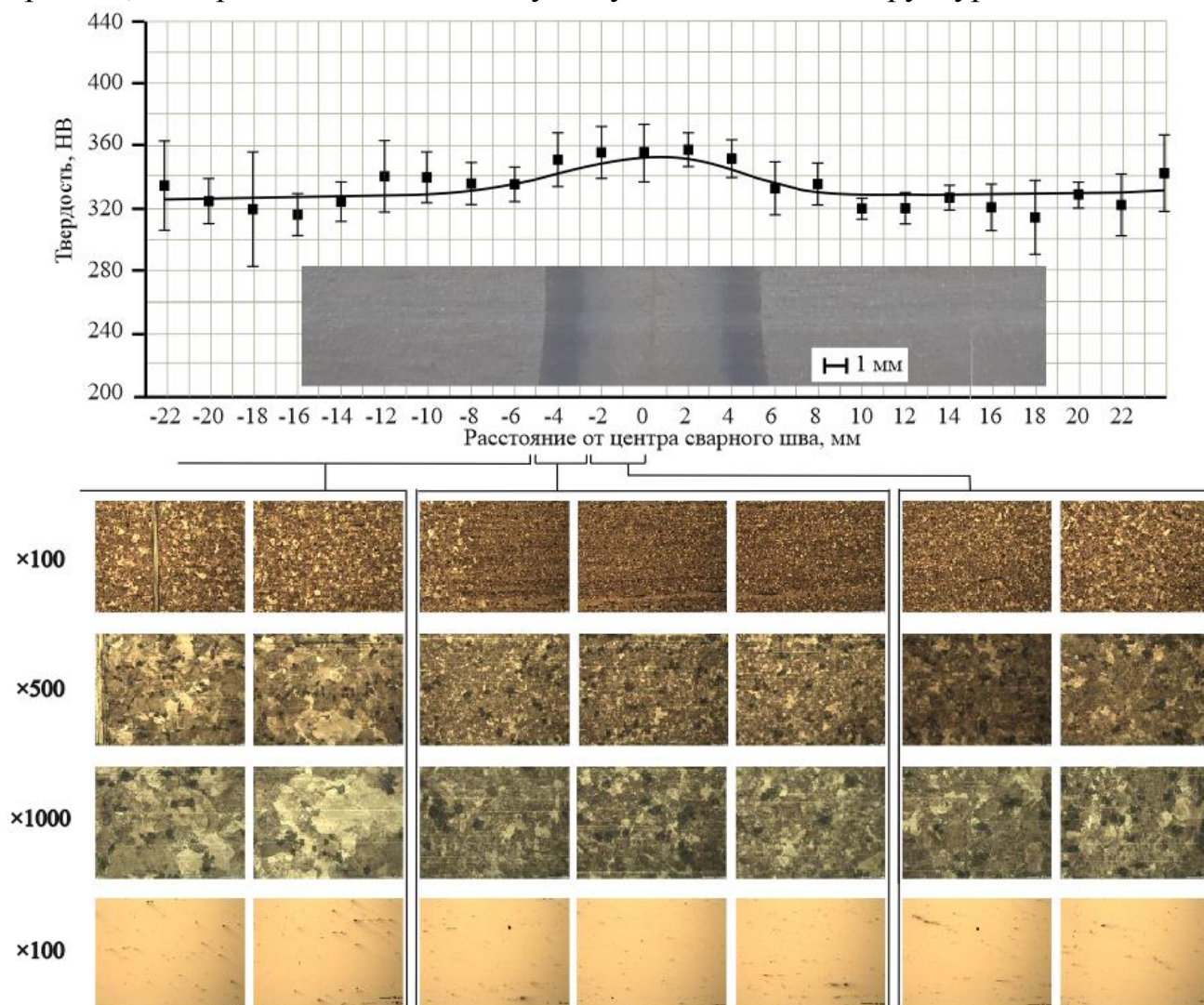


Рисунок 6 – Распределение твердости, неметаллических включений и структуры в сварном соединении образца № 4

В таблице 2 представлены результаты эксперимента: твердость НВ, протяженность ЗТВ (мм); предел текучести σ_T (Н/мм²); временное сопротивление разрыву σ_B (Н/мм²); относительное удлинение δ_5 (%); относительное сужение ψ (%). Результаты механических испытаний предопределены наличием закалочных структур металла (№ 5, 6, 7, 8, 9), либо скоплением неметаллических включений в зоне сварного шва (образцы № 1, 2, 3, 4). Состав неметаллического включения, выявленного вне зоны шва, типичен для состава неметаллических включений, образующихся в металле при производстве рельсов. Основными соединениями являются оксиды кремния, алюминия, магния. По мере снижения концентрации во включении наблюдаются соединения марганца, натрия, кальция, титана и циркония. Приведенный химический состав включения свидетельствует о шлаковом характере происхождения выявленного неметаллического включения, образовавшегося при производстве рельсов.

Таблица 2 – Механические свойства образцов

№ образцов	НВ _{min}	НВ _{max}	ЗТВ, мм	σ_T , Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	δ_5 , %	ψ , %
1	290	414	10,0	660	990	3,2	4,4
2	297	364	6,5	650	750	1,7	4,7
3	322	370	6,0	530	570	1,2	3,6
4	326	385	5,0	720	870	0,4	4,3
5	279	364	16,0	800	810	1,2	4,3
6	280	391	16,0	770	980	1,5	4,9
7	264	404	20,0	880	1080	2,8	5,7
8	319	601	27,5	970	1010	1,2	5,0
9	281	378	17,0	-	465	0,8	3,8

В результате установлена закономерность формирования структуры металла на каждом участке сварного соединения дифференцированно термообработанных железнодорожных рельсов, изготовленных из стали 76ХСФ. Экспериментальным путем, в лабораторных условиях, подтверждено образование зон с пониженной твердостью в сварном соединении. Увеличение содержания легирующих элементов (Mn, Si, Cr, V) в стали приводит к расширению зоны с пониженной твердостью в сварном соединении.

В четвертой главе приведены результаты промышленных испытаний. Сварку производили на рельсосварочной машине для контактной стыковой сварки МСР-6301 в условиях рельсосварочного предприятия ООО «РСП-М» (РСП-29). Для исследования вырезались образцы полнопрофильных рельсов типа Р65 категории ДТ350 длиной 600 мм.

Управление режимами изотермической выдержки после сварки осуществляется с помощью персонального компьютера, изменяя программу промышленного контроллера SIMATIC S7–300. С помощью программного обеспечения Simatic Step 7 была написана программа, позволяющая задавать режимы управляемого охлаждения. Этапы технологического процесса построены из участков оплавления, в которых устанавливаются основные режимы регулирования. Сварка всех рельсовых проб производилась по одному заданному режиму.

Для поиска оптимальных режимов управляемого охлаждения в первой серии экспериментов проведен полный факторный эксперимент $N = 2 \times 3^k$ (таблица 3). В дальнейшем проводили испытание нетермообработанных стыков на трехточечный статический изгиб согласно СТО РЖД 1.08.002-2009 «Рельсы железнодорожные, сваренные электроконтактным способом». Испытания на статический изгиб проводили на прессе ПМС-320. Контрольные образцы испытывались после сварки и удаления грата без дополнительной обработки стыков. При испытаниях на статический поперечный изгиб контрольный образец имел длину не менее 1200 мм со сварным стыком по середине. Нагрузку прикладывали в середине пролета контрольного образца в месте сварного стыка с расстоянием между опорами 1 м. Испытание контрольного образца производили, с приложением нагрузки на головку. Результатами испытания являются значения усилия, возникающего при изгибе $R_{изг}$, кН и значения стрелы прогиба $f_{пр}$, мм при которых происходит разрушение контрольного образца, либо максимальные значения данных показателей, если образец не разрушился во время испытаний. В таблице 3 приведены результаты испытаний.

В результате эксперимента образцы 3 ($P_{изг} = 2364$ кН, $f_{пр} = 35,4$ мм) и 8 ($P_{изг} = 2244$ кН, $f_{пр} = 31,2$ мм) имеют значения показателей испытаний выше ($P_{изг} = 2000$ кН, $f_{пр} = 27$ мм) требований СТО РЖД 1.08.002-2009. Согласно данным были получены регрессионные модели для выходных параметров усилия при изгибе и стрелы прогиба:

$$P_{изг} = 1926,5 - 2,05 X_1 + 64,38 X_2 + 3,2 X_3; R = 0,78,$$

$$f_{пр} = 15,72 - 0,04 X_1 + 2,37 X_2 + 0,07 X_3; R = 0,72.$$

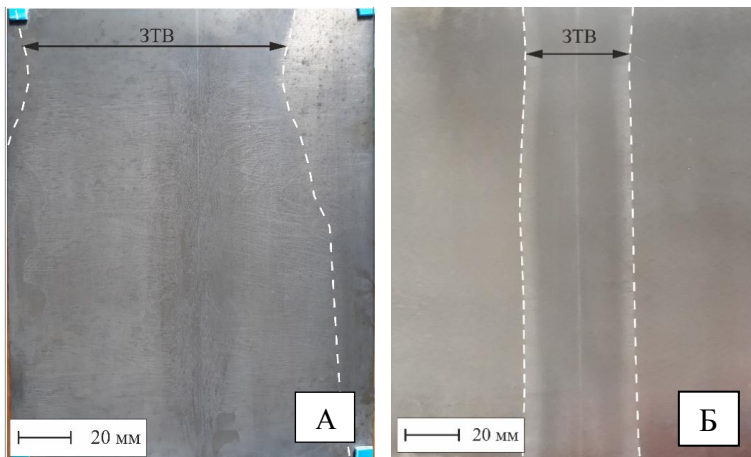
Таблица 3 – Результаты полного факторного эксперимента $N = 2^k$

№ образцов		Значения входных факторов			Значения выходных параметров	
		X_1, c	X_2, c	X_3, c	$P_{изг}, кН$	$f_{пр}, мм$
1-я серия	0	-	-	-	2179	24,4
	1	60	2	30	2002	17,4
	2	160	2	30	1882	17,9
	3	60	6	30	2364	35,4
	4	160	6	30	1970	20,1
	5	60	2	15	2107	23,4
	6	160	2	15	1616	11
	7	60	6	15	2059	20,9
	8	160	6	15	2244	31,2
2-я серия	10 (3) *	60	6	30	2276	34,2
	11	200	4	10	2493	40,2
Требования СТО РЖД 1.08.002-2009					2000	27
Для сравнения так же была проведена сварка образца № 0 – без изотермической выдержки. Количество импульсов (X_4), для уменьшения количества опытов, задавалось равным 4 на всех режимах изотермической выдержки.						

При этом рассмотрев процесс охлаждения наилучших результатов можно сделать вывод о том, что формирование благоприятных механических свойств сварного соединения произошло в некоторой степени из-за замедления скорости охлаждения, т. к. в полной мере не были реализованы режимы изотермической выдержки. Для подтверждения результатов проведена вторая серия экспериментов, где повторно сварен образец на режиме с наилучшим результатом испытаний, а также выбран режим изотермической выдержки, полностью удовлетворяющий температурным режимам. Режимы и результаты повторной серии экспериментов приведены в таблице 3.

Результаты второй серии экспериментов подтвердили воспроизводимость параллельных опытов. При снижении температуры начала подогрева, т. е. увеличение параметра X_1 привело к повышению механических свойств сварного стыка рельсов.

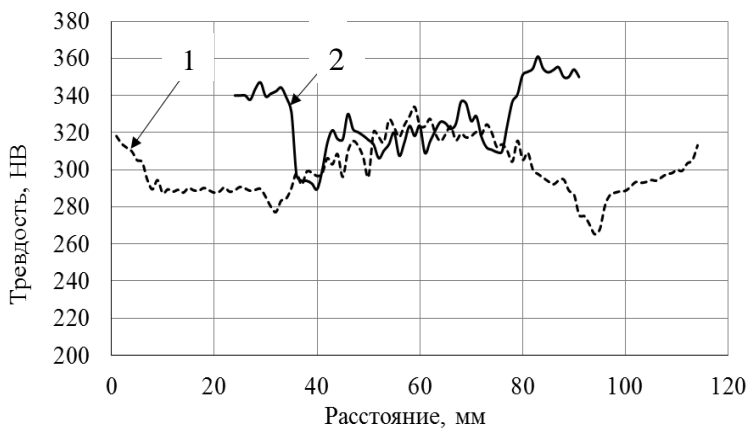
Изучение макроструктуры (рисунок 7) производилось на двух продольных макротемплетах сварных стыков, один из которых получен по стандартной технологии, используемой в настоящее время на рельсосварочных предприятиях РФ (образец А), а второй – по предлагаемому способу (образец Б). Термообработка производилась сварного стыка А стационарным индукционным нагревательным комплексом для термообработки сварных рельсовых стыков УИН 001–100/РТ–С по режимам, используемым в настоящее время на предприятиях ООО «РСП-М». В качестве образца Б использовался образец с наилучшими показателями испытания на статический изгиб (таблица 3 образец № 11).



А – сварка по базовой технологии с индукционной термообработкой,
Б – сварка по разработанной технологии с управляемым охлаждением

Рисунок 7 – Продольные макротемплеты сварных соединений

На всем протяжении стыка зона термического влияния имеет ширину равную (в одну сторону от шва) 22 мм.



1 – распределение твердости, полученное по базовой технологии, 2 – распределение твердости, полученное по предлагаемому способу

Рисунок 8 – Распределение твердости металла на поверхности катания сварного стыка рельсов

Снижение твердости металла головки в зоне термической обработки сварного стыка А относительно нижней границы твердости основного металла рельса достигает 24,5 %, а протяженность зоны с пониженной твердостью составляет 42 мм. Снижение твердости в зоне термического влияния сварного стыка Б достигает 14,8 %, при этом протяженность зон с пониженной твердостью составляет 14 мм.

Установлено, что влияние кратковременного воздействия электрического тока во время охлаждения рельсового позволяет получить протяженность зоны с пониженной твердостью менее 15 мм и снижением твердости металла менее 15 % относительно нижней границы твердости основного металла, это может обеспечить увеличение эксплуатационного ресурса рельсовых плетей. Использование разработанного способа позволяет исключить операцию термической обработки, сократить время одного цикла

При изучении макроструктуры металла сварного соединения, полученного по стандартной технологии (рисунок 7 А) по обе стороны от шва наблюдается темнотравящаяся неравномерная зона термического влияния, полученная после термической обработки. Указанная зона имеет линейные размеры (в одну сторону от шва): в головке – 51 мм, в шейке – от 45 до 62 мм, в подошве – 64 мм. На продольном макротемплете образца Б (рисунок 7 Б) наблюдается равномерная зона термического влияния, полученная после сварки.

Твердость металла сварного шва и зон термического влияния на поверхности катания головки сварного стыка А колеблется от 265 до 318 НВ. Твердость металла сварного шва и зон термического влияния на поверхности катания головки стыка Б колеблется от 292 до 355 НВ. Распределение твердости на поверхности катания сварного стыка рельсов показано на рисунке 8. Твердость основного металла на поверхности катания головки составляет 348-354 НВ.

технологических операций на 6 минут и увеличить производительность труда на 10 %, так же снизить расходы на электроэнергию, используемую установкой УИН-001-10/РТС и заработную плату персоналу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлена закономерность формирования структуры металла сварного шва, включая зону термического влияния дифференцированно термообработанных железнодорожных рельсов. Показано, что образование зон с пониженной твердостью в сварном соединении неизбежно в результате градиента температуры, создаваемого процессом сварки. При увеличении содержания легирующих элементов в стали температурная область между критическими точками A_{c1} и A_{cm} увеличивается, что приводит к увеличению протяженности зоны с пониженной твердостью в сварном соединении.

2. Разработано лабораторное оборудование для контактной стыковой сварки оплавлением на базе сварочной машины МС-2008 с возможностью реализации управления охлаждением металла после сварки.

3. Получены зависимости длительности и количества циклов кратковременного воздействия электрического тока на твердость и протяженность зоны термического влияния металла сварного соединения рельсов из электростали. Данные зависимости позволяют подбирать параметры изотермической выдержки в интервале температур, при которых формируется заданная структура металла не расширяя зону термического влияния.

4. Экспериментально подтверждено положительное влияние кратковременного воздействия электрического тока во время охлаждения рельсового стыка после сварки на результаты испытаний статического трехточечного изгиба без термической обработки по СТО РЖД 1.08.002-2009 рельсов типа Р65 категории ДТ350. Проведение изотермической выдержки путем пропускания четырех кратковременных импульсов длительностью 10 секунд переменного электрического тока через сварное соединение в момент охлаждения после сварки (через 200 секунд после осадки) позволяет увеличить показатели статического трехточечного изгиба: усилие изгиба $R_{изг}$ на 25 %, стрелу прогиба $f_{пр}$ на 49 %.

5. Разработан новый способ контактной стыковой сварки рельсов и проведено его промышленное опробование на предприятии структурном подразделении (СТП) ООО «РСП-М» (РСП-29). Определено, что применение предлагаемого способа позволяет снизить себестоимость одного сварного стыка с 6 315 руб. до 5 522 руб. и повысить производительность труда на 10 %.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Современные методы сварки рельсов нового поколения / Козырев Н.А., Усольцев А.А., Шевченко Р.А., Крюков Р.Е., Шишкин П.Е. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2017. – т. 60. № 10. – С. 785 – 791.

2. Современные технологии сварки железнодорожных рельсов / Козырев Н. А., Шевченко Р. А., Усольцев А. А., Крюков Р. Е., Князев С. В. // Черная металлургия: Бюл. ин-та “Черметинформация”. – 2018. – № 2. – С. 62 – 68.

3. Разработка новой технологии сварки рельсов для высокоскоростного движения / Козырев Н.А., **Шевченко Р.А.**, Крюков Р.Е., Усольцев А.А. // Черная металлургия: Бюл. ин-та “Черметинформация”. – 2018. – № 8. – С. 50 – 56.

4. Разработка технологии изготовления длинномерных рельсовых плетей без использования индукционной термообработки / Козырев Н.А., **Шевченко Р.А.**, Кратько С.Н., Крюков Р.Е., Михно А.Р. // Черная металлургия: Бюл. ин-та “Черметинформация”. – 2019. – № 4 – С. 488 – 496.

5. Разработка и моделирование технологического процесса сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов. Моделирование процессов, протекающих при сварке и локальной термической обработке / Козырев Н.А., **Шевченко Р.А.**, Усольцев А.А., Прудников А.Н., Башенко Л.П. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2020. – т. 63. № 2. – С. 93 – 101.

6. Разработка и моделирование технологического процесса сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов. Лабораторные исследования / Козырев Н.А., **Шевченко Р.А.**, Усольцев А.А., Прудников А.Н., Башенко Л.П. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2020. – т. 63. № 7. – С. 504 – 511.

7. Разработка и моделирование технологического процесса сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов. Промышленное опробование / Козырев Н.А., **Шевченко Р.А.**, Усольцев А.А., Прудников А.Н., Башенко Л.П. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2020. – т. 63. № 5. – С. 3 – 10.

8. Исследование износостойкости сварного стыка железнодорожных рельсов / Козырев Н.А., **Шевченко Р.А.**, Усольцев А.А., Крюков Р.Е., Михно А.Р. // Черная металлургия: Бюл. ин-та “Черметинформация” – 2020. т. 76. № 8. С. 818 – 825.

9. Полевой, Е.В. Исследование состава неметаллических включений сварных швов рельсовых соединений, полученных при их электроконтактной сварке / Полевой, Е.В., Козырев Н.А., **Шевченко Р.А.**, Усольцев А.А. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. — 2020. — № 3. — С. 251 – 258.

10. Козырев, Н.А. Управление термическим циклом процесса сварки рельсосварочной машины МСР-6301 / Козырев Н.А., **Шевченко Р.А.**, Усольцев А.А., Осетковский И.В., Кратько С.Н. // Сварочное производство. – 2020. – № 9. – С. 29-34.

11. Козырев, Н.А. Исследование износостойкости сварного стыка железнодорожных рельсов / Козырев Н.А., **Шевченко Р.А.**, Усольцев А.А., Крюков Р.Е., Михно А.Р. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2020. – № 8. – С. 818 – 825.

В изданиях, индексируемых в базе данных Scopus:

12. Modern Methods of Rail Welding / Kozyrev N.A., Kozyreva O.A., Usoltsev A.A., Kryukov R.E., **Shevchenko R.A.** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 012002: FEC-2017 18–21 April 2017, Kemerovo, Russian Federation. – V. 253. – 2017 – pp. 1 – 6

13. Modern Methods of Rail Welding / Kozyrev N.A., Usoltsev A.A., Kryukov R.E., **Shevchenko R.A.**, Gizatulin R.A., Valueva A.V. // Key Engineering Materials. – 2017. – V. 736. – pp. 116 – 121

14. Calculation of optimal modes for electric-contact welding of rails of mine haulage tracks / **Shevchenko R.A.**, Kozyrev N.A., Usoltsev A.A., Kriukov R.E., Shishkin P.E. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Novokuznetsk, Russia. – 2017. – V. 84 – pp. 1 – 5

15. Analysis of rail welding methods for mine rail access with the use of modern technologies / Usoltsev A.A., **Shevchenko R.A.**, Kozyrev N.A., Kriukov R.E., Shishkin P.E. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Novokuznetsk, Russia. – 2017. – V. 84. – pp. 1 – 7

16. Method of researching the influence of isothermic annealing modes on welding of hauling track rails used in mine workings / **Shevchenko R.A.**, Kozyrev N.A., Kutsenko A.I., Usoltsev A.A., Kutsenko A.A. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 206. – pp. 1 – 6

17. Multi-factor regression analysis of the process of rails contact welding on K1000 machine / **Shevchenko R.A.**, Kozyrev N.A., Kriukov R.E., Patrushev A.O., Usoltsev A.A. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 411. – pp. 1 – 5

18. Development of technology for manufacturing rail strings for railway access roads to mines/ **R A Shevchenko**, N A Kozyrev, S N Kratko, R E Kryukov, A R Mikhno //IOP Conf. Series: Earth and Environmental. – Vol. 377. – pp. 1 – 6

Патенты РФ:

19. Пат. 2641586 РФ, МПК⁸ В23 11/04 Способ контактной стыковой сварки рельсов / Протопопов Е.В., Козырев Н.А., **Шевченко Р.А.**, Крюков Р.Е., Фейлер С.В, Усольцев А.А.; ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет». – № 2016148124; заявл. 07.12.2016; опубл. 18.01.2018

20. Пат. 2683668 РФ, МПК⁸ В23 11/04 Машина для контактной стыковой сварки / Протопопов Е.В., Козырев Н.А., **Шевченко Р.А.**, Кратько С.Н., Хомичева В.Е.; ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет». – №2017145763; заявл. 25.12.2017; опубл. 01.04.2019

21. Пат. 2725821 РФ, МПК В23К 11/04, В23К 101/26, С21D 9/50, С21D 9/04. Способ контактной стыковой сварки рельсов / Козырев Н.А., **Шевченко Р.А.**, Уманский А.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет» – № 2019138988; заявл. 29.11.2019; опубл. 06.07.2020 Бюл. № 19

Подписано в печать __. __ 2021 г. Формат бумаги 60×84 1/16.
Усл.печ.л. 1,16 Уч.изд.л. 1,10 Тираж 100 экз. Заказ _____.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова,42
Издательский центр ФГБОУ ВПО «СибГИУ»