



ГНЦ ФГУП

"ЦНИИЧермет им. И.П.Бардина"

Материалы

Международного металлургического форума

«ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ,
ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПОВЫШЕНИЕ
КАЧЕСТВА МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ»,

посвященного 80-летию основания
ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина

Москва
Металлургиздат
2024

УДК 669.01

Редакционная комиссия
Семенов В.В. (председатель)
Москвина Т.П., Козырев Н.А., Никулин А.Н., Филиппов Г.А.

Материалы Международного металлургического форума «Перспективы развития металлургических технологий, обеспечивающих повышение качества металлопродукции», посвященного 80-летию основания ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина. М. : Металлургиздат, 2024. 336 с.

ISBN 978-5-6052564-1-0

В сборнике опубликованы доклады и презентации, заслушанные на Международном металлургическом форуме «Перспективы развития металлургических технологий, обеспечивающих повышение качества металлопродукции», посвященном 80-летию основания ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина, который проходил 25 апреля 2024 г., в соответствии с планом проведения конференций, утвержденным генеральным директором.

В сборнике публикуются доклады, освещающие результаты работ по основным направлениям металлургических технологий, новым маркам сталей и сплавов. Отдельные доклады посвящены теоретическим вопросам и новым методам исследования металлов.

Сборник материалов металлургического форума предназначается для широкого круга работников научно-исследовательских институтов и инженерно-технических работников металлургической, машиностроительной и других отраслей промышленности.

ISBN 978-5-6052564-1-0



9 785605 256410 >

НОВЫЙ СПОСОБ И МАШИНА ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ СВАРКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

Н.А. Козырев¹, д-р техн. наук; А.А. Усольцев², Р.А. Шевченко², А.Р. Михно²

¹ФГУП «ЦНИИчертим им. И.П. Бардина», Москва, Россия

²ФГБОУ ВО Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, n.kozyrev@chermet.net

Введение. Одним из основных элементов строения железных дорог являются рельсы. В настоящее время широко используются бесстыковой путь и сварные соединения определяют эксплуатационную стойкость рельсов. Ежегодно около 56% поломок рельсов происходит по причине излома по сварному стыку, при контроле выявляется 15% остродефектных рельсов в зоне сварных стыков. Причины этого заключаются в создании при сварке условий способствующих образования внутренних дефектов, являющихся концентраторами напряжений. Задача по созданию рельсов с ресурсом более 1,5–2 млрд т возможно только при разработке новых технологий сварки [1–3].

При электроконтактной сварке интенсивный нагрев, реализуемый пульсирующим методом оплавления с последующим быстрым охлаждением, способствует образованию закалочных структур на месте микрообъемов с повышенным содержанием хрома. Проблема решается с использованием обязательной локальной термической обработки сварного стыка, однако при этом возможно появление новых зон термического влияния с пониженной твердостью по сравнению с зонами при сварке рельсов электроконтактным способом без термической обработки. При эксплуатации сваренные таким образом рельсы характеризуются повышенным износом поверхности катания на данных участках и смятием головки на месте сварного стыка. Кроме того, возникает ряд проблем, связанных с особенностью процесса сварки и влиянием легирующих элементов. При электроконтактной сварке пульсирующим методом оплавления осуществляется высокая скорость нагрева металла и последующее ускоренное охлаждение, что при высоком содержании углерода в рельсовой стали приводит к образованию закалочных структур. Участки мартэнсита играют роль концентраторов напряжения и приводят к образованию дефектов в сварных стыках (развитие усталостных трещин в головке, шейке и подошве рельса с хрупким изломом), при этом образуется градиент температур, способствующий образованию зоны термического влияния и разупрочнению металла на отдельных участках зоны термического влияния сварного стыка рельсов. В результате разупрочнения металла в зоне термического влияния происходит локальный повышенный износ поверхности катания головки, происходит смятие и выкрашивание [4–7].

Поэтому исследование закономерностей формирования структуры металла при сварке железнодорожных рельсов в настоящее время является актуальной задачей, решение которой позволяет организовать технологический процесс изготовления бесстыкового пути с повышенной эксплуатационной стойкостью.

Методы, материалы и оборудование. Анализ химического состава стали проводился спектральным методом с фотографической регистрацией спектра по ГОСТ 22536.0 на рентгенофлюоресцентном спектрометре XRF – 1800 фирмы SHIMADZU. Химический состав исследуемой рельсовой стали следующий: C = 0,76%; Mn = 0,77%; Si = 0,53%; Cr = 0,37%; V = 0,04%; P = 0,010%; S = 0,010%; Ni = 0,08%; Al = 0,003%.

Для термодинамического моделирования и расчета фазовых равновесий в двойных системах в настоящей работе использовался пакет программ Thermo-Calc[®] Version 2019b (база данных TCFE) разработанное компанией Thermo-Calc Software [8, 9].

Для исследования микроструктуры сварных стыков образцы вырезали в зонах сварного шва и термического влияния, а также из основного металла. Исследование проводили на глубине до 5 мм от поверхности, после травления шлифов в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты. При металлографическом исследовании последовательно проводились операции по микроанализу с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51. Прибор оснащен цифровой металлографической камерой, а также специальным программным обеспечением Siams Photolab 700.

Результаты и обсуждение. Высокое содержание углерода в рельсовой стали, а также увеличение доли хрома в стали приводит к замедлению распада аустенита, что в свою очередь приводит к снижению критической скорости охлаждения при которой происходит превращение аустенита в мартенсит [10]. В работе [11] при исследовании структурных превращений рельсовой стали Э76ХФ определено, что образование закалочных структур происходит при скоростях от 1 °C/c. При быстром нагреве сварного стыка, которое обеспечивается методом пульсирующего оплавления и последующим интенсивным охлаждением ЗТВ на месте микрообъемов с повышенным содержанием хрома, никеля и углерода формируется высокопрочный слой со структурой мартенсита [12–17].

При сварке образцов из рельсовой стали электроконтактным способом на жестких режимах происходит образование мартенсита, что свидетельствует о высоких, более 1 °C/c, скоростях охлаждения металла сварного соединения (рис. 1).

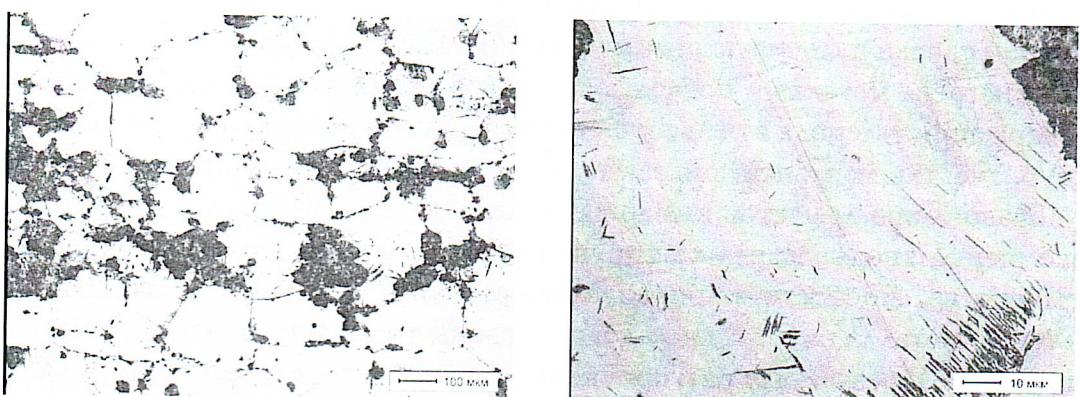


Рис. 1. Микроструктура металла шва сварного соединения образца из рельсовой стали

Данная проблема в процессе изготовления бесстыкового пути при сварке рельсов решается обязательной локальной термической обработкой сварного стыка [12]. Термическая обработка сваренных стыков включает в себя закалку поверхности катания головки рельса и нормализацию подошвы и шейки, что позволяет увеличить прочностные характеристики сваренных стыков рельсов [18]. Термообработку производят с помощью индукционных установок, что в свою очередь увеличивает затраты. При всех положительных воздействиях термической обработки с применением закалочной среды в виде сжатого воздуха у современных индукционных установок имеется недостаток связанный с появлением новых зон термического влияния при местном нагреве сварных стыков при термической обработке.

Процесс образования участков с пониженной твердостью схож с процессом сфероидизирующего отжига, применяемого на производстве для понижения твердости и улучшения обрабатываемости сталей резанием [19]. Для получения зернистого перлита (цементита в виде округлых зерен) проводят сфероидизирующй отжиг, который состоит из нагрева стали до температуры несколько выше линии PSK (точка Ac_1), выдержки и последующего охлаждения. При нагреве стали несколько выше критической точки Ac_1 первоначальные зародыши аустенита в ее структуре образуются сдвиговым путем при сохранении когерентных границ. Зародыш аустенита возникает на межфазной границе раздела феррита и цементита. В результате этого превращения образуется низкоуглеродистый аустенит. В образовавшемся по сдвиговому механизму низкоуглеродистом аустените растворяется цементит, и содержание углерода в аустените приближается к равновесному. Рост участков аустенита в результате полиморфного превращения $\alpha \rightarrow \gamma$ протекает быстрее, чем растворение цементита. Избыточные структурные составляющие не переходят полностью в раствор и при последующем охлаждении являются центрами сфероидизации цементита.

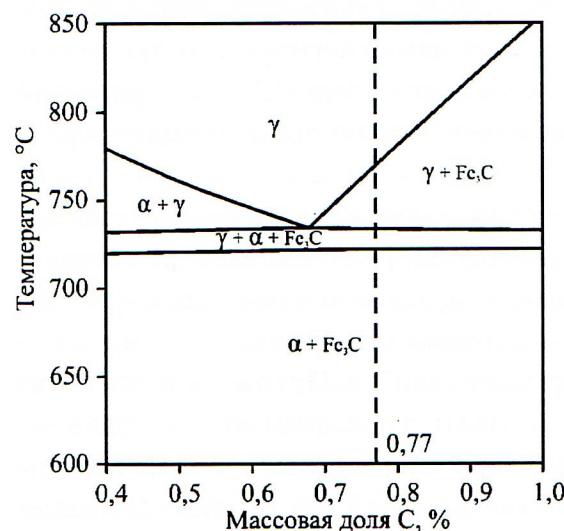


Рис. 3. Диаграмма состояния железо-углерод, полученная с помощью термодинамических расчетов, показывающая предсказанное равновесие между фазами феррита (α), аустенита (γ) и цементита (Fe_3C)

Используя полученные результаты определения химического состава в качестве входных данных для термодинамических расчетов, были смоделированы положения критических точек и области фазового равновесия для рельсовой стали (рис. 2). Для стали с содержанием углерода 0,77% расчеты показывают, что полное превращение в феррит и цементит будет происходить при температуре около 720 °C и между температурами 720 и 730 °C будет существовать три фазы. Выше 730 °C – межкритическая область (аустенит и цементит) примерно до 770 °C.

В ходе работы смоделированы изменение положения критических точек и области фазового равновесия для рельсовой стали 76ХСФ с минималь-

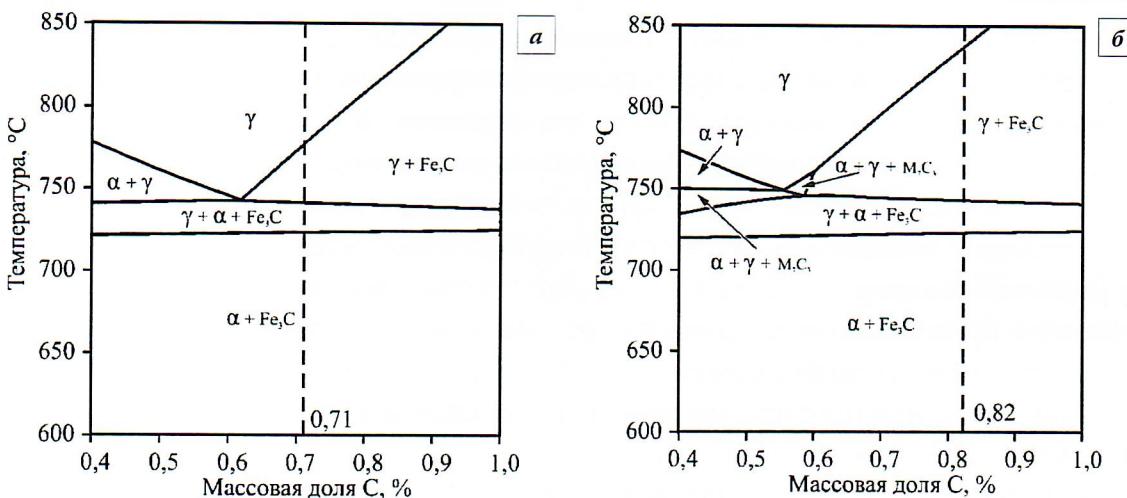


Рис. 3. Диаграммы состояния железо-углерод, полученная с помощью термодинамических расчетов, показывающая предсказанное равновесие между фазами феррита (α), аустенита (γ) и цементита (Fe_3C): $\alpha - C = 0,71\%$; $Mn = 0,75\%$; $Si = 0,25\%$; $Cr = 0,50\%$; $V = 0,08\%$; б – $C = 0,82\%$; $Mn = 1,25\%$; $Si = 0,60\%$; $Cr = 1,25\%$; $V = 0,15\%$

ным (рис. 3, а) и максимальным (рис. 3, б) содержанием легирующих элементов по ГОСТ Р 51685–2013.

Для сталей с содержанием углерода 0,71% и 0,82% расчетами определено, что полное превращение в феррит и цементит будет происходить при температуре около 725 °С для двух сплавов и до температур 740 и 745 °С будет существовать три фазы. Выше 745 °С сплав имеет межкритическую область (аустенит и цементит) до 775 и 840 °С для сплавов с минимальным и максимальным содержанием легирующих элементов для стали 76 ХСФ соответственно (см. рис. 3, а, б).

Определено результатами термодинамического анализа (см. рис. 2, 3), что сталь 76ХСФ является заэвтектоидной. 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 Ac_1 и Ac_{st} увеличивается, что приводит к увеличению протяженности зоны с пониженной твердостью в сварном соединении.

Для получения минимальной протяженности участка с пониженной твердостью возможно проведение сварки рельсов на жестких режимах электроконтактным способом пульсирующим методом оплавления, а для исключения образования дефектов в виде закалочных структур возможно управление охлаждением сварного соединения с помощью контактного нагрева [19]. Источником питания для контактного нагрева предлагается использовать трансформатор рельсосварочной машины, на которой непосредственно производится сварка. Проведена сварка полнопрофильных рельсов типа Р65 категории ДТ350 и изучена микроструктура полученного сварного соединения (рис. 4).

Микроструктура сварного соединения образца состоит из зоны сплавления и зоны термического влияния. Зона сплавления имеет ширину до 0,3 мм и характеризуется структурой крупнопластинчатого перлита и зернограничного феррита (см. рис. 4, а) зерна 4–3 номера по шкале ГОСТ 5639–82. Рядом с зоной сплавления находится участок шириной до 5 мм, имеющий структуру пластинчатого перлита

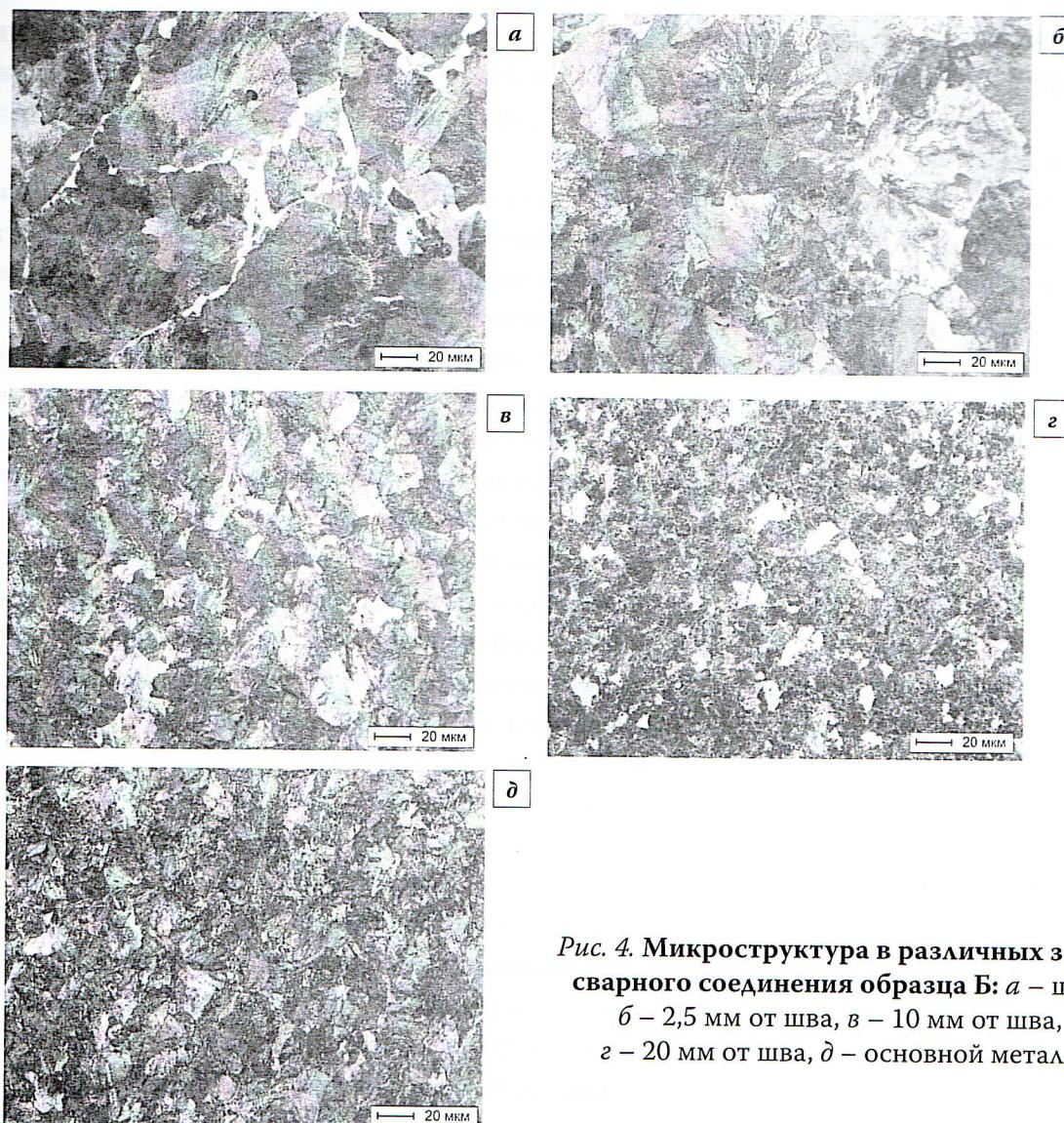


Рис. 4. Микроструктура в различных зонах сварного соединения образца Б: а – шов, б – 2,5 мм от шва, в – 10 мм от шва, г – 20 мм от шва, д – основной металл

без выделений феррита, который характеризуется крупнозернистой структурой (5–6 номера), образовавшейся в результате перегрева и рекристаллизации металла (см. рис. 4, б). Следующая зона мелкого зерна (см. рис. 4, в) шириной ~10 мм образовалась в результате перекристаллизации металла. Величина зерна в этой зоне оценивается номером 8–9 шкалы ГОСТ 5639–82. На границе зоны термического влияния и основной структуры (от 15 до 20 мм от зоны сплавления), микроструктура состоит в основном из зернистого перлита и типична для отпущеной структуры (см. рис. 4, г). Далее наблюдается структура основного металла – пластинчатого перлита (см. рис. 4, д).

Проведенные эксперименты позволили разработать новый способ контактнойстыковой сварки и машину для сварки [20–22], позволяющие получать сварное соединение рельсов типа Р65 категории ДТ350 со свойствами превосходящими технические требования СТО РЖД 1.08.002-2009.

Выводы

Определено, что при скоростях охлаждения более 5 °C/c в исследуемой рельсовой стали распад переохлажденного аустенита частично развивается в

области образования ферритокарбидной смеси и завершается мартенситным превращением. При электроконтактной сварке рельсов на жестких режимах происходит образование закалочных структур в результате высокой скорости охлаждения.

Установлены закономерности формирования структуры металла сварного шва, включая зону термического влияния дифференцированно темообработанных железнодорожных рельсов. В результате термодинамического моделирования установлено, что сталь 76ХСФ является заэвтектоидной. 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 Ac_1 и Ac_{st} увеличивается, что приводит к увеличению протяженность зоны с пониженной твердостью в сварном соединении.

Определено, что при сварке рельсов на жестких режимах электроконтактным способом пульсирующим методом оплавления и последующее управление охлаждением сварного соединения с помощью контактного нагрева позволяет получить минимальную протяженность участков с пониженной твердостью без образования закалочных структур в сварном соединении рельсов типа Р65 категории ДТ350.

Список источников

1. Позняков В.Д. Свойства сварных соединений рельсовой стали при электродуговой сварке / В.Д. Позняков, В.М. Кирьяков, А.А. Гайворонский, А.В. Клапатюк, О.С. Шишикевич // Автоматическая сварка. 2010. № 8 (688). С. 19–24.
2. Dahl B., Mogard B., Gretoft B., Ulander B. Repair of rails on-site by welding // Svetsaren. 1995. Vol. 50, No. 2. P. 10–14.
3. Гудков А.В., Лозинский В.Н. Новые технологические и технические решения в области сварки на железнодорожном транспорте // Вестник ВНИИЖТ. 2008. № 6. С. 3–9.
4. Калашников Е.А., Королёв Ю.А. Технологии сварки рельсов: тенденции в России и за рубежом // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 8. С. 2–6.
5. Полевой Е.В. Разработка технологии производства дифференцированно термоупрочненных рельсов на ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» / Е.В. Полевой, К.В. Волков, Е.П. Кузнецов, А.В. Головатенко, О.П. Атконова, А.М. Юннусов // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сб. науч. докл. / ОАО «УИМ». Екатеринбург, 2014. С. 93–101.
6. Girsch G., Keichel J., Gehrmann R., Zlatnik A., Frank N.: in: IHHA conference, Shanghai.
7. Mutton P., Cookson J., Qiu C., Welsby D.: Wear. 2016. Vol. 366. P. 368–377.
8. Schmid-Fetzer R. Assessment techniques, database design and software facilities for thermodynamics and diffusion / R. Schmid-Fetzer, D. Andersson, P. Y. Chevalier [et al.] // Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry. 2007. Vol. 31. P. 38–52.
9. Thermo-Calc®-Academic (Version 4.0.0.4674) [electronic resource]. — Software package (235 Mb). — Thermo-Calc® Software AB. — Stockholm, 2009.
10. Гуляев А.П. Металловедение: учебник для вузов / А. П. Гуляев, А. А. Гуляев. М.: ИД Альянс, 2012. 644 с.

11. Полевой Е.В. Влияние скорости охлаждения на формирование структуры рельсовой стали, микролегированной ванадием и ниобием / Е.В. Полевой, А.Б. Добужская, М.В. Темлянцев // Вестник ПНИПУ. Пермь. 2016. С. 7–20.
12. Шур Е.А. Комплексный метод контактной сварки рельсов / Е.А. Шур, В.А. Резанов // Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 3. С. 20–22.
13. Резанов В.А. Разработка метода оплавления контактной сварки легированных рельсов: дис. ... канд. техн. наук: защищена. М., 2013. 140 с.
14. Воронин Н.Н. Возможность повышения прочности сварных стыков рельсов / Н.Н. Воронин, В.А. Резанов, Н.Б. Сейдахметов // Инновационный транспорт - 2016: Сборник научных докладов. Екатеринбург, 2017. С. 320–324.
15. Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Прудников А.Н., Бащенко Л.П. Разработка и моделирование технологического процесса сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов. Моделирование процессов, протекающих при сварке и локальной термической обработке // Изв. вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63, № 2. С. 93–101.
16. Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Прудников А.Н., Бащенко Л.П. Разработка и моделирование технологического процесса сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов. Лабораторные исследования // Изв. вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63, № 7. С. 504–511.
17. Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Прудников А.Н., Бащенко Л.П. Разработка и моделирование технологического процесса сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов. Промышленное опробование // Изв. вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63, № 5. С. 3–10.
18. Сазонов П.Е. Особенности сварки новых типов рельсов категории ДТ350, ДТ370ИК // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений (по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» 25–27 сентября 2015 г.): Сборник научных докладов. Челябинск: УИМ, 2015. С. 189–192.
19. Козырев Н.А. Современные способы сварки рельсов / Н. А. Козырев, А. А. Усольцев, Р. А. Шевченко, Р. Е. Крюков, П. Е. Шишкин // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. Новокузнецк: СибГИУ, 2016. № 37. С. 166–174.
20. Пат. 2641586 МПК⁸ B23 K11/04 B 23 K101/26 C21D 9/50 C21 D9/04 Способ контактной стыковой сварки рельсов / Протопопов Е.В., Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Крюков Р.Е., Фейлер С.В., Усольцев А.А.; ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет». – № 2016148124/02(077314), Заявл. 07.12.2016.
21. Пат. 2725821 МПК⁸ B23 K 11/04, B23 K 101/26, C21D9/04, C21D9/50 Способ контактной стыковой сварки рельсов/ Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Уманский А.А.; ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет». – № 2019138988/02(076709), Заявл. 29.11.2019, опубл. 06.07.2020 Бюл. № 19.
22. Пат. 2683668 МПК⁸ B23 K 11/04, B23 K 11/25. Машина для контактной стыковой сварки / Протопопов Е.В., Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Кратько С.Н., Хомичева В.Е.; ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет». – № 2017145763/02(078361), Заявл. 25.12.2017, опубл. 01.04.2019 Бюл. № 10.