



Обзорная статья / Review article

УДК 621.791:625.143.48

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-41-68>

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СВАРКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ РЕЛЬСОВ С ПОЗИЦИИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И РЕКОНСТРУКЦИИ СКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ (ОБЗОР). ЧАСТЬ 2

© М.Г. Штайгер¹, А.Е. Балановский²

¹ПАО «Мечел»,

125167, Российская Федерация, г. Москва, ул. Красноармейская, 1.

²Иркутский национальный исследовательский технический университет,

664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Проанализировать работы в области сварки высокопрочных рельсовых сталей для бесстыкового пути с позиции структурообразования в сварном рельсовом стыке, выполненные в России и за рубежом. **МЕТОДЫ.** Сравниваются и анализируются различные технологии сварки рельсов. На основе металлографических исследований проанализирован структурный фактор сварного рельсового соединения. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Рассмотрены основные направления исследований и полученные разными авторами результаты в области сварки рельсов. Проанализированы особенности, предъявляемые к бесстыковому пути, в области сварки для различных технологических способов (алюминотермитная сварка, стыковая контактная сварка оплавлением, газопрессовая сварка, сварка трением, ручная дуговая сварка). Выполнен анализ работ с учетом получаемых структур в сварочном шве и зоне термического влияния для основных способов сварки рельса: алюминотермитного, газопрессового, стыкового с оплавлением, линейного способа трением, электродугового, электрошлакового. Выполнен сравнительный анализ макроструктуры и твердости сварного рельсового стыка для анализируемых способов сварки. Проведен анализ технологий сварки рельса, внедренных на дорогах РФ и мира. **ВЫВОДЫ.** Показано, что алюминотермитную сварку рельсов с позиции структурного фактора, низких значений ударной вязкости и трещиностойкости при отрицательных температурах, высокого уровня дефектообразования в рельсовом стыке нельзя рекомендовать при строительстве и реконструкции скоростных бесстыковых путей, поскольку этот способ не обеспечивает высокое качество рельсового стыка и снижает безопасность движения. Другие способы сварки рельса по физико-механическим свойствам в сварном шве обеспечивают высокое качество рельсового стыка и являются более перспективными. Однако необходимо провести дополнительные исследования процессов структурообразования в сварочном шве и зоне термического влияния в условиях отрицательных температур и высоких удельных нагрузок на рельсовый стык.

Ключевые слова: алюминотермитная сварка, стыковая контактная сварка с оплавлением, сварка трением, электрошлаковая сварка, структура, перлит, феррит, аустенит, твердость, дефекты рельса, контроль качества, твердость рельса, отказы, неисправности, бесстыковой путь, рельсовые стали.

Информация о статье. Дата поступления 05 апреля 2018 г.; дата принятия к печати 11 июня 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 июля 2018 г.

Формат цитирования. Штайгер М.Г., Балановский А.Е. Анализ технологий для сварки высокопрочных рельсов с позиции структурообразования при строительстве и реконструкции скоростных железнодорожных магистралей (обзор). Часть 2 // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 41–68. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-41-68

¹Штайгер Максим Григорьевич, директор Департамента развития железнодорожной продукции ООО «УК Мечел-Сталь».

Maxim G. Shtaiger, Director of the Railway Products Development Department of Mechel-Steel Management Company ООО.

²Балановский Андрей Евгеньевич, доцент кафедры машиностроительных технологий и материалов, e-mail: fuco.64@mail.ru

Andrey E. Balanovsky, Associate Professor of the Department of Machine-Building Technologies and Materials, e-mail: fuco.64@mail.ru



ANALYSIS OF WELDING TECHNOLOGIES OF HIGH-STRENGTH RAILS IN TERMS OF STRUCTURE FORMATION UNDER CONSTRUCTION AND RECONSTRUCTION OF HIGH SPEED RAILROADS (REVIEW). PART 2

M.G. Shtaiger, A.E. Balanovsky

Mechel PJSC,
1, Krasnoarmeiskaya St., Moscow, 125167, Russian Federation
Irkutsk National Research State Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

ABSTRACT. The **PURPOSE** of the study is to analyze the welding of high-strength rail steels for continuous welded rail in terms of structure formation in the welded rail joint performed in Russia and abroad. **METHODS.** Various technologies of rail welding are compared and analyzed. The structural factor in the welded rail joint is analyzed on the basis of metallographic studies. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** Consideration is given to the main research directions and the results obtained by different authors in the field of rail welding. Analysis is given to the requirements for the continuous rail track in the field of welding for various technological methods (aluminothermic welding, flash butt resistance welding, gas pressure welding, friction welding, manual arc welding). The works are analyzed taking into account the received structures in the welding joint and the zone of thermal influence for the main methods of rail welding including aluminothermic, gas pressure, resistance flash welding, linear friction method, electric arc, and electroslag methods. The macrostructures and hardness of the welded rail joint are compared for the welding methods under investigation. In addition, the rail welding technologies introduced on the Russian and foreign railroads are analyzed. **CONCLUSIONS.** It is shown that in terms of the structural factor, low values of impact resilience and crack resistance at negative temperatures, high level of defect formation in the rail joint, the aluminothermic welding of rails can not be recommended for the construction and reconstruction of high-speed continuous welded railroads. This method does not provide high quality of the rail joint and reduces traffic safety. Other methods of rail welding provide high quality of the rail joint and are more promising according to the physical and mechanical properties in the welded joint. However, it is required to conduct additional studies of the processes of structure formation in the welded joint and the zone of thermal influence under conditions of negative temperatures and high specific loads on the rail joint.

Keywords: *aluminothermic welding, resistance flash welding, friction welding, electroslag welding, structure, perlite, ferrite, austenite, hardness, rail defects, quality control, rail hardness, failures, faults, continuous welded rail, rail steels*

Information about the article. Received April 05, 2018; accepted for publication June 11, 2018; available online July 31, 2018.

For citation. Shtaiger M.G., Balanovsky A.E. Analysis of welding technologies of high-strength rails in terms of structure formation under construction and reconstruction of high speed railroads (review). Part 2. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 7, pp. 41–68. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-41-68 (In Russian).

Введение

В первой части обзора [1] авторами настоящей статьи проведен анализ причин образования дефектов в сварном рельсовом стыке на основе статистических данных ОАО «РЖД». Проанализирован один из распространенных способов сварки рельсов на дорогах ОАО «РЖД» – алюминотермитный [2–5]. Показано, что данный способ по своей физической сущности является чисто металлургическим процессом с последующей разливкой (заливкой) расплавленного металла и шлака в рельсовый

стык. Концы рельсового стыка перед заливкой металла нагреваются до температуры 800–900°C в соответствии с ТУ 0921-127-01124323-2005³ либо до 1200–1300°C согласно данным [4, 5]. С позиции структурного фактора для крупнозернистой перегретой структуры металла алюминотермитного стыка характерны пониженная пластичность и ударная вязкость, что подтверждается экспериментальными работами [7, 9]. Известно, что низкие значения ударной вязкости отрицательно влияют на устойчи-

³ТУ 0921-127-01124323-2005. Сварка рельсов алюминотермитным методом промежуточного литья. Технические условия; введ. 01.04.2005 г. М.: ВНИИЖТ, 2005. 16 с. / TU 0921-127-01124323-2005. Welding of rails by the aluminothermic method of intermediate casting. Technical conditions; introduced 1 April 2005. Moscow: VNIIZhT Publ., 2005. 16 p.



вость металла к хрупким разрушениям [8, 9]. Проведенный анализ технологических особенностей алюмотермитной сварки рельсов [1] показывает отсутствие фундаментальных теоретических и практических исследований макро- и микроструктурного состояния металла в зоне сварного стыка и термического влияния. Кроме того, и это особенно важно отметить, что невозможность контролирования алюмотермитного процесса на всех его стадиях ставит под сомнение его эффективность с точки зрения получения оптимальной структуры в сварочном стыке рельсовой стали.

С целью оценки эффективности дру-

гих способов сварки рельсов рассмотрим вопросы структурообразования в сварном шве и зоне термического влияния с учетом особенностей этих способов. Из открытых источников информации установлено, что распространенными способами сварки рельсов в различных странах являются электродуговой и электрошлаковый процессы, контактно стыковые способы оплавлением, газопрессовая сварка, линейная сварка трением. Данные технологические процессы сварки рельсов, относительно управляемые на всех стадиях осуществления, представлены ниже.

Электродуговая сварка рельсов штучными электродами, механизированная с использованием сварочных проволок

В настоящее время уже имеются разработки по сварке рельсовых сталей путем:

- регулирования термического цикла сварки и временных сварочных напряжений;
- применения сварочных электродов, сварочных проволок с низкой температурой плавления;
- снижения содержания диффузионного водорода в металле шва;
- применения дополнительных технологических приемов, таких как предварительная наплавка кромок разделки соединения;
- применения специальной техники сварки и др. [10–14].

Наиболее простым и доступным способом является регулирование термического цикла путем применения предварительного и сопутствующего подогревов соединения наряду с оптимальным выбором режимов сварки. Во многих случаях сварка среднелегированных углеродистых сталей при таком подходе позволяет практически полностью устранить опасность образования холодных трещин в соединении. Идеальным термическим циклом сварки считается такой, при котором не происходит перегрева металла в околошовном участке зоны термического влияния (ЗТВ) в резуль-

тате его быстрого нагрева и охлаждения при температурах выше температуры A_{c1} . Замедленное охлаждение ниже температуры A_{c1} способствует развитию в околошовном участке перлитного и промежуточного превращений переохлажденного аустенита [12, 13]. При этом существенно уменьшается количество закалочных структур, и сопротивляемость металла ЗТВ соединений замедленному разрушению повышается.

На поз. 1 рис. 1 приведена диаграмма превращения переохлажденного аустенита рельсовой стали, а на поз. 2 – характерные участки микроструктуры металла ЗТВ рельсовой стали с содержанием углерода 0,72%. Видно, что превращение переохлажденного аустенита при скоростях охлаждения 10–22° С/с происходит преимущественно в мартенситной области. Под действием термического цикла дуговой наплавки температура начала превращения аустенита в мартенсит ($T_{Mн}$) в металле ЗТВ стали М76 в зависимости от развития превращений в промежуточной области составляет 240–205°С. Температура начала мартенситного превращения – 220°С. Твердость закаленного металла составляет 60–65 HRC. Уменьшение скорости охлаждения в этом интервале не приводит к существенным изменениям в структуре.

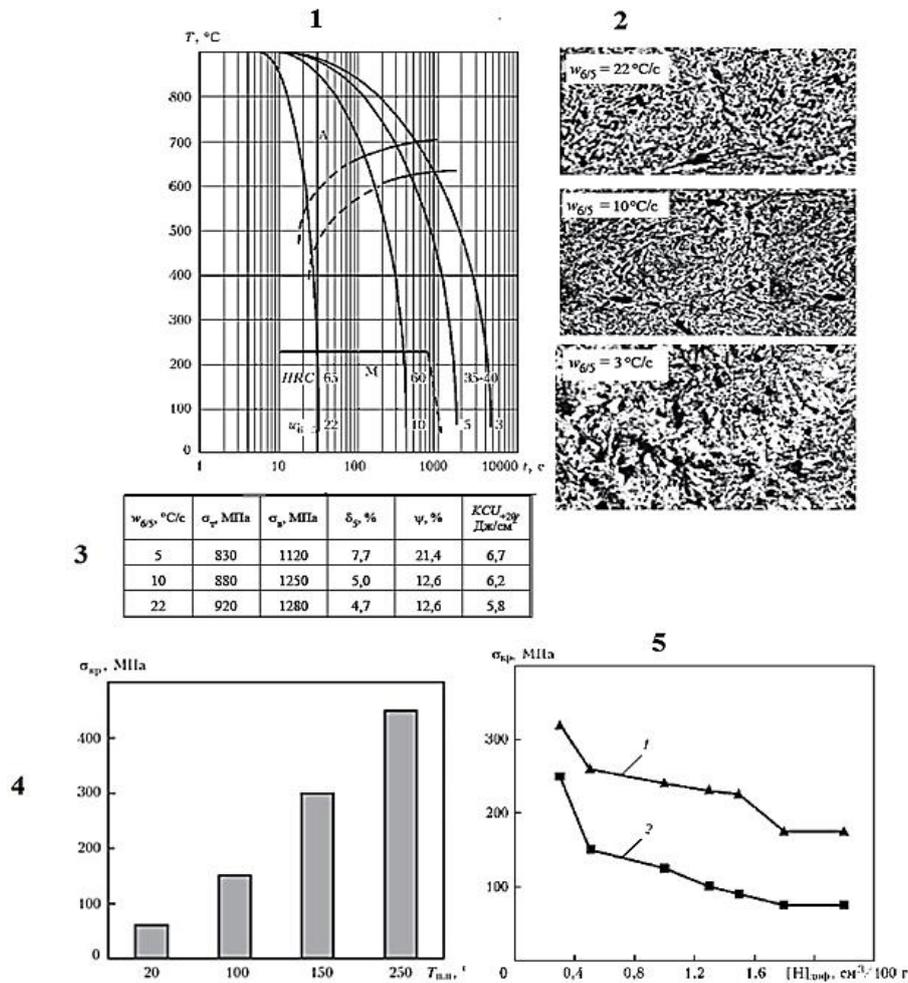


Рис. 1. Превращение переохлажденного аустенита в металле ЗТВ рельсовой стали с содержанием углерода 0,72% ($T_{\text{max}} = 1320^\circ\text{C}$; $t_{\text{нагр}} = 6 \text{ с}$) [12]
Fig. 1. Transformation of supercooled austenite in the heat-affected zone metal of rail steel with the carbon content of 0.72% ($T_{\text{max}} = 1320^\circ\text{C}$, $t_{\text{heat}} = 6 \text{ s}$) [12]

На рис. 1 представлены: 1 – термодинамическая диаграмма распада аустенита рельсовой стали в зависимости от скорости охлаждения; 2 – структура металла в зоне термического влияния в зависимости от скорости охлаждения; 3 – изменения механических свойств в зоне термического влияния от скорости охлаждения; 4 – влияние температуры предварительного подогрева на сопротивляемость замедленному разрушению сварных соединений рельсовой стали при сварке; 5 – влияние содержания диффузионно-подвижного водорода в сварном шве на критическое напряжение разрушения в зависимости от погонной энергии.

Дальнейшее замедление охлаждения ($w_{6/5} \leq 10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$) способствует уменьше-

нию твердости металла, что связано с кинетикой распада аустенита (рис. 1, поз. 1). При скорости охлаждения 3–5 $^\circ\text{C}/\text{c}$ закалочные структуры отсутствуют, превращение в металле ЗТВ происходит преимущественно в перлитной области, а твердость металла понижается до 35–40 HRC. Анализ диаграммы превращения аустенита позволяет утверждать, что в металле ЗТВ рельсовой стали с содержанием углерода 0,72% образование закалочных структур происходит при скоростях охлаждения выше 5 $^\circ\text{C}/\text{c}$. Применении предварительного подогрева соединений до 200 $^\circ\text{C}$ позволяет избежать закалочных структур в зоне термического влияния (рис. 1, поз. 3 и 4). Учитывая, что содержание углерода в рельсовой стали может быть более высоким (до 0,82% и



выше) и мартенситное превращение может протекать при более низких скоростях охлаждения ($w_{6/5} \leq 5$ °C/c), температура предварительного подогрева $T_{п.п}$ при сварке рельсов должна быть не менее 250–300°C. Важно отметить, что при дуговой сварке высокопрочных рельсовых сталей, содержание углерода в которых превышает 0,60%, наиболее опасным местом соединений, где наиболее вероятно образование холодных трещин, является металл участка перегрева ЗТВ [12–14]. Это связано с особенностями влияния термомеханического цикла дуговой сварки на процесс гомогенизации аустенита в высокотемпературной области термического цикла и последующим γ - α -превращением при охлаждении. В результате в металле участка перегрева ЗТВ формируется структура с повышенной плотностью дислокаций и высоким уровнем внутренних напряжений. Это приводит к тому, что даже при сравнительно низком содержании диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле (до 2,2 см³/100 г) при сварке высокопрочной рельсовой стали критические напряжения при замедленном разрушении составляют всего 0,1–0,25 от предела текучести металла ЗТВ. На рис. 1, поз. 5, показаны экспериментальные значения снижения критических напряжений при замедленном разрушении в зависимости от различных значений погонной энергии (кривые 1 и 2) и содержания диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле.

Известны технологии электродуговой сварки рельсов в полевых условиях, которые используются на железных дорогах Швеции уже в течение многих лет⁴ [14, 16]. Аналогичные технологии, разработанные компанией ESAB, одобрены для применения на железных дорогах Дании и

Норвегии.

Известны работы японских ученых в области дуговой сварки рельсов [17, 18]. В частности, в 1963–1970 гг. в Японии был разработан «Enclosed manual metal arc welding process used for field welding rails» – дословно: процесс ручной дуговой сварки закрытой дугой рельсов [19]. По запросу железной дороги Японии компания Kobe Steel разработала в 1963 г. способ сварки рельсов Enclosed arc welding process для строительства скоростной линии Ямагата–Шинкасен (Shinkansen Super-Express). Для сварки рельсов закрытой дугой были разработаны новые сварочные электроды основного типа LB-116(E11016-G) и LB-80EM, что позволило значительно улучшить качество сварных соединений по сравнению с термитной сваркой. Время сварки стыка с последующей термообработкой составляло 75 мин (для сравнения, общее время сварки рельсового стыка алюминотермитным способом – 55 мин⁵). Температура предварительного подогрева концов рельса составляла 500°C, диаметр сварочных электродов – 5–8 мм, сила сварочного тока – 250–400 А [17–19].

Необходимо отметить особенность данного способа. Известно, что при сварке шлак играет несравнимо большую роль, чем в металлургии стали: в процессе сварки шлак является не только регулятором хода химических реакций, как это имеет место в печах, но и фактором формирования и термической обработки соединения, фактором технологическим, определяющим возможность сварки в различных пространственных положениях шва, использования при этом определенного рода электрического тока, а также возможность наблюдения формирования металла шва. Металлургов не интересуют физико-химические свойства шлака после заливки

⁴Dahl B., Mogard V. Ремонт рельсовых путей на месте методом сварки: рекламный буклет ESAB [Электронный ресурс]. URL: <http://docplayer.ru/70482797-Remont-relsovyh-putey-na-meste-metodom-svarki.html> / Dahl B., Mogard V. On-site repair of rail tracks by welding: ESAB advertising booklet [Electronic resource].

⁵Технология алюминотермитной сварки рельсов с коротким временем подогрева (SkV, SkV-L 50, SkV-L 75). СПб.: Изд-во ООО «Алюмотермитная сварка», 2007. 21 с. / Technology of aluminothermic welding of rails with a short heating period (SkV, SkV-L 50, SkV-L 75). SPb.: Publishing house of Aluminothermic welding JSC, 2007. 21 p.



стали, тогда как для сварщиков свойства шлака и после наложения шва в интервале температур от кристаллизации до полного остывания имеют большое значение: шлак в процессе его остывания должен равномерно распределяться по поверхности наплавленного металла, долгое время оставаться газопроницаемым, быстро кристаллизоваться без растрескивания, легко отделяться от металла шва. Наибольшее влияние на свойства стали оказывает оксид железа (FeO), поскольку только он растворяется в железе. Присутствие кислорода в металле шва в виде твердого раствора или включений окислов понижает механические свойства, снижает стойкость металла против коррозии, увеличивает вероятность хрупкого разрушения. Растворимость оксида железа в стали зависит главным образом от содержания углерода и температуры металла. С увеличением содержа-

ния углерода в стали растворимость оксида железа снижается. При высокой температуре стали растворимость оксида железа выше, чем при низкой температуре. При охлаждении стали происходит выпадение из раствора оксида железа. При высоких скоростях охлаждения часть оксида железа остается в растворе, образуя шлаковые прослойки между зернами металла. Учитывая все эти факторы, специалисты компании Kobe Steel взяли за основу электроды с основным покрытием, сварочные шлаки которых имеют высокие раскислительные свойства, когда неметаллические включения из наплавленного металла переходят в сварочный шлак и наплавленный металл не имеет шлаковых и неметаллических включений, в то время как электроды с рутиловым и кислым покрытием оставляют в металле неметаллические включения (рис. 2).

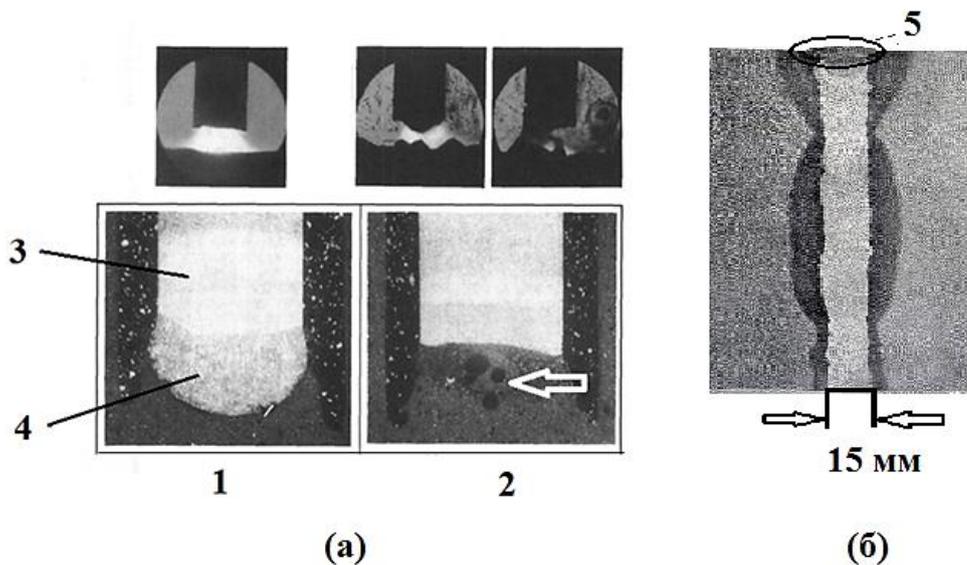


Рис. 2. Визуализация шлаковой ванны и наплавленного металла при сварке рельса электродами (а) с основным покрытием (поз. 1) и рутиловым (поз. 2) и поперечный темплет макроструктуры рельсового стыка, сваренный по способу Enclosed arc welding process (б):

1 – сварочная ванна при сварке с основным покрытием; 2 – сварочная ванна при сварке рутиловыми электродами (стрелкой обозначены неметаллические включения); 3 – сварочный шлак; 4 – наплавленный металл; 5 – облицовочные упрочняющие швы на поверхности головки рельса

Fig. 2. Visualization of the slag bath and welded metal under welding of rail by electrodes (a) with the main coating (1) and rutile coating (2) and the transverse template of the macrostructure of the rail joint welded by the enclosed arc welding (б):

1 – welding bath when welding with the main coating; 2 – welding bath when welding by rutile electrodes (the arrow indicates non-metallic inclusions); 3 – welding slag; 4 – weld metal; 5 – facing reinforcement welds on the rail head surface



Кроме того, покрытие основного типа составлено на основе плавикового шпата (CaF_2) и карбонатов кальция и магния (мрамор, магнезит, доломит). При высокой температуре дуги карбонаты диссоциируют с образованием окислов кальция, магния, окиси и двуокиси углерода. Это обеспечивает высокий коэффициент основности образующихся шлаков и создает безводородную газозащитную среду. Наличие в покрытиях фтористого кальция придает им способность обезводороживать металл, что достигается связыванием водорода в термически стойкие соединения. Низкое содержание водорода в наплавленном металле делает электроды с основным покрытием незаменимыми при сварке рельсовых сталей с высоким содержанием углерода, склонных к образованию холодных трещин вследствие водородного охрупчивания, связанного с диффузией водорода из расплавленного металла шва в околошовную зону. Малая окислительная способность основных покрытий обеспечивает высокий коэффициент перехода легирующих элементов из электрода в сварной шов, благодаря чему достигается эффективное раскисление и легирование наплавленного металла. Важным технологическим преимуществом электродов с основным покрытием является образование в процессе плавления «юбочки» (kozyрек, втулочка) на конце электрода вследствие неравномерности плавления электродного стержня и покрытия, связанное с отставанием плавления обмазки от расплавления стержня. Изолируя факел дуги от контакта с воздухом, «юбочка» способствует предохранению плавящегося стержня от насыщения расплавленных капель кислородом и азотом (рис. 2, а, поз. 1). Реагирующая поверхность обмазки благодаря «юбочке» значительно увеличивается, вследствие чего уменьшается вредное влияние на процесс сварки неравномерности распределения ее компонентов.

«Юбочка» существенно облегчает ведение сварки при малых углах и большой глубине разделки, а также на вертикальной плоскости и в потолочном положении. Это

позволяет уменьшить зазор между рельсами до 12–15 мм (рис. 2, б) и получить узкий сварочный шов, зону термического влияния, а также более качественно обеспечить газовую защиту расплавленного металла от окислительного воздействия кислорода воздуха.

В ходе комплексных исследований процесса Enclosed arc welding по сварке рельсов группе японских ученых (К. Karimine, К. Uchino, М. Okamura, Т. Ямамото) удалось добиться снижения времени сварки рельсового стыка до 30 мин, температуры предварительного подогрева – до 300°C , а также снизить силу сварочного тока. Кроме того, ими разработаны новые сварочные низководородистые электроды, обеспечивающие высокие показатели механических свойств наплавленного металла.

Компанией «Nippon Steel» разработан новый процесс, призванный в перспективе заменить алюмотермитную и ручную Enclosed arc welding process рельсов [18, 19]. Он основан на комбинации сварки в защитных газах вращающимся плавящимся электродом (сварка подошвы) и электрошлаковой сварки (сварка шейки и головки рельсов). Весь процесс осуществляется в автоматическом режиме с помощью аппарата, контролируемого компьютером. Данная технология обеспечивает более высокие механические свойства сварных соединений, чем алюмотермитная сварка. Время сварки стыка составляет около 100 мин, хотя имеется возможность в перспективе сократить его до 50–60 мин, что всего лишь приблизит данный процесс по производительности к алюмотермитной сварке.

В работах сотрудников фирмы ESAB подробно описана технология сварки рельса по способу Enclosed arc welding [14–16]. Последовательность операций представлена на рис. 3. Зазор между свариваемыми торцами рельсов должен составлять 15–18 мм. Для рельсов R200 температура подогрева составляет 350°C , для рельсов R260 – 400°C . Подкладку ОК Backing 21.21 размером $200 \times 60 \times 13$ мм устанавли-



вают и фиксируют под зазором между рельсами (рис. 3, поз. 1, 2). Данная подкладка обеспечивает плавный переход между наплавляемым металлом и материалом рельса. Это очень важно, так как усталостная прочность сварного шва в значительной мере зависит от его формы и отсутствия концентраторов напряжений. Сварка начинается с подошвы рельса (рис. 3, поз. 2). Корневые валики наплавляются в соответствии со схемой, представленной на рис. 3. Наплавляемые сверху валики на подошве должны образовывать максимально гладкий шов с плавными переходами к основному металлу. Подрезы не допускаются. После контроля рабочей температуры с обеих сторон рельса закрепляются медные башмаки (рис. 3, поз. 3, 4). При заварке шейки рельса электрод

необходимо вести по прямоугольному контуру, образованному стенками рельса и башмаков, с небольшими остановками в углах (рис. 3). Смену электродов надо выполнять очень быстро, пока шлак не успел затвердеть. Когда наплавленный металл достигнет головки рельса, движение электрода надо изменить на колебательное. После окончания сварки медные башмаки удаляются, а головка рельса проковывается, пока она не остыла. На рис. 3, поз. 4, показан готовый шов.

На рис. 4 приведена микроструктура металла шва, состоящая в основном из феррита с небольшим количеством перлита. Наблюдаемые зерна феррита имеют небольшие размеры, что обеспечивает более высокую прочность и пластичность металла шва рельса [15, 16].

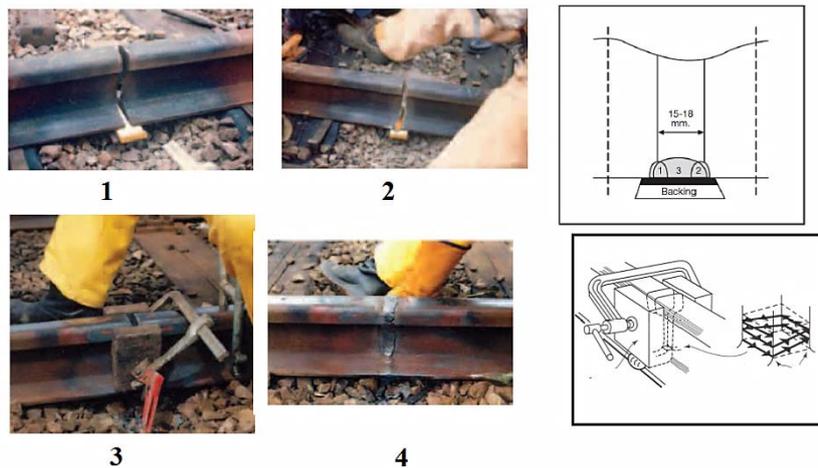


Рис. 3. Технология ручной дуговой сварки рельса, разработанная фирмой ESAB
Fig. 3. ESAB company technology of manual arc welding of rails

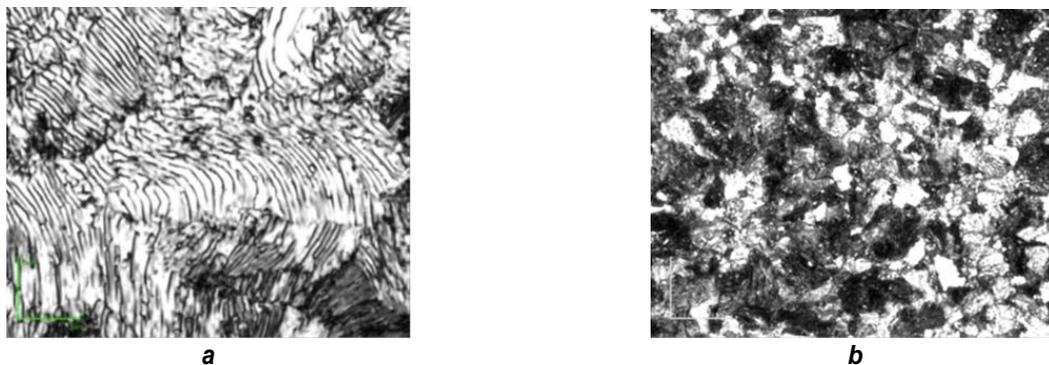


Рис. 4. Микроструктура металла шва после ручной дуговой сварки:
а – основной металл; б – металл шва
Fig. 4. Microstructure of weld joint metal after manual arc welding:
a – basic metal; b – joint metal



В работах [12, 13] рассмотрена сварка рельсов с использованием сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 1,2 мм. Показано, что в металле 3ТВ рельсовой стали с содержанием углерода 0,72% образование закалочных структур происходит при скоростях охлаждения выше 5 °С/с. Учитывая, что содержание углерода в рельсовой стали может быть более высоким (до 0,82%) и мартенситное превращение может протекать при более низких скоростях охлаждения ($v_{6/5} \leq 5$ °С/с), температура предварительного подогрева $T_{п.п}$ при сварке рельсов должна быть, по мнению авторов, не менее 250–300 °С. Без применения предварительного подогрева до температуры 250 °С исключить образование холодных трещин в соединениях невозможно. Увеличение погонной энергии сварки способствует только замедлению процессов развития холодных трещин в сварных соединениях, но не предотвращает их зарождение. При сварке проволокой Св-08Х20Н9Г7Т (А+Ф) на погонной энергии 8,6 кДж/см без предварительного подогрева ($T_{п.п} = 20$ °С) критические напряжения разрушения составляют всего 100 МПа. Это немного выше, чем при аналогичных условиях сварки ферритно-перлитной проволокой Св-08Г2С (Ф+П), но существенно ниже уровня $\sigma_{кр}$, который обеспечивается применением предварительного подогрева металла до температуры 250 °С. Из анализа работ [12–19] можно сделать важный практический вывод: оптимальная температура предварительного нагрева для сварки рельсовых сталей находится в диапазоне 300–380 °С.

Авторы работы [20], проведя анализ технологий сварки рельса, показали, что в настоящее время электродуговая ванная сварка покрытыми электродами широко применяется для соединения трамвайных и крановых рельсов. Однако этот способ, по мнению авторов, не обеспечивает надежного качества сварных соединений, так как существенно зависит от квалификации сварщика и значительно уступает по производительности другим способам сварки. С целью повышения производительности

разработан процесс полуавтоматической электродуговой ванный сварки стыков рельсов, который применяла Берлинская транспортная компания при ремонте железнодорожных путей метрополитена. При этом использовался специальный удлиненный токоподводящий мундштук и самозащитная порошковая проволока. В результате производительность сварки повысилась на 30% по сравнению с ручной электродуговой сваркой покрытыми электродами. В Институте электросварки (ИЭС) им. Е.О. Патона Национальной академии наук (НАН) Украины разработана новая технология сварки рельсов [20], получившая название *автоматической электродуговой сварки ванный способом с использованием плавящегося мундштука*, или сокращенно – *дуговой сварки плавящимся мундштуком* (рис. 5). Его отличительной особенностью является использование самозащитной порошковой проволоки, подаваемой через продольный канал в специальном плоском плавящемся мундштуке, что позволяет выполнять сварку при зазоре в стыке 12–16 мм, а в отдельных случаях – до 22 мм. Предлагаемый способ сварки, являясь дальнейшим развитием электродуговой ванный сварки, благодаря механизации процесса позволяет в 2–3 раза увеличить производительность работ и одновременно существенно улучшить качественные показатели сварных соединений, сохраняя высокую мобильность и универсальность оборудования.

Сварку осуществляют плавящимся мундштуком, совершающим возвратно-поступательные перемещения переменной амплитуды, благодаря чему обеспечивается полный провар свариваемых кромок по всему сечению рельса. Сварку подошвы выполняют на керамической подкладке многопроходной сваркой, после чего специальным рычажным механизмом без прерывания процесса осуществляют прижатие медных башмаков, обеспечивающих формирование боковых поверхностей шва при сварке шейки и головки рельсов. В большинстве случаев предварительный подогрев перед сваркой не проводится, и лишь



при температуре ниже $+5^{\circ}\text{C}$ требуется подогрев стыка до $250\text{--}300^{\circ}\text{C}$, при этом сварку можно выполнять при температуре окружающего воздуха до -5°C . Твердость металла шва сварного соединения рельсов Р65 составляет НВ 260–320, предел прочности металла шва – 800–900 МПа. Разрушающая нагрузка при испытании рельсов на статический изгиб составляет 1500–1650 кН при прогибе 16–22 мм [20]. Преимуществами данного способа сварки являются:

- более высокое и стабильное качество сварных соединений по сравнению с ручной дуговой ванной и алюминотермической сваркой;

- высокая производительность (до 16 стыков за смену);

- низкое энергопотребление (потребляемая мощность – до 15 кВт·А);

- легкое перенастраивание оборудования для сварки рельсов различных типоразмеров;

- высокая мобильность, что особенно важно при выполнении ремонтных работ.

Кроме того, при этом способе сварки не требуется защитный газ или флюс, подогрев (при температуре $+5^{\circ}\text{C}$ и выше) и термическая обработка стыка.

По мнению авторов [20], разработанный ИЭС им. Е.О. Патона новый процесс электродуговой сварки рельсов благодаря своим преимуществам может рассматриваться в качестве альтернативы существующим способам сварки при выполнении работ в условиях пути.

В 1970-е гг. сотрудниками ИЭС им. Е.О. Патона был запатентован способ сварки закладным электродом. Данный способ является наиболее производительным при условии серийности производства и не требует последующей термообработки, как в случае электрошлаковой сварки (рис. 6).

При сварке закладным электродом качество шва по механическим свойствам не уступает обычным дуговым процессам сварки. Также экономится сам металл, поскольку сварка выполняется в узкий зазор,

равный 8–10 мм. Толщина свариваемого металла составляет 16–150 мм. Процесс основан на способности электрической дуги самостоятельно перемещаться по торцу плоского изолированного электрода большого сечения (до 1000 мм^2), предварительно заложенного в стык между свариваемыми деталями (см. рис. 6). При этом автоматически устанавливаются основные параметры режима сварки и обеспечивается эффективное проплавление стыка при низких плотностях тока на электроде в диапазоне $0,7\text{--}3,0\text{ А/мм}^2$. Закладной электрод имеет специальное электроизолирующее покрытие толщиной до 1,5 мм. Кроме электроизоляции покрытие электрода обеспечивает эффективную газошлаковую защиту зоны сварки (содержание остаточного водорода в шве менее $5\text{ см}^3/100\text{ г}$), а также рафинирование и дополнительное легирование металла шва. Дефицит металла шва компенсируется либо за счет перемещения в зону сварки самого закладного электрода, либо посредством подачи через него порошковых или сплошного сечения проволок. При использовании проволок для компенсации дефицита металла шва закладной электрод выполняет функцию неподвижного плавящегося мундштука. Необходимо отметить, что по своей физической сущности сварка закладным электродом является усовершенствованным вариантом процесса электродуговой ванной сварки, но отличается тем, что с целью повышения производительности и качества сварного соединения вместо электродов для ручной дуговой сварки используется специальный плоский электрод, форма которого подобна сечению свариваемого рельса. Этот электрод устанавливается в зазоре между свариваемыми рельсами, стык закрывается формирующими приспособлениями, на конце электрода зажигается дуга и начинается процесс сварки, который осуществляется в автоматическом режиме. Время сварки одного стыка в зависимости от типоразмера рельса составляет 5–8 мин при номинальном сварочном токе 500–600 А.

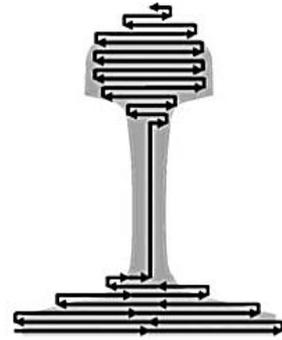


Рис. 5. Аппарат APC-4 для сварки рельсов и схема перемещения мундштука при электродуговой сварке рельсов ванным способом с использованием плавящегося мундштука
Fig. 5. ARS-4 apparatus for welding rails and a diagram of contact tube motion under electric arc welding of rails by the bath method using a consumable contact tube

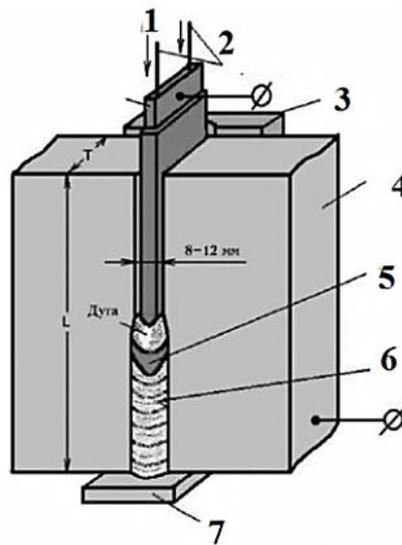


Рис. 6. Схема сварки рельс закладным электродом: 1 – изолирующий плавящийся электрод; 2 – присадочные проволоки; 3 – формирующие накладки; 4 – основной металл; 5 – сварочная ванна; 6 – шов; 7 – подкладка
Fig. 6. Diagram of rail welding by a buried electrode: 1 – insulating melting electrode; 2 – filler metal wires; 3 – forming pads; 4 – base metal; 5 – welding bath; 6 – joint; 7 – lining

Преимуществами данного способа являются [20]:

- высокое и стабильное качество сварных соединений;
- высокая производительность (2–3 стыка в час на одной установке);
- сварка ведется порошковой проволокой специального состава, при этом не требуется защитный газ или флюс;
- высокая мобильность, что особенно важно при выполнении ремонтных работ.

Одним аппаратом в смену можно

сварить до 20 стыков. Этапы сварки показаны на рис. 7. Таким образом, технологии сварки рельсов с использованием электрической дуги штучными электродами и сварочными проволоками позволяют регулировать термический цикл нагрева и охлаждения и, следовательно, управлять процессами структурообразования в металле шва и зоне термического влияния рельсовых стыков, что обеспечивает высокие механические свойства металла шва по сравнению с алюминотермитными стыками.

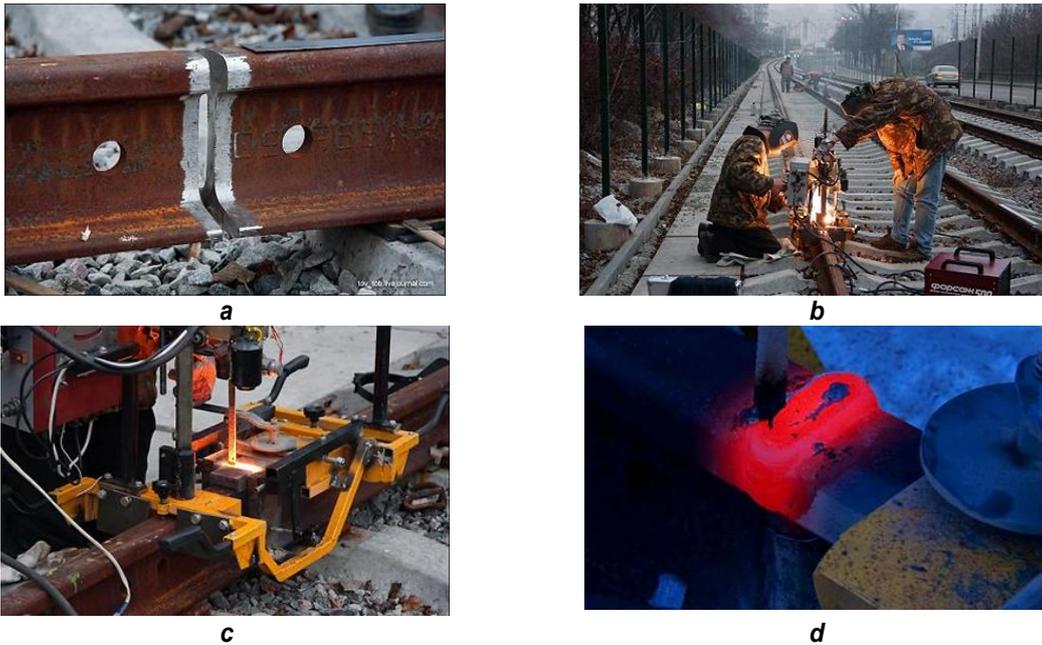


Рис. 7. Этапы выполнения сварки рельса закладным электродом:
a – подготовка под сварку концов рельсов; б – выставление зазора между рельсами;
с – процесс сварки; d – внешний вид стыка после сварки
Fig. 7. Stages of rail welding by a buried electrode:
a – rail end preparation for welding; b – gap setting between the rails;
с – welding process; d – view of the joint after welding

Электрошлаковая сварка рельсов

Электрошлаковая сварка рельсов не совсем отвечает требованиям к сварочным процессам по таким критериям, как минимальное время сварки, портативность и простота оборудования, на что указано в работе [21]. Однако работы по усовершенствованию данного способа сварки и сегодня активно ведутся в США и ряде стран Евросоюза. Известно, что первые работы в области ЭШС в СССР были выполнены еще в 1940–50-е гг. [22–26]. В ходе работы над технологией дуговой автоматической сварки под флюсом вертикальных швов с принудительным формированием Г.З. Волошкевич обнаружил, что в некоторых случаях (при глубине шлаковой ванны более 40 мм и ее перегреве) дуговой процесс становится неустойчивым и даже прекращается, однако электродный металл, флюс и крошки плавятся [22, 23]. Процесс плав-

ления осуществлялся за счет тепла омического сопротивления при прохождении тока через жидкий шлак. В 1949 г. на основе этого процесса в ИЭС им. Е.О. Патон и других организациях Советского Союза стали разрабатывать ЭШС. Первыми приняли участие в освоении и совершенствовании нового вида сварки Таганрогский котельный завод «Красный котельщик» (ТКЗ), Барнаулский котельный завод и Новокраматорский машиностроительный завод им. И.В. Сталина (НКМЗ). На ТКЗ были сварены сосуды высокого давления с толщиной стенки 90 мм. В 1951 г. на НКМЗ ЭШС применили при изготовлении статоров гидротурбин массой до 80 т, а позднее валов гидротурбин и гидрогенераторов. В 1956 г. вышла первая в мире книга, посвященная ЭШС⁶.

В 1959 г. было выпущено второе, значительно дополненное издание, пере-

⁶Электрошлаковая сварка / под ред. Б.Е. Патона. М.: Машгиз, 1956. 168 с. / Electroslag welding, under edition of B.E. Paton. Moscow: Mashgiz Pub., 1956. 168 p.



веденное затем на английский язык. Зарубежные фирмы получили подробную информацию о новом процессе, что значительно облегчило освоение ими ЭШС. В настоящее время электрошлаковая технология широко применяется при сварке крупных металлоконструкций, начиная от элементов зданий и мостов до корпусов крупных морских судов. Неоднократно предпринимались попытки разработать процесс электрошлаковой сварки рельсов [2, 24, 25], однако, несмотря на достаточно серьезную проработку вопроса достичь удовлетворительных результатов пока не удалось^{7,8}. В настоящее время по данным обзорных работ [26, 27] электрошлаковую сварку рельса пытаются адаптировать благодаря разработкам компании Electoslag System Technology and Development (ESTD). Одним из достоинств электрошлаковой сварки, по мнению разработчиков, является то, что микроструктура металла сварочного шва в общем случае аналогична получаемой при обычной алюминотермитной сварке, но имеет весьма низкую пористость и меньше инородных включений, часто появляющихся при расплавлении металла.

Начало работ в данном направлении было положено исследованиями Орегонского технологического института (США) в середине 1980-х гг. [27]. В 2000 г. компания ESTD приступила к разработке соответствующих технологий и оборудования, а в 2002 г. получила грант на продолжение этих разработок от Совета по транспортным исследованиям (Transportation Research Board, TRB) в соответствии с программой поощрения важнейших инноваций (Innovations Deserving Research Exploratory Analysis Program, IDEA). После этого в разработках и исследованиях был достигнут прогресс в части оптимизации оборудования и приспособлений, хотя добиться значимого улучшения механических характе-

ристик сварочных швов при сварке рельсов пока не удалось [26, 27] (основные результаты см. на рис. 7). В 2006 г. Департамент транспорта США официально классифицировал технологию электрошлаковой сварки в качестве дополнительной альтернативы традиционным сварочным процессам, применяемым в полевых условиях. В 2007 г. Департамент транспорта США и компания ESTD заключили соглашение о дальнейшем сотрудничестве в рамках программы «Стратегическая исследовательская инициатива по совершенствованию сварки рельсов» (Improved Rail Welding Strategic Research Initiative – IRWSRI).

На первом этапе были исследованы швы рельсовых стыков, выполненные по технологии ЭШС, с целью определения оптимальных параметров сварочного процесса. На рис. 8 схематично представлена технология электрошлаковой сварки, общие виды отдельных этапов, макро- и микроструктура шва, а также зоны термического влияния (крайний справа снимок макро- и микроструктур). Эти исследования, как и намечалось, позволили реализовать на следующем этапе работ требуемые механические показатели сварочных швов. Проведенные в ходе реализации первого этапа исследования включали распиливание многочисленных образцов сварочных швов с их металлографическим изучением, а также анализ причин дефектов в швах, выявленных при испытаниях на статический изгиб. Результаты этих исследований показали, что микроструктура сварочных швов полностью состояла из перлита, за исключением нескольких участков в граничных зонах с мартенситной структурой (см. рис. 8). Кроме того, недостаточное расплавление металла в зоне подошвы рельса обуславливало уменьшение допустимой деформации при статическом изгибе. В соответствии с полученными на первом этапе результатами было рекомендовано совершенство-

⁷Turpin B., Danks D. Electroslag field welding of railroad rail. Contract Number HSR-37. Transportation Research Board. Washington, D.C. 2003.

⁸Gutscher D., Danks D., Turpin B. Electroslag welding: a potential alternative to conventional rail welding. Proc. technology digest TD-08-043. Association of American railroads, transportation technology center, Inc., Pueblo, Colo, Oct., 2008.



вать управление термическим циклом процесса сварки за счет изменения конструкции блочного кристаллизатора и целенаправленного предварительного нагрева.

На втором этапе с использованием рекомендаций, сформулированных по результатам первого этапа [26, 27], были уточнены режимы процесса ЭШС для проведения после этого испытаний в целях определения параметров полученных сварочных швов. На третьем этапе было продолжено совершенствование технологии электрошлаковой сварки на основе резуль-

татов второго этапа. Изготовленные при этом сварные рельсовые плети были уложены в путь на одном из путей полигона FAST (США) для испытаний в условиях высоких осевых нагрузок. Испытания на полигоне FAST продолжаются. Дальнейшее совершенствование сварочного процесса планируется осуществить на четвертом этапе, после чего предполагается начать испытания в реальных эксплуатационных условиях на действующих железных дорогах [27].

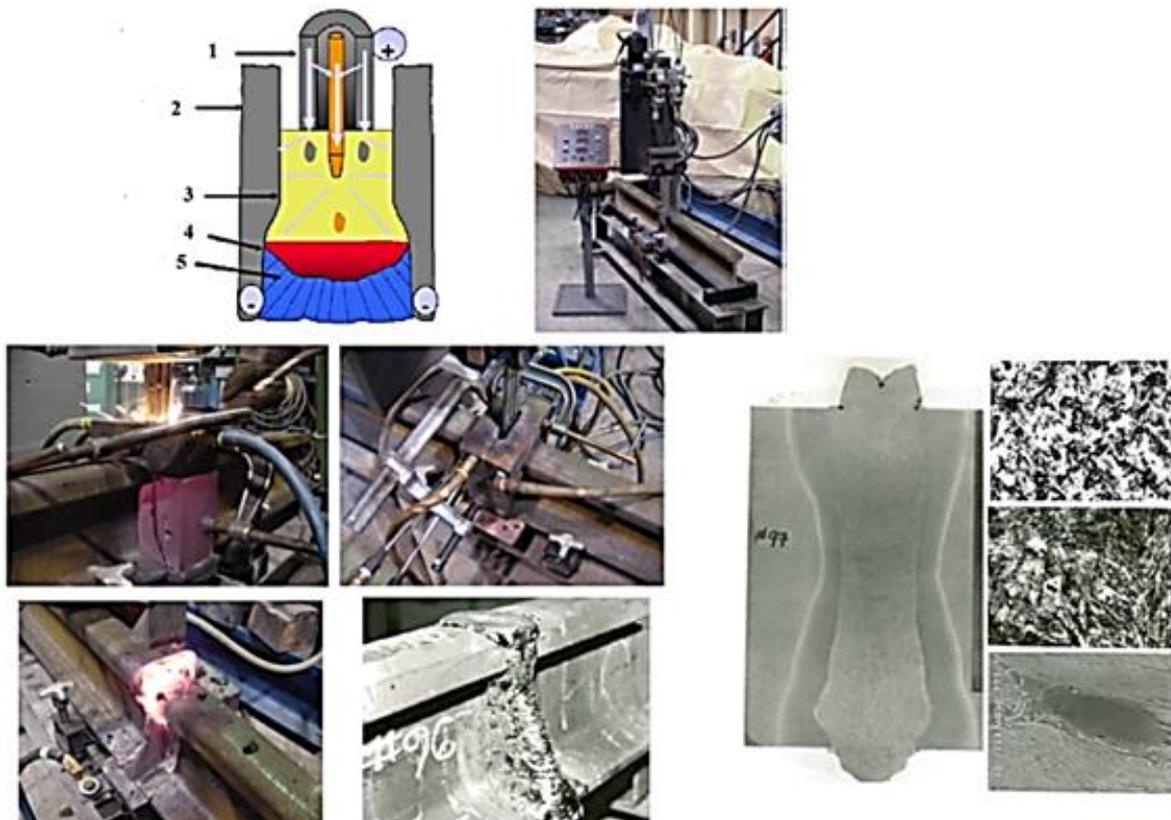


Рис. 8. Основные результаты по электрошлаковой сварке рельса:
1 – проволкаподающий механизм; 2 – поверхность рельса; 3 – шлаковый слой;
4 – расплавленный металл; 5 – закристаллизовавшаяся металл стыка

Fig. 8. Main results of electroslag welding of rail:
1 – wire feeder; 2 – rail surface; 3 – slag layer; 4 – molten metal;
5 – crystallized joint metal

Газопрессовая сварка рельсов

Согласно принятой сегодня терминологии, газопрессовая сварка – это вид сварки давлением, при которой соединение встык нагревается газовым пламенем до оплавления или пластичного состояния ме-

талла с последующим сжиманием (осаживанием) соединяемых частей [28–30]. Нагрев обычно ведется ацетиленокислородным пламенем. Газопрессовая сварка характеризуется предварительным



выполнением цикла тепловой подготовки всего сечения, подлежащего сварке, с последующим одновременным сдавливанием по всей свариваемой поверхности. Газопрессовая сварка подразделяется на сварку с нагревом металла до пластического состояния и сварку с нагревом металла

до оплавления. При последующем сжатии жидкий металл выдавливается из зазора, и производится обычная сварка давлением металла, находящегося в твердом состоянии. Схематизация основных этапов сварки рельса представлена на рис. 9.



Рис. 9. Схематизация основных этапов газопрессовой сварки рельсов в Японии:
1 – тщательная очистка торцов поверхности рельса; 2 – установка и регулировка
основного оборудования для сварки; 3 – нагрев концов рельса; 4, 5 – осадка рельса;
6 – сваренный рельсовый стык

Fig. 9. Schematization of the main stages of gas-pressure welding of rails in Japan:
1 – thorough cleaning of the rail end butt surface; 2 – installation and adjustment of the main welding
equipment; 3 – heating of the rail ends; 4, 5 – draft of the rail; 6 – welded rail joint



Необходимо отметить, что при практической реализации большинства известных способов горячего формообразования металл в той или иной мере рекристаллизуется. Совокупность структурных изменений, вносимых в аустенит при горячей деформации и передаваемых в нашем случае перлиту и ферриту в результате охлаждения и сохраняющихся при последующем отпуске, будет определять влияние этой обработки на механические свойства рельсовой стали. Для понимания природы образования соединения между материалами в твердой фазе применительно к данному процессу необходимо обратиться к работам [28–30], где показано, что процесс образования соединения при любых способах сварки давлением без расплавления следует рассматривать как процесс, протекающий в три основные стадии:

1. Образование физического контакта, т.е. сближение атомов соединяемых материалов за счет пластической деформации на расстояние, при котором возникает физическое взаимодействие, обусловленное силами Ван-дер-Ваальса, или на расстояние, при котором возможно слабое химическое взаимодействие.

2. Активация контактных поверхностей (образование активных центров). При сварке однородных металлов первая и вторая стадии практически сливаются в одну, так как активация обеих контактных поверхностей начинается уже в процессе их сближения при смятии отдельных микровыступов за счет совместной пластической деформации.

3. Объемное взаимодействие. Эта стадия наступает с момента образования активных центров на соединяемых поверхностях. В течение этой стадии происходит развитие взаимодействия соединяемых материалов как в плоскости контакта с образованием прочных химических (в частном случае металлических) связей, так и в объеме зоны контакта. Этот процесс протекает на активных центрах, представляющих собой в частном случае дислокации с полем напряжения. В плоскости контакта он заканчивается слиянием дискретных очагов

взаимодействия, а в объеме – релаксацией напряжений (в той степени, которая необходима для сохранения образовавшихся связей). При сварке однородных металлов критерием окончания третьей стадии может служить рекристаллизация, приводящая к образованию общих зерен в зоне контакта.

В соответствии с концепцией трехстадийности процесса образования соединения между металлами в твердой фазе следует, что независимо от характера и интенсивности деформационного или термомодеформационного воздействия (т.е. от способа сварки) природа образования соединения едина [28–30]. Различия заключаются в кинетике протекания отдельных стадий процесса, которая определяется температурой, характером и интенсивностью деформации материалов (силового воздействия), степенью локализации деформации и особенностями развития релаксационных процессов в зоне соединения.

В работах [30–32] показано, что наименьшая температура, при которой происходит соединение двух металлов при газопрессовой сварке, т.е. образуются общие зерна в месте стыка, равна 910°C . На рис. 10 показана макроструктура стыка (поз. 1) и микроструктура стыка (поз. 2). Однако цепочка оксидных включений в стыке сохраняется (рис. 10, нижнее изображение, показано стрелками). При температуре нагрева выше $1050\text{--}1200^{\circ}\text{C}$ металлографический стык уже не выделяется, появляются общие зерна, оксидные включения отсутствуют. Сварка с образованием общих зерен в стыке рельса при отсутствии неметаллических включений обеспечивает удовлетворительные механические свойства [30–32].

По мнению авторов работ [31, 32], высокая пластичность и ударная вязкость стыка фиксируется в образцах, сваренных при температуре $1050\text{--}1100^{\circ}\text{C}$, когда структура шва однородна и не имеет неметаллические включения. С увеличением содержания углерода температурный интервал сварки в твердой фазе уменьшается согласно диаграмме, приведенной в работе



[32]. Повышение ее нижнего предела связано с упрочняющим действием углерода на аустенит. Верхний предел ограничен линией температуры солидуса (на диаграмме – железо-углерод). Оксидные пленки на торцевой поверхности деталей оказывают решающее влияние на процесс образования соединения и его качество при газопрессовой сварке рельса. Они затрудняют межзатомное взаимодействие и препятствуют формированию устойчивых металлических связей. Оксидные пленки должны быть раздроблены и удалены из

зоны соединения в процессе пластической деформации при осадке. Большой объем работ в этом направлении выполнен японскими исследователями [30–32], которые смогли подобрать оптимальные температуры нагрева и последующего осаждения концов рельса при газопрессовой сварке. Все это позволило успешно внедрить данный процесс на предприятиях железнодорожной отрасли Японии⁹ и полностью отказаться от алюминотермитной сварки рельсов (рис. 11).

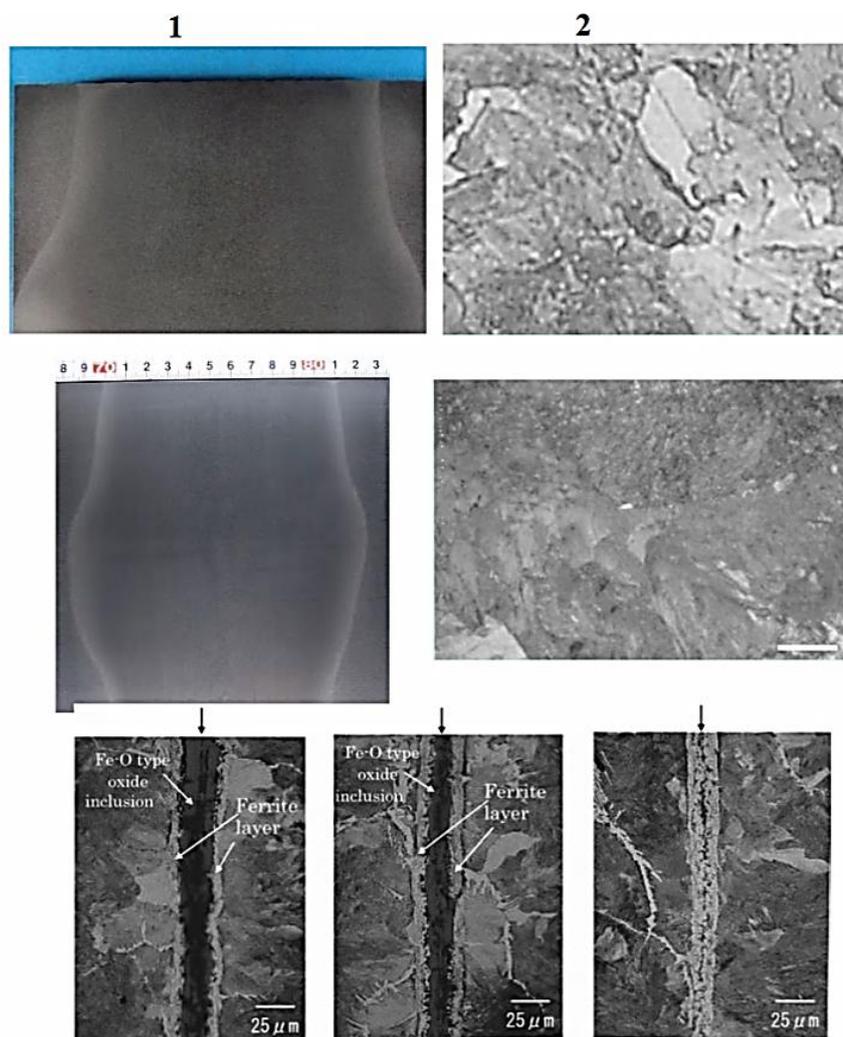


Рис. 10. Макро- и микроструктура сварного стыка после газопрессовой сварки и неметаллические включения в зоне сварного шва
Fig. 10. Macro- and microstructure of the welded joint after gas-pressure welding and non-metallic inclusions in the welded zone

⁹Yamamoto R. Gas pressure welding of rail in Japan // Proc. 6th International Heavy Haul Conf, Cape Town, South Africa, 1997. P. 370–380.

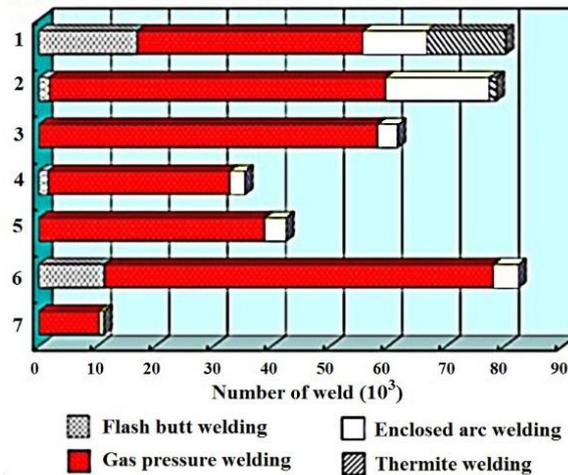


Рис. 11. Динамика использования способов сварки на дорогах Японии и количество сваренных стыков

1 – Tokaido; 2 – Sanyo; 3 – Tohoku; 4 – Joetsu; 5 – Kyushu; 6 – Hokuriku; 7 – Hokkaido
Fig. 11. Application dynamics of welding methods on Japanese roads and the number of welded joints:

1 – Tokaido; 2 – Sanyo; 3 – Tohoku; 4 – Joetsu; 5 – Kyushu; 6 – Hokuriku; 7 – Hokkaido

Контактно-стыковая сварка рельсов

Контактно-стыковая сварка рельсов оплавлением происходит в два этапа – нагрев торцов деталей и осадка [33–35]. При сварке оплавлением нагрев контактной области металла происходит в результате расплавления и разрушения локальных перемычек, образующихся при определенной скорости смыкания контактных поверхностей рельсов, вплоть до образования на торцах слоя расплавленного металла. Второй этап сопровождается значительной деформацией нагретых поверхностей в результате резкого увеличения усилия сжатия $F_{ос}$ соединяемых поверхностей, т.е. осадкой. В работах¹⁰ [36–38] проанализированы законы регулирования при разных методах оплавления контактной сварки. Проведен ряд экспериментов по определению зависимости между параметрами сварки и распределением температурных полей в ЗТВ сварного стыка. Анализ температурных изменений при пульсирующем методе оплавления (ПО) в ЗТВ предполагает появление

закалочных структур из-за резкого падения температуры [36–39]. Среднее значение скорости охлаждения при сварке ПО составляет 3,9 °C/c. Анализ температурных полей при сварке непрерывным оплавлением (НО) указывает на медленное изменение температуры охлаждения в цикле сварки по сравнению с методом ПО. Среднее значение скорости охлаждения в ЗТВ при сварке НО составляет 1,7–2,3 °C/c. Анализ металлографического исследования и результаты замера температурных циклов при сварке контактным способом методами непрерывного (рис. 12, поз. 1) и пульсирующего оплавления (рис. 12, поз. 2) рельсов из хромистых сталей повышенной прочности позволил определить критическую скорость охлаждения в цикле сварки [33–35, 39]. При скорости охлаждения выше 3,5 °C/c в определенных участках зоны термического влияния образуется смешанная структура, состоящая из пластинчатых сорбитных и мартенситной структур (см. рис.

¹⁰Николин А.И. Совершенствование процессов сварки и термической обработки рельсов магистральных железных дорог: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.01; 05.03.06. Москва, 2004. 200 с. / Nikolin A.I. Improvement of welding and thermal treatment of main railroad rails: Candidate's dissertation in technical sciences: 05.15.01; 05.03.06. Moscow, 2004. 200 p.



12). По линии соединения и примыкающим слоям металла наблюдается крупнозернистая структура первичных аустенитных зерен, балл зерна – 2–3. По границам зерен первичного аустенита четко видна сплошная сетка ферритных выделений, что свидетельствует о низких пластических свойствах этого участка.

По мнению авторов работ [33–39], комбинация двух методов оплавления в циклах процесса нагрева дает возможность управлять размерами характерных областей ЗТВ и термическими циклами в этих областях. Каждый цикл состоит из двух участков нагрева, НО и ПО. Применяя в цикле нагрева непрерывное оплавление, ведется регулирование скоростей охлаждения в ЗТВ, при этом осуществляется

управление более пологой динамикой изменения температуры в этих областях и создаются условия равномерного разогрева торцов рельса [39]. Для достижения необходимой температуры и управления интенсивностью изменения температуры в цикле нагрева применяется метод ПО. Управление термическим циклом сварки при комбинированном методе оплавления позволяет исключить образование мартенситных структур в ЗТВ сварного стыка рельсов из хромистых сталей повышенной прочности¹⁰. При сравнении структур макрошлифов, приведенных на рис. 12, 13, видно, что общая ширина ЭТВ при сварке методом ПО вдвое меньше, чем при сварке с использованием традиционной технологии НО.

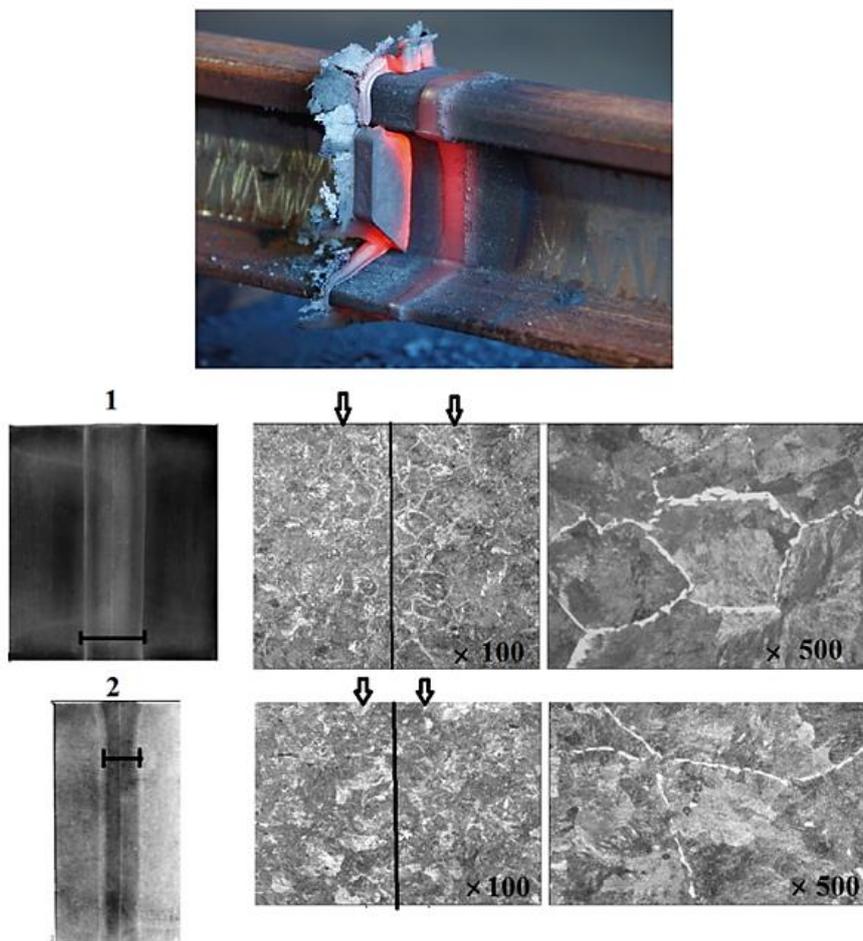


Рис. 12. Макро- и микроструктура рельсового стыка после контактно-стыковой сварки непрерывным (1) и пульсирующим оплавлением (2)
Fig. 12. Macro- and microstructure of the rail joint after contact flash welding by continuous flashing (1) and pulsating flashing (2)

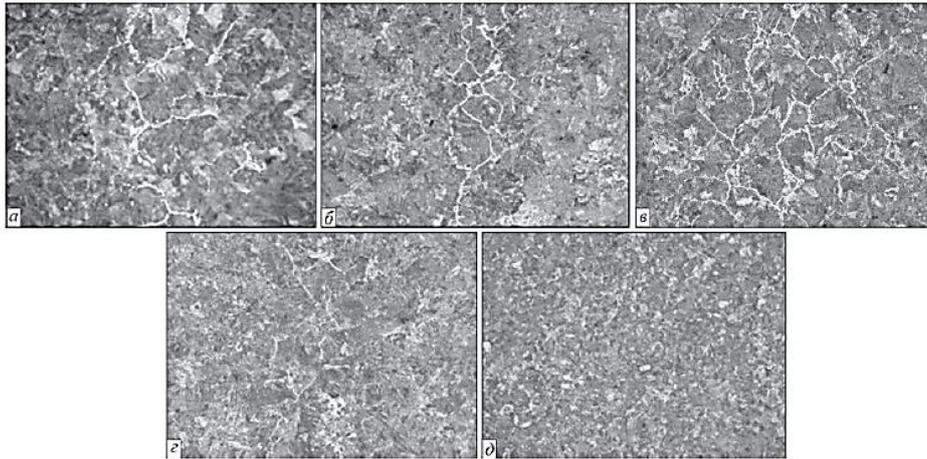


Рис. 13. Микроструктура ($\times 100$) металла ЗТВ сварных соединений:
а – K76Ф (но); б – K76Ф (по); в– 76Ф (по); г – вc-350я (по); д – R350HT (по)
Fig. 13. Microstructure ($\times 100$) of metal of welded joint heat-affected zone:
a – K76F (no); б – K76Ф (no); в – 76Ф (no); г – вc-350я (no); д – R350HT (no)

Показатели механических испытаний на статический изгиб превышают нормативные показатели, установленные нормативной документацией, как по разрушающей нагрузке, так и по прогибу. Из практики контактной сварки известно, что снижение энергозатрат при сварке позволяет улучшить структуру металла по линии соединения и примыкающим участкам, в частности, уменьшить размеры зерен и выделение феррита по их границам. [33–39]. В практической работе рельсостроительных предприятий встречаются дефекты в виде матовых пятен на изломе рельса. По мнению авторов работы [39], причиной снижения пластических свойств в большинстве случаев является формирование в плоскости соединения дефектов, определяемых как «матовые пятна», площадью от 10 до 50 мм². Ими также установлено, что формирование указанных дефектов во многом определяется процессами оплавления, протекающими в финальной его стадии, предусмотренной программой (интенсивным оплавлением, переходящим в осадку). В этот период на торцах оплавленных деталей формируется расплав, в котором всегда имеются продукты его окисления воздухом, содержащиеся из искрового зазора. Если расплав успевает закристаллизоваться до включения этапа сварочного цикла осадки, то полностью его удалить за

счет деформации не удастся. Важно отметить, что при контактно-стыковой сварке оплавлением, когда оксиды находятся преимущественно в слое жидкого металла, их твердость не оказывает влияния на их удаление. Удаление оксидов происходит за счет процессов выброса частиц расплавленного металла из стыка, вытеснения жидкого и твердого металлов в грат при осадке.

Проведенный анализ существующих технологий контактной стыковой сварки и термической обработки сварных стыков выявил их существенные недостатки, связанные с формированием структур в сварных стыках рельсов изготовленных из низколегированных сталей, образованием ожогов в местах контакта с электродами сварочных машин и появлением двух новых зон термического влияния при локальной термической обработке сварных стыков [33–39]. Это приводит к тому, что со сварными стыками связано до трети всех изломов рельсов в пути и до 12,9% всех изъятых остродефектных рельсов (по данным работ [33–39]). Всё это требует оптимизации технических параметров, связанных со сваркой и термической обработкой сварных стыков [40, 41]. Применение комбинированного метода оплавления при контактной сварке рельсов позволяет управлять температурными полями в зоне термического



влияния во время технологического процесса нагрева, что делает возможным регулирование процессом охлаждения в этих зонах сварки. Это позволяет исключить образования мартенситных структур в ЗТВ при контактной сварке рельсов из хромистых сталей повышенной прочности [40, 41]. По мнению авторов работ [40, 41], введение системы подстуживания подошвы рельса при локальной термической обработке сварных стыков рельсов обеспечивает получение в подошве сжимающих напряжений, улучшает геометрию сварных

стыков, что подтверждается результатами замера твердости, металлографическими исследованиями, результатами усталостных испытаний. Проведенное сравнение локальной термической обработки и термической обработки по всей длине сварных рельсов показало, что зона с пониженной твердостью и измененной микроструктурой в зоне сварного стыка значительно уменьшается – от 130 до 6 мм, а снижение твердости уменьшается от 405 до 387 НУ [40, 41].

Линейная сварка трением рельсов

В работах^{11–16}[42] представлено описание машины для линейной сварки трением (LFW) и процесс сварки трением рельсов. Продемонстрирован новый процесс сварки, который улучшил качество сварки по сравнению с традиционными способами соединения рельсов. На первом этапе работ (2012–2016 гг.) авторы определили, что рельс может быть сварен с использованием линейной сварки трением.

После механических испытаний было установлено, что рельсовые стыки имеют хорошие механические свойства по сравнению с основным металлом свариваемых рельсов. Необходимо отметить, что первые экспериментальные результаты, опубликованные в технических отчетах^{11–16}, неизвестны широкому кругу исследователей и поэтому пока не могут быть критически проанализированы научным сообществом.

Результаты анализа технологических способов сварки рельсов с учетом получаемых структур

Подведем итоги анализа технологических способов сварки рельсов с учетом получаемых структур. В настоящий момент разработчики рельсовых сталей на основе многочисленных комплексных исследования сформулировали основные закономерности влияния микроструктуры на эксплуатационные свойства рельсов [43–47]. Так,

например, Шур Е.А. сформулировал принцип однотипной структуры, заключающийся в том, что «...эксплуатационная стойкость рельсов непрерывно повышается с ростом твердости только у группы рельсов с однотипной структурой», при этом наибольшей конструктивной прочностью рельсов, по мнению автора, обладают рельсы либо при

¹¹Gould J., Johnson W. Translational friction weld rail repair – Phase I final report. EWI Project No. 52765GTH, FRA Contract No. DTFR53-11-C-00004.

¹²Shira S. The use of translational friction welding for constructing and repairing rail for high speed and intercity passenger rail – Phase II design report. EWI Project 54368GTH Task 1–3, FRA Contract No. DTFR53-13-C-00041.

¹³Shira S. FRA LFW machine design phase 2 – Loading requirements document. EWI Project 54368GTH Task 1, FRA Contract No. DTFR53-13-C-00041.

¹⁴Shira S. Use of Translational Friction Welding for Constructing and Repairing Rail for High Speed and Intercity Passenger Service Rail. U.S. Department of Transportation, 2016, 40 p.

¹⁵Innovative Welding Processes for New Rail Infrastructures. Available at: <http://www.wrist-project.eu/> (accessed 9 September 2016).

¹⁶Brouzoulis J., Josefson L. Innovative Welding Processes for New Rail Infrastructures, Technical report, Chalmers University of Technology, Gothenburg. 2015.



однородной структуре сорбита закалки максимальной дисперсности с твердостью 331–388 НВ, либо при однородной структуре отпущенного мартенсита или бейнита [43]. Как утверждают авторы работ [44–47], эксплуатационная стойкость рельсов напрямую связана с их твердостью, поэтому развитие рельсового производства должно идти по пути повышения содержания углерода и обеспечения твердости на поверхности катания рельсов на уровне порядка 400 НВ. Такие параметры микроструктуры рельсов, как величина межпластиночного расстояния в перлите, величина перлитных колоний, наличие избыточного феррита, также оказывают большое влияние на свойства рельсов [43]. Известно, что перлитная структура образуется при диффузионном превращении аустенита в широком интервале температур – от ~720 до ~450°C, и имеет вследствие этого различную дисперсность, оцениваемую величиной межпластиночного расстояния, которое может изменяться больше чем на порядок: от ~1,0 до 0,05 мкм. Соответственно изменяется твердость стали и другие характе-

ристики механических свойств. На рис. 14, 15 представлены обобщенные данные по макроструктуре рельсового стыка и твердости, полученные разными способами.

Установлено, что алюминотермитный стык имеет самую большую зону литого металла и зону термического влияния, газопрессовый способ – самую большую зону термических изменений в рельсовой стали. Контактно-стыковая сварка с оплавлением и дуговая сварка имеют минимальные зоны литого металла и ЗТВ по сравнению с вышеуказанными способами. Интересная макроструктура наблюдается при линейной сварке трением: зона литого металла минимальная, а зона термического влияния состоит из нескольких зон. На рис. 15 представлены сравнительные результаты по распределению твердости в сварном стыке при сварке разными способами без термообработки стыка и с обработкой. Видно, что алюминотермитная и газопрессовая сварка имеют провал твердости на большей площади стыка рельса по сравнению с другими способами.

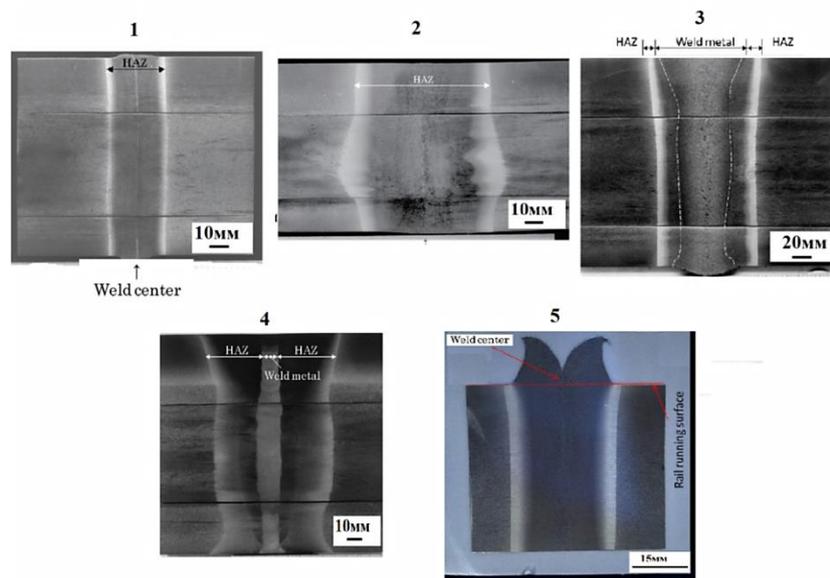


Рис. 14. Макроструктуры, зоны сварки и ЗТВ в зоне сварного стыка рельса, сваренного разными способами: 1 – контактно-стыковая сварка оплавлением; 2 – газопрессовая сварка; 3 – алюминотермитная сварка; 4 – сварка закрытой дугой (Enclosed arc welding); 5 – линейная сварка трением

Fig. 14. Macrostructures, welding zones and heat affected zones in the rail welded joint area welded by different methods: 1 – contact flash welding; 2 – gas-pressure welding; 3 – aluminothermic welding; 4 – enclosed arc welding; 5 – linear friction welding

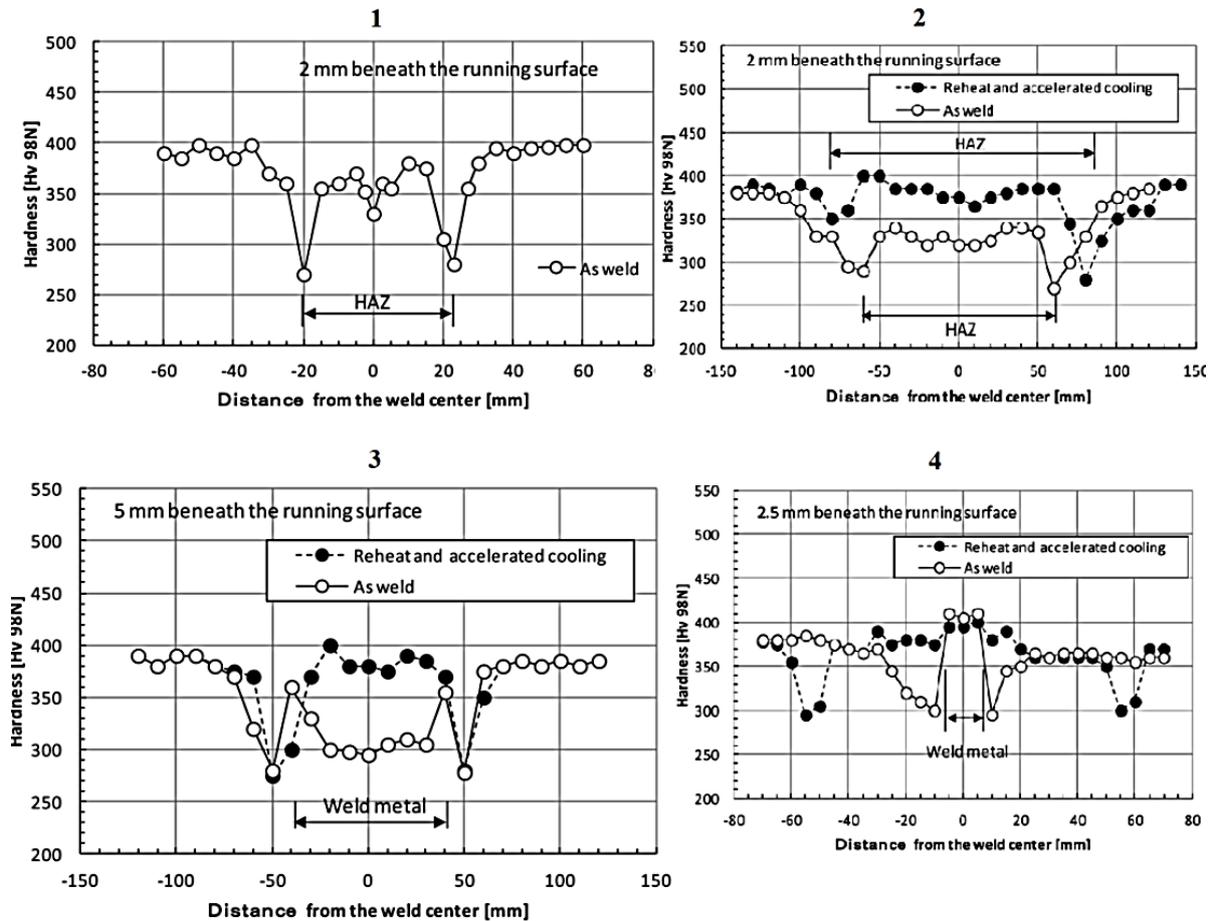


Рис. 15. Распределение твердости в зоне сварного стыка рельса, сваренного различными способами:
1 – контактно стыковая сварка оплавлением; 2 – газопрессовая сварка;
3 – алюмотермитная сварка; 4 – сварка закрытой дугой (Enclosed arc welding)
Fig. 15. Hardness distribution in the welded joint area of the rail welded by different methods:
1 – contact flash welding; 2 – gas-pressure welding;
3 – aluminothermic welding; 4 – enclosed arc welding

Резюмируя все вышесказанное, можно заключить, что принцип эксплуатационной стойкости рельсов, связанный с однородностью структуры по всему сечению рельса, сформулированный Е.А. Шуром, при сварке рельсов контактно-стыковым методом с оплавлением, газопрессовым способом, алюмотермитным способом и закрытой сварочной дугой не выполняется. Однако дополнительная термообработка рельсовых стыков минимизирует последствия высокотемпературного нагрева рельсовых сталей в процессе сварки [40, 41]. Вместе с тем необходимо отметить, что перлитная структура рельсовой стали характеризуется не только величиной межпластиночного расстояния (за данный показатель соперничают метал-

лурги всего мира при производстве рельсов, поскольку это напрямую связано с прочностью), но и с размером колоний, т.е. групп пластин цементита и ферритных промежутков одинаковой пространственной и кристаллографической ориентированности. В объеме исходного аустенитного зерна зарождается и вырастает несколько таких колоний, причем их величина определяется как размером аустенитного зерна, так и температурой превращения аустенита в перлит. Известно [43–47], что размеры перлитных колоний исходного аустенитного зерна существенно влияют на механические свойства перлитной стали, в том числе на вязкость. В тоже время вязкость определяется в основном размером исходного аустенитного зерна, а не размером



колоний перлита, хотя не исключается, что процесс разрушения контролируется структурной составляющей, включающей несколько колоний, имеющих единую кристаллографическую ориентировку ферритной основы. Пластичность перлитной рельсовой стали определяется в основном размером аустенитного зерна [43–47]. Размер исходного аустенитного зерна зависит от температуры аустенитизации, а во всех способах сварки рельса не только скорость охлаждения оказывает большое значение на механизм перлитного превращения, но и скорость нагрева.

Алюминотермитная сварка с позиции простоты осуществления (неуправляемая металлургическая заливка расплавленного металла в рельсовый стык), высокой мобильности, низкой квалификации исполнителей, минимальных трудозатрат подходит только как способ получения функционального материала в рельсовом

стыке, т.е. основное назначение – устранение отказа (причем временное), восстановление рельсовой цепи. Этот способ должен оцениваться как вспомогательный, поскольку с позиции структурного фактора алюминотермитную сварку рельсов *нельзя рекомендовать* при строительстве и реконструкции скоростных бесстыковых путей. Алюминотермитная сварка *как способ получения конструкционного материала* из-за низких значений ударной вязкости и трещиностойкости при отрицательных температурах, высокого уровня дефектообразования в рельсовом стыке не обеспечивает высокое качество рельсового стыка и снижает безопасность движения.

Другие способы сварки рельса по физико-механическим свойствам металла в сварном шве обеспечивают высокое качество рельсового стыка и являются более перспективными.

Заключение

Проведенный авторами настоящей статьи аналитический обзор существующих способов сварки показал, что вопросы структурообразования в рельсовом стыке при сварке разными способами не нашли должного отражения в научной литературе. Здесь нужно установить, что такое функциональный и конструкционный материалы в рельсовом стыке, получаемые в результате сварки, какими свойствами они должны обладать, для достижения каких целей их использовать. Также необходимо определиться с позиции экономической целесообразности применения того или другого способа сварки. Для этих целей провести дополнительные исследования процессов структурообразования в сварочном шве и зоне термического влияния в условиях отрицательных температур и высоких удельных нагрузок на рельсовый стык.

В то же время надо обратить внимание не только на научную, но и на административно-экономическую сторону вопроса.

Специалисты металлургических производств во всем мире затрачивают колоссальные материальные и трудовые ресурсы на разработку и изготовление высокопрочных и износостойких рельсов. Однако железнодорожники в угоду получения максимальной прибыли от перевозок, т.е. просто для обогащения, сводят на нет все положительные свойства рельсовой стали, сознательно и добровольно применяя способы сварки рельсов, существенно ухудшающие эксплуатационные свойства последних и снижающие безопасность движения по железнодорожным путям. Железнодорожникам надо определиться, что для них важнее – безопасность при перевозке грузов и пассажиров или получение прибыли. Надо окончательно расставить приоритеты, так как попытка совмещения двух противоположных целей приносит не только колоссальные убытки по исправлению дефектных стыков, но и снижает безопасность движения.



Библиографический список

1. Штайгер М.Г., Балановский А.Е. Анализ технологический для сварки высокопрочных рельсов с позиции структурообразования при строительстве и реконструкции скоростных железнодорожных магистралей (обзор). Часть 1 // Вестник ИргТУ. 2018. Т. 22. № 6. С. 48–74. DOI: <https://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-6-48-74>
2. Малкин Б.В., Воробьев А.А. Термитная сварка рельсов. М.: Министерство коммунального хозяйства РСФСР, 1963. 102 с.
3. Каргин В. А., Тихомирова Л.Б., Галай М.С., Кузнецова Е.С. Повышение эксплуатационных параметров соединений, полученных алюминотермитной сваркой // Сварочное производство. 2014. № 2. С. 29–32.
4. Воронин Н.И., Трынкова О.Н., Фомичева О.В. Алюминотермитная сварка рельсов зимой // Мир транспорта. 2012. № 4. С. 56–59.
5. Гудков А.В., Лыков А.М., Кярамян К.А. Расчет процесса алюминотермитной сварки рельсов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2013. № 2. С. 50–54.
6. Yuan-qing Wang, Hui Zhou, Yong-jiu Shi¹, Bao-rui Feng. Mechanical properties and fracture toughness of rail steels and thermite welds at low temperature // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2012. Vol. 19. No. 5. P. 409. DOI: 10.1007/s12613-012-0572-8
7. Myers J., Geiger G.H., Poirier D.R., Structure and properties of thermite welds in rails // Welding Journal. 1982. Vol. 258. P. 8–19.
8. Штайгер М.Г., Лисицын А.И., Палкин С.В., Елкин К.С., Балановский А.Е., Кондратьев В.В., Карлина А.И. Улучшение эксплуатационных свойств рельсов путем снижения совокупности неметаллических включений в рельсовой стали, возникающих вследствие примесей легирующим ферросилиций // Цветные металлы и минералы-2017: сб. докл. IX Международного конгресса (Красноярск, 11–15 сентября 2017 г.). Красноярск: Изд-во ООО «Научно-инновационный центр», 2017. С. 824–831.
9. Штайгер М.Г., Иванчик Н.Н., Лисицын А.И., Карлина А.И. Использование методов сканирующей электронной микроскопии для металлографии рельсовой стали // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 4 (56). С. 189–196.
10. Касаткин О.Г. Особенности водородного охрупчивания высокопрочных сталей при сварке // Автоматическая сварка. 1994. № 1. С. 3–7.
11. Походня И.К., Швачко И.В. Физическая природа обусловленных водородом холодных трещин в сварных соединениях конструкционных сталей // Автоматическая сварка. 1997. № 5. С. 3–12.
12. Гайворонский А.А. Влияние диффузионного водорода на сопротивляемость замедленному разрушению сварных соединений высокоуглеродистой стали // Автоматическая сварка. 2013. № 5. С. 15–21.
13. Позняков В.Д., Кирьяков В.М., Гайворонский А.А., Клапатюк А.В., Шишикевич О.С. Свойства сварных соединений рельсовой стали при электродуговой сварке // Автоматическая сварка. 2010. № 8 (688). С. 19–24.
14. Dahl B., Mogard B., Grefott B., Ulander B. Repair of rails on-site by welding // Svetsaren. 1995. Vol. 50. No. 2. P. 10–14.
15. Bajic D., Kuzmenko G.V., Samardžić I. Welding of rails with new technology of arc welding // Metalurgija. 2013. No. 3. P. 399–402.
16. Altemühl B. Welding tramway rails in Bucharest // Svetsaren. 2002. Vol. 52. No. 2. P. 32–35.
17. Takimoto T. Latest welding technology for long rail and its reliability // Tetsu-to-Hagane. 1984. Vol. 70. No. 10. P. 40–45.
18. Okumura M., Karimine K., Uchino K., Yurioka N. Development of field fusion welding technology for railroadrails // Nippon Steel Techn. Rept. 1995. Vol. 65. No. 4. P. 41–49.
19. Tachikawa H., Uneta T., Nishimoto H. Steel welding technologies for civil construction applications // Nippon Steel Techn. Rept. 2000. Vol. 82. No. 7. P. 35–41.
20. Кузьменко Г.В., Кузьменко В.Г., Галинич В.И., Тагановский В.М. Новая технология электродуговой сварки ванным способом рельсов в условиях трамвайных и подкрановых путей // Автоматическая сварка. 2012. № 5 (709). С. 40–44.
21. Sun J., Davis D., Steel R. T.TCI searching for improved in track welding methods // Railway Track & Structures. 2001. №1. P. 13–15
21. Sun J., Davis D., Steel R. T.TCI searching for improved in track welding methods // Railway Track & Structures. 2001. No. 1. P. 13–15.
22. Волошкевич Г.З. Метод принудительного формирования и его применение // Автоматическая сварка. 1951. № 1. С. 3–19.
23. Волошкевич Г.З. Автоматическая сварка кожуха доменной печи // Автоматическая сварка. 1951. № 1. С. 37–51.
24. Светлополянский Ю.И. Полуавтоматическая электрошлаковая сварка рельсов // Автоматическая сварка. 1966. № 3. С. 53–54.
25. Коперман Л.Н., Муканаев К.К. Электрошлаковая сварка крановых рельсов // Сварочное производство. 1967. № 5. С. 32–36.
26. Gutscher D. Development and evaluation of electrosag welding for railroad applications // Railway Track and Structures. 2009. No. 11. P. 53–58.
27. Сварка рельсов на железных дорогах США // Железные дороги мира. 2010. № 3. С. 66–70.
28. Каракозов Э.С. Сварка металлов давлением. М.: Машиностроение, 1986. 276 с.
29. Гельман А.С. Основы сварки давлением. М.: Машиностроение, 1970. 312 с.
30. Yamamoto R., Komizu Y., Fukada Y. Experimental examination for understanding of transition behaviour of oxide inclusions on gas pressure weld interface: joining



phenomena of gas pressure welding // *Welding International*. 2014. Vol. 28. Issue 7. P. 510–520.

31. Yamamoto R., Komizu Y., Fukada Y. Experimental examination for understanding of transition behaviour of oxide inclusions on gas pressure weld interface: joining phenomena of gas pressure welding // *Welding International*. 2014. No. 7. P. 510–520. DOI: 10.1080/09507116.2012.753237

32. Yamamoto R. Advances in Gas Pressure Welding Technology for Rails. *Railway // Technology Avalanche*. 2007. No. 17. P. 99–105.

33. Кучук-Яценко С.И. Сварка рельсов непрерывным оплавлением // *Автоматическая сварка*. 1964. № 4. С. 55–62.

34. Кучук-Яценко С.И., Дидковский А.В., Кривенко В.Г., Гудков А.В. Контактная стыковая сварка рельсов. Опыт применения и перспективы совершенствования // *Путь и путевое хозяйство*. 2004. № 9. С. 5–8.

35. Кучук-Яценко С.И., Швец Ю.В., Думчев Е.В., Швец В.И., Микитин Я.И., Тараненко С.Д., Никитина Н.Н. Контактная стыковая сварка железнодорожных крестовин с рельсовыми окончаниями через промежуточную вставку // *Автоматическая сварка*. 2005. № 1. С. 6–9.

36. Резанов В.А. Методика исследования изменения температуры на различном расстоянии от стыков при сварке рельсов // *Вестник ВНИИЖТ*. 2011. № 4. С. 40–43.

37. Шур Е.А. Резанов В.А. Комплексный метод контактной сварки рельсов // *Вестник ВНИИЖТ*. 2012. № 3. С. 20–22.

38. Шур Е.А., Резанов В.А. Совершенствование контактной сварки рельсов // *Железнодорожный транспорт*. 2013. № 4. С. 58–60.

39. Кучук-Яценко С.И., Дидковский А.В., Швец В.И., Руденко П.М., Антипин Е.В. Контактная стыковая сварка высокопрочных рельсов современного производства // *Автоматическая сварка*. 2016.

№ 5-6 (753). С. 7–16.

40. Резанов В.А., Федин В.М., Башлыков А.В., Фимкин А.И., Земан С.К. Дифференцированная закалка сварных стыков рельсов // *Вестник ВНИИЖТ*. 2013. № 2. С. 28–34.

41. Андреева Л.А., Федин В.М., Башлыков А.В., Фимкин А.И., Резанов В.А. Термическое упрочнение сварных стыков рельсов на промышленном транспорте // *Промышленный транспорт XXI век*. 2013. № 1. С. 19–20.

42. Ofem U., Addison A., Russell M. Energy and force analysis of linear friction welds in medium carbon steel // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2010. Vol. 15. No. 6. P. 479–482.

43. Шур Е.А. Влияние структуры на эксплуатационную стойкость рельсов // *Влияние свойств металлической матрицы на эксплуатационную стойкость рельсов: материалы II Всерос. Науч.-техн. семинара (Екатеринбург, 16–17 мая, 2006 г.)*. Екатеринбург: Изд-во УИМ, 2006. С. 37–64.

44. Борц А.И., Заграничек К.Л., Долгих Л.В. Результаты сравнительных испытаний рельсов отечественных и зарубежных производителей на контактно-усталостную выносливость // *Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сб. докл. по материалам 129-го заседания межотраслевой Рельсовой комиссии*. Екатеринбург: Изд-во ОАО «УИМ». 2013. С. 113–128.

45. Павлов В.В., Темлянец М.В., Корнева Л.В. [и др.]. Дефекты и качество рельсовой стали. М.: Теплотехник, 2006. 218 с.

46. Уэда М., Ивано К., Ямамото Т. Характеристики термоупрочненных рельсов и новейшие разработки *Nippon Steel* // *Инженерные решения*. 2012. № 1. С. 5–7.

47. Павлов В.В., Темлянец М.В., Корнева Л.В., Сюсюкин А.Ю. Перспективные технологии тепловой и термической обработки в производстве рельсов. М.: Теплотехник, 2007. 280 с.

References

1. Shtaiher M.G., Balanovskii A.E. Analysis of welding technologies of high-strength rails in terms of structure formation under construction and reconstruction of high speed railroads (Review). Part 1. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2018, vol. 22, no. 6, pp. 48–74. DOI: <https://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-6-48-74>. (In Russian).

2. Malkin B.V., Vorob'ev A.A. *Termitnaya svarka rel'sov* [Thermit welding of rails]. Moscow: Ministry of Communal Services of the Russian Federation Publ., 1963, 102 p. (In Russian).

3. Kargin V. A., Tikhomirova L.B., Galai M.S., Kuznetsova E.S. Performance parameters enhancement of joints obtained by aluminothermic welding. [Welding industry]. 2014, no. 2, pp. 29–32. (In Russian).

4. Voronin N.I., Trynkova O.N., Fomicheva O.V. Aluminothermic welding of rails in winter. *Mir transporta*

[World of transport and transportation]. 2012, no. 4, pp. 56–59. (In Russian).

5. Gudkov A.V., Lykov A.M., Kyaramyan K.A. Calculation of aluminothermic rail welding process. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Vestnik of the Railway Research Institute]. 2013, no. 2, pp. 50–54. (In Russian).

6. Yuan-qing Wang, Hui Zhou, Yong-jiu Shi¹, Bao-rui Feng. Mechanical properties and fracture toughness of rail steels and thermite welds at low temperature // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2012. Vol. 19. No. 5. P. 409. DOI: 10.1007/s12613-012-0572-8

7. Myers J., Geiger G.H., Poirier D.R., Structure and properties of thermite welds in rails. *Welding Journal*. 1982, vol. 258, pp. 8–19.

8. Shtaiher M.G., Lisitsyn A.I., Palkin S.V., Elkin K.S., Balanovskii A.E., Kondrat'ev V.V., Karlina A.I.



- Uluchshenie ekspluatatsionnykh svoystv rel'sov putem snizheniya sovokupnosti nemetallicheskih vklyuchenii v rel'sovoi stali, vznikayushchikh vsledstvie primesei legiruyushchim ferrosilitsii* [Improving operational properties of rails by reducing the amount of nonmetallic inclusions in rail steel arising from impurities of alloying ferrosilicon]. *Sbornik dokladov IX Mezhdunarodnogo kongressa "Tsvetnye metally i mineraly"* [Collection of reports of IX International Congress "Non-Ferrous Metals and Minerals"]. 2017. Krasnoyarsk: OOO «Scientific and Innovatopn Centre» Publ., 2017, pp. 824–831. (In Russian).
9. Shtaiiger M.G., Ivanchik N.N., Lisitsyn A.I., Karlina A.I. Using methods of the scanning electron microscopy for metallography rail steels. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]. 2017, no. 4 (56), pp. 189–196. (In Russian).
10. Kasatkin O.G. Features of hydrogen embrittlement of high-strength steels at welding. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic welding]. 1994, no. 1, pp. 3–7. (In Russian).
11. Pokhodnya I.K., Shvachko I.V. Physical nature of hydrogen-induced cracks in welded joints of structural steels. *Avtomaticheskaya svarka*. [Automatic welding]. 1997, no. 5, pp. 3–12. (In Russian).
12. Gaivoronskii A.A. Influence of diffusion hydrogen on resistance to slow destruction of high-carbon steel welded joints. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic welding]. 2013, no. 5, pp. 15–21. (In Russian).
13. Poznyakov V.D., Kir'yakov V.M., Gaivoronskii A.A., Klapatyuk A.V., Shishikevich O.S. Properties of rail steel welded joints under electric arc welding. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic welding]. 2010, no. 8 (688), pp. 19–24. (In Russian).
14. Dahl B., Mogard B., Grefot B., Ulander B. Repair of rails on-site by welding. *Svetsaren*. 1995, vol. 50, no. 2, pp. 10–14.
15. Bajic D., Kuzmenko G.V., Samardžić I. Welding of rails with new technology of arc welding. *Metalurgija*. 2013, no. 3, pp. 399–402.
16. Altemühl B. Welding tramway rails in Bucharest. *Svetsaren*. 2002, vol. 52, no. 2, pp. 32–35.
17. Takimoto T. Latest welding technology for long rail and its reliability. *Tetsu-to-Hagane*. 1984, vol. 70, no. 10, pp. 40–45.
18. Okumura M., Karimine K., Uchino K., Yurioka N. Development of field fusion welding technology for railroadrails. *Nippon Steel Techn. Rept.* 1995, vol. 65, no. 4, pp. 41–49.
19. Tachikawa H., Uneta T., Nishimoto H. Steel welding technologies for civil construction applications. *Nippon Steel Techn. Rept.* 2000, vol. 82, no. 7, pp. 35–41.
20. Kuz'menko G.V., Kuz'menko V.G., Galinich V.I., Taganovskii V.M. New technology of rail electric arc welding by the welding bath method in the conditions of tram and crane ways. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic welding]. 2012, no. 5 (709), pp. 40–44. (In Russian).
21. Sun J., Davis D., Steel R. TCI searching for improved in track welding methods. *Railway Track & Structures*. 2001, no. 1, pp. 13–15.
22. Voloshkevich G.Z. Method of forced formation and its application. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic welding]. 1951, no. 1, pp. 3–19. (In Russian).
23. Voloshkevich G.Z. Automatic welding of blast furnace casing. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic welding]. 1951, no. 1, pp. 37–51. (In Russian).
24. Svetlopol'yanskii Yu.I. Semiautomatic electroslag welding of rails. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic welding]. 1966, no. 3, pp. 53–54. (In Russian).
25. Koperman L.N., Mukanaev K.K. Electroslag welding of crane rails. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding]. 1967, no. 5, pp. 32–36. (In Russian).
26. Gutscher D. Development and evaluation of electroslag welding for railroad applications. *Railway Track and Structures*. 2009, no. 11, pp. 53–58.
27. Svarka rel'sov na zheleznykh dorogakh SShA [Welding of rails on US railways]. *Zheleznye dorogi mira* [Railways around the world]. 2010, no. 3, pp. 66–70. (In Russian).
28. Karakozov E.S. *Svarka metallov davleniem* [Pressure welding of metals]. Moscow: Machine-Building Publ., 1986, 276 p. (In Russian).
29. Gel'man A.S. *Osnovy svarki davleniem* [Fundamentals of pressure welding]. Moscow: Machine-Building Publ., 1970, 312 p. (In Russian).
30. Yamamoto R., Komizu Y., Fukada Y. Experimental examination for understanding of transition behaviour of oxide inclusions on gas pressure weld interface: joining phenomena of gas pressure welding. *Welding International*. 2014, vol. 28, issue 7, pp. 510–520.
31. Yamamoto R., Komizu Y., Fukada Y. Experimental examination for understanding of transition behaviour of oxide inclusions on gas pressure weld interface: joining phenomena of gas pressure welding. *Welding International*. 2014, no. 7, pp. 510–520. DOI: 10.1080/09507116.2012.753237
32. Yamamoto R. Advances in Gas Pressure Welding Technology for Rails. *Railway. Technology Avalanche*. 2007. no. 17, pp. 99–105.
33. Kuchuk-Yatsenko S.I. Continuous flash welding of rails. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic welding]. 1964, no. 4, pp. 55–62. (In Russian).
34. Kuchuk-Yatsenko S.I., Didkovskii A.V., Krivenko V.G., Gudkov A.V. Flash welding of rails. Application experience and improvement prospects. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Railway Track and Facilities]. 2004, no. 9, pp. 5–8. (In Russian).
35. Kuchuk-Yatsenko S.I., Shvets Yu.V., Dumchev E.V., Shvets V.I., Mikitin Ya.I., Taranenko S.D., Nikitina N.N. Flash spot welding of railway cross pieces with rail ends through the intermediate insert. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic welding]. 2005, no. 1, pp. 6–9. (In Russian).
36. Rezanov V.A. Methods of studying temperature changes at various distances from joints while rail welding. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute]. 2011, no. 4, pp. 40–43. (In Russian).
37. Shur E.A. Rezanov V.A. Integrated method of con-



tact rail welding. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute]. 2012, no. 3, pp. 20–22. (In Russian).

38. Shur E.A., Rezanov V.A. Improvement of spot welding of rails. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway Transport]. 2013, no. 4, pp. 58–60. (In Russian).

39. Kuchuk-Yatsenko S.I., Didkovskii A.V., Shvets V.I., Rudenko P.M., Antipin E.V. Spot flash welding of high-strength rails of modern production. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic welding]. 2016, no. 5-6 (753), pp. 7–16. (In Russian).

40. Rezanov V.A., Fedin V.M., Bashlykov A.B., Fimkin A.I., Zeman S.K. Differentiated heat treatment of welded rail joints. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute]. 2013, no. 2, pp. 28–34. (In Russian).

41. Andreeva L.A., Fedin V.M., Bashlykov A.V., Fimkin A.I., Rezanov V.A. Thermal strengthening of welded joints of rails on industrial transport. *Promyshlennyy transport XXI vek* [Industrial transport of the XXI century]. 2013, no. 1, pp. 19–20. (In Russian).

42. Ofem U., Addison A., Russell M. Energy and force analysis of linear friction welds in medium carbon steel // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2010, vol. 15, no. 6, pp. 479–482.

43. Shur E.A. *Vliyaniye struktury na ekspluatatsionnyuyu stoikost' rel'sov* [Influence of structure on rail operational stability]. *Materialy II Vserossiiskogo nauchno-tekhnicheskogo seminar "Vliyaniye svoystv metallicheskoi matritsy na ekspluatatsionnyuyu stoikost' rel'sov"* [Proceedings of II All-Russian scientific and

technical seminar "Influence of metal matrix properties on operational stability of rails"]. Ekaterinburg: Ural Institute of Metals Publ., 2006, pp. 37–64. (In Russian).

44. Borts A.I., Zagranichek K.L., Dolgikh L.V. *Rezultaty sravnitel'nykh ispytaniy rel'sov otechestvennykh i zarubezhnykh proizvoditelei na kontaktno-ustalostnuyu vyнослиvost'* [Comparative test results of rails produced by domestic and foreign manufacturers for contact fatigue endurance]. *Sbornik dokladov po materialam 129-go zasedaniya mezhotraslevoi Rel'sovoi komissii "Uluchsheniye kachestva i usloviiy ekspluatatsii rel'sov i rel'sovykh skreplenii"* [Collection of articles on the materials of 129th meeting of the interbranch Rail Commission "Improving the quality and operating conditions of rails and rail fastenings"]. Ekaterinburg: Ural Institute of Metals Publ., 2013, pp. 113–128. (In Russian).

45. Pavlov V.V., Temlyantsev M.V., Korneva L.V. [et al]. *Defekty i kachestvo rel'sovoi stali* [Defects and quality of rail steel]. Moscow: Teplotekhnika Publ., 2006, 218 p. (In Russian).

46. Ueda M., Ivano K., Yamamoto T. Characteristics of heat-strengthened rails and the newest developments of Nippon Steel. *Inzhenernyye resheniya* [Engineering solutions]. 2012, no. 1, pp. 5–7. (In Russian).

47. Pavlov V.V., Temlyantsev M.V., Korneva L.V., Syusyukin A.Yu. *Perspektivnyye tekhnologii teplovoi i termicheskoi obrabotki v proizvodstve rel'sov* [Promising technologies of thermic and heat treatment in the production of rails]. Moscow: Teplotekhnika Publ., 2007, 280 p. (In Russian).

Критерии авторства

Штайгер М.Г., Балановский А.Е. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Shtaiger M.G., Balanovsky A.E. have equal authors' rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.