

РАЗРАБОТКА НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ РЕЛЬСОВ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ

Н. А. КОЗЫРЕВ, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения, литейного и сварочного производства, kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru;
Р. А. ШЕВЧЕНКО, аспирант кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства;
Р. Е. КРЮКОВ, канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства;
А. А. УСОЛЬЦЕВ, канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства
(Сибирский государственный индустриальный университет, Россия, г. Новокузнецк)

Аннотация. Приведены результаты исследования влияния режимов сварки с последующей изотермической выдержкой образцов из рельсовой стали, производимой путем пропускания импульсов переменного электрического тока после сварки. Сварка образцов производилась в лабораторных условиях на модернизированной машине для контактной стыковой сварки МС-2008М.

На основании данных лабораторных исследований разработан способ контактной стыковой сварки, защищенный патентом РФ, позволяющий получать сварное соединение изделий из рельсовой стали с равномерным распределением твердости и малой зоной термического влияния, удовлетворяющий разработанным техническим требованиям АО ЕВРАЗ ЗСМК к перспективному сварному стыковому соединению рельсов Р65 категории ДТ350. Предлагаемый способ позволяет производить регулирование структуры сварного соединения рельсов, не прибегая к дополнительной локальной термической обработке.

Ключевые слова: железнодорожные рельсы; рельсовая сталь; контактная стыковая сварка; качество сварного стыка; структура сварного соединения.

Ссылка для цитирования. Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Крюков Р.Е., Усольцев А.А. Разработка новой технологии сварки рельсов для высокоскоростного движения // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 8. С. 50–57.

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-8-50-57

В России основная часть рельсов сваривается электроконтактным способом [1, 2], при этом происходит нагрев и непрерывное охлаждение металла в зоне термического влияния (ЗТВ). Причем в зависимости от химического состава стали выбирается технологический процесс сварки с использованием существующих методов оплавления: непрерывного или пульсирующего, определяющих линейную величину и температурные поля в ЗТВ сварного стыка [3, 4]. Выбор теплового режима основан на исключении образования структур закалки (мартенсита и бейнита), вызывающих дополнительные напряжения и трещины, которые приводят к разрушению рельсов [5]. В связи с этим [6, 7] особое значение приобретает разработка режимов сварки железнодорожных рельсов для высокоскоростных магистралей, изготовленных из хромистых сталей 90ХАФ, 76ХАФ, 76ХФ, 76ХСФ по ГОСТ Р 51685–2013.

Известно, что увеличение содержания хрома в стали вызывает смещение вправо С-образных кривых начала и конца распада аустенита на диаграмме изотермического распада аустенита, что, в свою очередь, приводит к снижению критической скорости охлаждения, при которой аустенит превращается в мартенсит [8, 9]. При бы-

стром нагреве сварного стыка, который 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. Участки мартенсита [5] играют роль концентраторов напряжения и приводят к образованию дефектов в сварных стыках (развитие усталостных трещин в головке, шейке и подошве рельса с хрупким изломом).

Данная проблема в процессе изготовления бесстыкового пути при сварке рельсов решается обязательной термической обработкой сварного стыка. Термообработку производят с помощью индукционных установок, что, в свою очередь, увеличивает затраты. Этот недостаток на практике предлагается исправлять совмещением непрерывного и пульсирующего методов оплавления, изменением интенсивности нагрева при сварке и регулированием скорости охлаждения [6]. При этом частичное использование метода непрерывного оплавления может привести к появлению дефектов сварочного характера, при которых непрерывному оплавлению.

Основной производитель рельсовой продукции АО «ЕВРАЗ Западно-Сибирский металлургический комбинат (ЗСМК)» сформулировало технические требования к перспективному сварному стыковому соединению рельсов Р65 категории ДТ350, которые значительно превосходят требования, установленные СТО РЖД 1.08.002–2009 «Рельсы железнодорожные, сваренные электроконтактным способом». Одним из важных требований, которое при существующей технологии не достигается, является твердость металла в ЗТВ рельсов на поверхности катания, твердость не должна отличаться более чем на 10 % от требований, установленных ГОСТ Р 51685–2013: на глубине 10 и 22 мм от поверхности катания она должна составлять не менее 270 HV. Длина ЗТВ с пониженной твердостью, измеряемая как расстояние между двумя крайними точками с твердостью, соответствующей основному металлу рельса, должна составлять не более 10 мм. В микроструктуре сварного соединения и ЗТВ не допускается наличие участков мартенсита и бейнита.

В работе [9] предложено решение данной проблемы с использованием процесса контактной стыковой сварки оплавлением рельсов на оборудовании компании Schlatter: стационарной рельсосварочной машине GAA100. Получены термические циклы сварки рельсов с помощью термопар, установленных на образце рельса конденсаторной сваркой. Процесс разделяют на три этапа. Первый этап — разогрев свариваемых поверхностей, второй — фактическая сварка, третий — охлаждение сварного соединения. Первый этап разогрева, в свою очередь, делят еще на три: 1 — «намеренное оплавление», 2 — «предварительное нагревание», 3 — «оплавление». Второй этап фактической сварки является осадкой под током. Во время последнего третьего этапа после сварки применяется термообработка подобно предварительному подогреву для снижения скорости охлаждения после сварки — производят пропускание электрического тока через сварной стык несколькими импульсами. Данные импульсы тока предназначены лишь для снижения скорости охлаждения и исключения образования закалочных структур в металле сварного соединения.

В условиях Сибирского государственного индустриального университета разработан защищенный патентом РФ [10] альтернативный способ решения проблемы, который предполагает после осадки и охлаждения сварного стыка в момент достижения необходимой температуры удерживать заданную температуру путем пропускания импульсов переменного электрического тока через сварной стык. Температура выдержки выбирается исходя из получения более мелкодисперсной структуры металла шва. Время выдержки определяется инкубационным периодом образования необходимой структуры и регулируется количеством импульсов тока [11, 12].

В данной работе приведены исследования по влиянию режимов сварки с последующей изотермической выдержкой образцов из рельсовой стали, производимой путем пропускания импульсов переменного электрического тока после сварки, на качественные показатели сварного стыка.

Сварка образцов производится на модернизированной машине для контактной стыковой сварки MC-2008M. Электрическое устройство машины дополнительно снабжено контроллером, который соединен с электродвигателем привода оплавления и осадки через концевой выключатель, установленный в блоке концевых выключателей и предназначенный для подачи сигнала на контроллер о начале этапа термообработки, а со сварочным трансформатором контроллер соединен с помощью симистора, который, в свою очередь, соединен с контактором включения сварочного тока при помощи контактного реле, установленного на релейной панели. Это позволяет производить изотермическую выдержку после окончания сварки. Управление режимами осуществляется с помощью персонального компьютера.



Рис. 1. Блок-схема оборудования

Fig. 1. Block-diagram of the equipment

Для получения информации о термическом влиянии на структуру металла разработана методика измерения температур в ЗТВ во время сварки. При этом производится измерение силы сварочного тока для дальнейшей корректировки режимов. Схема взаимодействия используемого оборудования приведена на рис. 1. Для измерения температуры металла в ЗТВ используются термопары ХА (хромель-алюмелевые). Сбор и обработка данных, полученных от термопар, производится с помощью измерительного комплекса Tempol. Температура металла сварного шва, где нет возможности установить термопару, измеряется с помощью тепловизора HotFind-D.

Для поиска оптимальных режимов сварки проведен полный факторный эксперимент $N = 2 \times 3^k$ (табл. 1). Исследуемыми параметрами являлись:

X_1 — время охлаждения после осадки, характеризуется скоростью охлаждения (степень переохлаждения аустенита) и температурой T_1 , до которой происходит охлаждение;

X_2 — время подогрева, характеризуется температурой T_2 , до которой происходит нагрев;

X_3 — время охлаждения после подогрева, характеризуется температурой T_1 , до которой происходит охлаждение;

X_4 — количество импульсов подогрева, характеризуется инкубационным периодом превращения аустенита в перлит.

Длительность выдержки X_1 необходимо подобрать таким образом, чтобы сварной стык остыл до значений температуры, при которой образуется необходимая структура металла шва. Импульсы пропускания тока задавались с определенным интервалом. Длительность импульса X_2 определяется температурой сварного стыка, которая не должна подниматься выше значений температур, требуемых для образования необходимой структуры. Длительность интервала X_3 подбирается таким образом, чтобы температура сварного стыка не опускалась ниже значений температур, при которых образуется необходимая структура металла шва. Количеством импульсов X_4 задается время, в течение которого поддерживается средняя температура сварного стыка, необходимая для формирования требуемой структуры при сварке.

Вырезка образцов размером 90×30×10 мм с известным химическим составом (табл. 2) осуществлялась из головки рельсового профиля. В дальнейшем производилась контактная стыковая сварка на модернизированной машине МС-2008М при различных режимах согласно исследуемой матрице. После снятия грата производилось измерение твердости. Твердость изучаемых образцов измерялась с помощью твердомера УЗИТ-3. Далее образцы разрезались перпендикулярно сварному шву на два образца электроэрозионным способом на электроэрози-

онном проволочно-вырезном станке с ЧПУ струйного типа ДК7732 М11. Из одного образца вытачивали по ГОСТ 1497–84 цилиндрические образцы типа III № 6 с расчетной длиной рабочей части 30 мм. Второй образец готовился для металлографического анализа на неметаллические включения и микроструктуру сварного соединения. Исследование проводили с помощью оптического микроскопа Olympus GX-51 в светлом поле при диапазоне увеличений в 100–1000 крат после травления в спиртовом растворе азотной кислоты. Микротвердость измерялась с помощью микротвердомера HVS-1000.

ТАБЛИЦА 1. МАТРИЦА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ $N = 2 \times 3^k$

TABLE 1. MATRIX OF EXPERIMENTS PLANNING $N = 2 \times 3^k$

Номер образца	Значение фактора			
	X_1, c	X_2, c	X_3, c	X_4
1	25	0,4	20	2
2	25	0,2	15	3
3	20	0,2	10	2
4	20	0,2	20	4
5	20	0,4	15	4
6	20	0,4	10	3
7	20	0,6	20	3
8	25	0,6	10	4
9	20	0,6	15	2

В табл. 3 представлены результаты эксперимента и полученные физико-механические свойства образцов. Кроме того, проведен расчет отклонений твердости относительно требований, установленных ГОСТ Р 51685–2013 на поверхности сварного соединения образцов: понижение твердости $\Delta_{\min} = (350\text{HB} - \text{HB}_{\min})/350\text{HB} \times 100 \%$ и повышение твердости $\Delta_{\max} = (\text{HB}_{\max} - 350\text{HB})/350\text{HB} \times 100 \%$, суммарное отклонение твердости $\Delta = \Delta_{\min} + \Delta_{\max}, \%$.

ТАБЛИЦА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

TABLE 3. RESULTS OF THE EXPERIMENT

Номер образца	HB _{min}	HB _{max}	$\Delta_{\min}, \%$	$\Delta_{\max}, \%$	$\Delta, \%$	Протяженность ЗТВ, мм	$\sigma_T, \text{H/mm}^2$	$\sigma_{\text{в}}, \text{H/mm}^2$	$\delta_5, \%$	$\psi, \%$	Наличие неметаллических включений
1	290	414	17,40	18,29	35,69	10,0	660	990	3,2	4,4	+
2	297	364	15,20	3,90	19,1	6,5	650	750	1,7	4,7	+
3	322	370	8,00	5,81	13,81	6,0	530	570	1,2	3,6	+
4	326	385	6,85	10,00	17,43	5,0	720	870	0,4	4,3	+
5	279	364	20,23	4,00	24,23	16,0	800	810	1,2	4,3	+
6	280	391	20,00	11,71	31,71	16,0	770	980	1,5	4,9	+
7	264	404	24,48	15,33	39,81	20,0	880	1080	2,8	5,7	–
8	319	601	8,76	71,83	80,59	26,0	970	1010	1,2	5,0	–
9	281	378	19,71	8,00	27,71	17,0	—	465	0,8	3,8	+

ТАБЛИЦА 2. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ, %
 TABLE 2. CHEMICAL COMPOSITION OF STUDIED SPESIMENS, %

Номер образца	C	Mn	Si	Cr	V	P	S	Al	Ni	Cu	Ti	Mo	Nb	Sn	Sb	O	H, ppm
1	0,76	0,77	0,53	0,37	0,04	0,010	0,010	0,003	0,08	0,12	0,002	0,006	0,002	0,005	0,002	0,0010	0,90
2	0,77	0,77	0,53	0,37	0,04	0,012	0,009	0,003	0,08	0,10	0,003	0,007	0,002	0,005	0,001	0,0009	0,08
3	0,76	0,77	0,53	0,37	0,04	0,010	0,010	0,003	0,08	0,12	0,002	0,006	0,002	0,005	0,002	0,0010	0,90
4	0,77	0,77	0,53	0,37	0,04	0,012	0,009	0,003	0,08	0,10	0,003	0,007	0,002	0,005	0,001	0,0009	0,08
5	0,77	0,80	0,56	0,38	0,04	0,008	0,006	0,002	0,06	0,10	0,002	0,006	0,002	0,005	0,001	0,0013	1,10
6	0,76	0,78	0,55	0,38	0,04	0,010	0,006	0,003	0,07	0,10	0,002	0,005	0,002	0,004	0,001	0,0012	0,90
7	0,76	0,77	0,53	0,37	0,04	0,009	0,005	0,003	0,07	0,11	0,002	0,005	0,001	0,005	0,002	0,0009	1,00
8	0,76	0,78	0,55	0,38	0,04	0,010	0,006	0,003	0,07	0,10	0,002	0,005	0,002	0,004	0,001	0,0012	0,90
9	0,77	0,80	0,56	0,38	0,04	0,008	0,006	0,002	0,06	0,10	0,002	0,006	0,002	0,005	0,001	0,0013	1,10

В данной работе приведены результаты исследований по двум образцам: образец № 8 — с режимом сварки, не удовлетворяющим техническим требованиям, и образец № 4 — с режимом сварки, удовлетворяющим техническим требованиям (рис. 2 и 3). Следует отметить, что образец № 4 соответствует показателям твердости металла в ЗТВ и не отличается более чем на 10 % от требований, разработанных АО ЕВРАЗ ЗСМК. Длина ЗТВ с пониженной твердостью, из-

меряемая как расстояние между двумя крайними точками с твердостью, соответствующей основному металлу рельса, не превышает 10 мм. В микроструктуре сварного соединения и ЗТВ нет участков мартенсита и бейнита. Образец № 8 не удовлетворяет данным требованиям, в металле шва и ЗТВ присутствует структура мартенсита и бейнита, а по твердости металл в ЗТВ отличается более чем на 10 % от установленных требований.

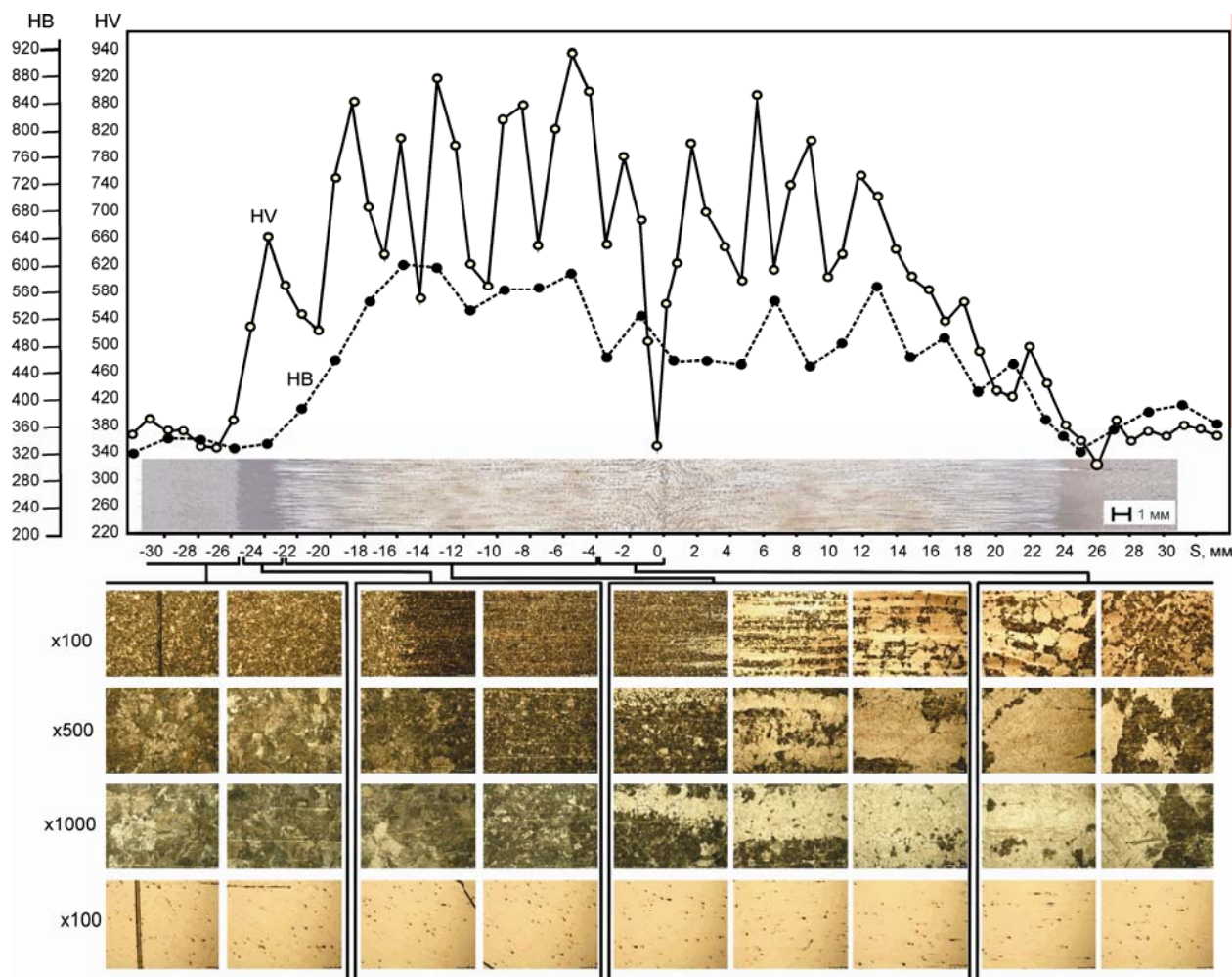


Рис. 2. Распределение твердости, микротвердости, неметаллических включений и структуры в сварном соединении образца № 8

Fig. 2. Distribution of hardness, microhardness, nonmetallic inclusions and structure in the welding joint of specimen No. 8

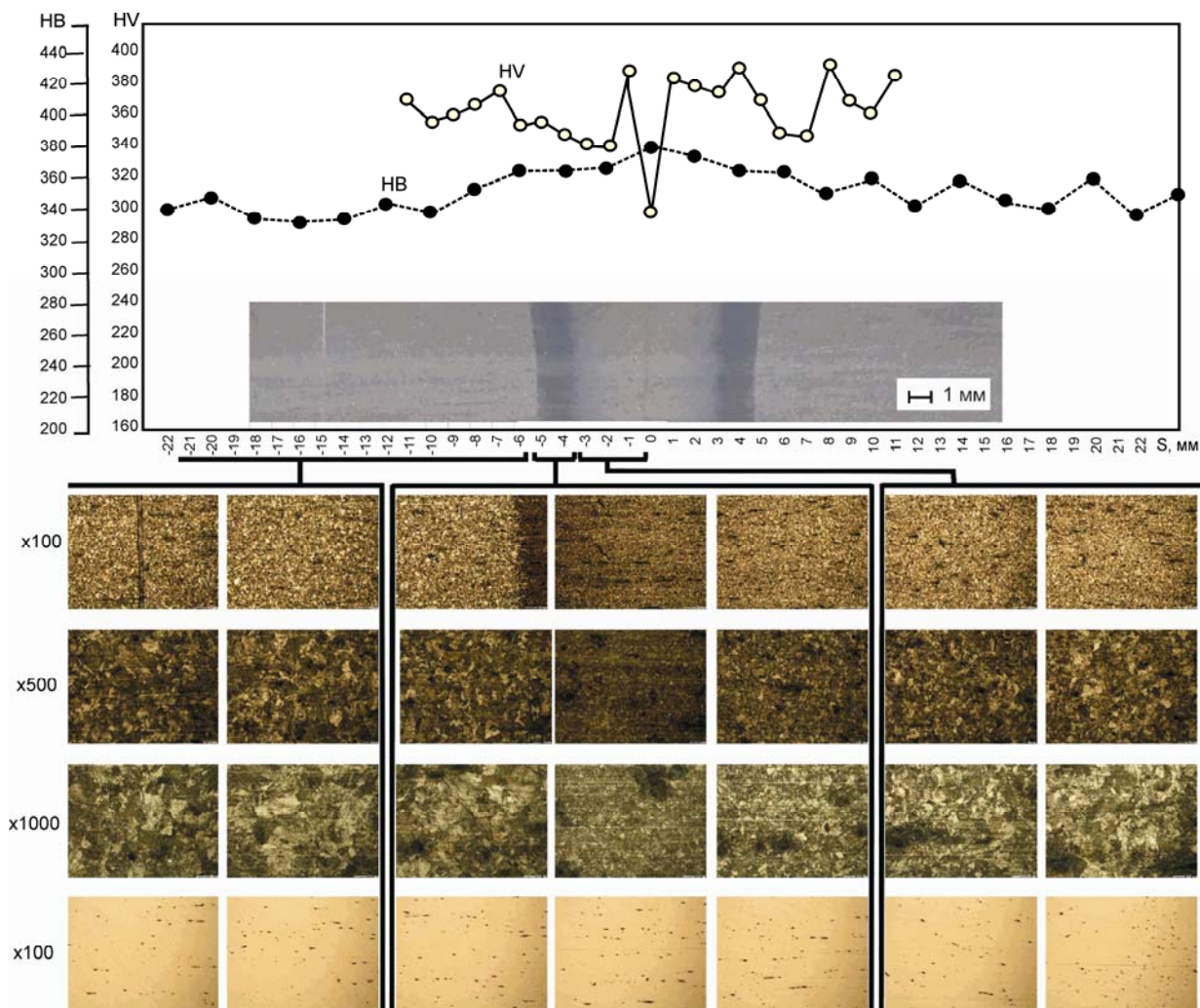


Рис. 3. Распределение твердости, микротвердости, неметаллических включений и структуры в сварном соединении образца № 4

Fig. 3. Distribution of hardness, microhardness, nonmetallic inclusions and structure in the welding joint of specimen No. 4

Результаты механических испытаний показали, что у всех сварных соединений наблюдаются низкие пластические свойства, которые объясняются либо наличием закалочных струк-

тур металла (образцы № 5–9), либо скоплением неметаллических включений в зоне сварного шва (образцы № 1–4).

Выводы

1. Разработан, защищенный патентом РФ способ контактной стыковой сварки [10], позволяющий получать сварное соединение изделий из рельсовой стали с равномерным распределением твердости и малой ЗТВ, удовлетворяющими разработанным техническим требованиям АО ЕВРАЗ ЗСМК к перспективному сварному

стыковому соединению рельсов Р65 категории ДТ350.

2. Предлагаемый способ позволяет производить регулирование структуры сварного соединения рельсов, не прибегая к дополнительной локальной термической обработке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kozyrev N.A., Kozyreva O.A., Usoltsev A.A., Kryukov R.E., Shevchenko R.A. Modern Methods of Rail Welding // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 253: International Scientific-Practical Conference: Innovations in Fuel and Energy Complex and Mechanical Engineering (FEC-2017), 18–21 April 2017, Kemerovo, Russian Federation. P. 1–6. doi: 10.1088/1757-899X/253/1/012002.
2. Козырев Н.А., Усольцев А.А., Шевченко Р.А. и др. Современные методы сварки рельсов нового поколения // Изв. вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 10. С. 785–791.
3. Mitsuru F., Hiroaki N., Kiyoshi N. Rail flash-butt welding technology // JFE Technical Report. 2015. № 20. P. 159–163.
4. Saita K., Karimine K., Ueda M., Iwano K., Yamamoto T., Hiroguchi K. Trends in rail welding technologies and our future approach // Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report. 2013. № 105. P. 84–92.
5. Железнодорожные рельсы из электростали / Н.А. Козырев, В.В. Павлов, Л.А. Годик, В.П. Дементьев. — Новокузнецк: ЕвразХолдинг, Новокузнецкий металлургический комбинат, 2006. — 388 с.
6. Шур Е.А., Резанов В.А. Комплексный метод контактной сварки рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 3. С. 20–22.
7. Гаврилов В.В. Пути решения вопроса повышения эксплуатационной надежности рельсов для метрополитенов производства ЕВРАЗ ЗСМК // Метро и тоннели. 2012. № 1. С. 42, 43.
8. Гуляев А.П., Гуляев А.А. Металловедение: учебник для вузов. — М.: ИД “Альянс”, 2012. — 644 с.
9. Weingrill L., Krutzler J., Enzinger N. Temperature field evolution during flash-butt welding of railway rails // Materials Science Forum. 2016. Vol. 879. P. 2088–2093. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.879.2088.
10. Пат. 2641586 РФ, МПК В 23 К 11/04. Способ контактной стыковой сварки рельсов / Е.В. Протопопов, Н.А. Козырев, Р.А. Шевченко, Р.Е. Крюков, С.В. Фейлер, А.А. Усольцев // Заявл. 07.12.2016; опубл. 18.01.18. Бюл. № 2.
11. Шевченко Р.Е. Совершенствование технологии сварки рельсовой стали с повышенным содержанием хрома // Труды Всерос. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Вып. 20. Ч. III. Естественные и технические науки / Под общ. ред. М.В. Темлянцева. — Новокузнецк, 2016. С. 196–198.
12. Выбор оптимальных режимов сварки железнодорожных рельсов / Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, Р.Е. Крюков, А.О. Патрушев, А.А. Усольцев // Сборник трудов XX Междунар. научно-практич. конф. “Металлургия: технологии, инновации, качество”. — Новокузнецк, 2017. С. 332–336.

DEVELOPMENT OF A NEW TECHNOLOGY OF WELDING OF HIGH SPEED MOVEMENT RAILS

N. A. KOZYREV, HD (Tech), Head of Dpt of materials science, foundry and welding, kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru;
R. A. SHEVCHENKO, postgraduate of Dpt of materials science, foundry and welding;
R. E. KRYUKOV, PhD (Tech), Associate Professor of Dpt of materials science, foundry and welding;
A. A. USOLTSEV, PhD (Tech), Associate Professor of Dpt of materials science, foundry and welding
(Siberian State Industrial University, Russia, Novokuznetsk)

Abstract. Results of the study of welding modes influence following isothermal exposure of rail steel samples, made by admission of alternative current pulses after the welding quoted. The welding of the samples was made under laboratory conditions using the modernized machine for contact joint welding MC-2008M.

Based on laboratory study data a method of contact joint welding, protected by a RF patent, was developed, enabling to obtain a welding connection of parts made of rail steel with uniform hardness distribution and small zone of thermal influence, meeting the elaborated by JSC EVRAZ ZSMK technical specifications for perspective welded joint connection of R65 rails of DT350 category. The proposed method enables to control the structure of welded rails connection without additional local thermal treatment.

Key words: railway rails; rail steel; contact joint welding; quality of welded joint; structure of welded connection.

For citation: Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Kryukov R.E., Usol'tsev A.A. Development of a new technology of welding of high speed movement rails. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 8, pp. С. 50–57. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-8-50-57

REFERENCES

1. Kozyrev N.A., Kozyreva O.A., Usol'tsev A.A., Kryukov R.E., Shevchenko R.A. Modern Methods of Rail Welding. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 253: International Scientific-Practical Conference: Innovations in Fuel and Energy Complex and Mechanical Engineering (FEC-2017), 18–21 April 2017, Kemerovo, Russian Federation. pp. 1–6. doi:10.1088/1757-899X/253/1/012002.
2. Kozyrev N.A., Usol'tsev A.A., Shevchenko R.A., Kryukov R.E., Shishkin P.E. Modern methods of new generation rails welding. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 2017, vol. 60, no. 10, pp. 785–791. (In Russ.).
3. Mitsuru F., Hiroaki N., Kiyoshi N. Rail flash-butt welding technology. *JFE Technical Report*, 2015, no. 20, pp. 159–163.
4. Saita K., Karimine K., Ueda M., Iwano K., Yamamoto T., Hiroguchi K. Trends in rail welding technologies and our future approach. *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*, 2013, no. 105, pp. 84–92.

5. Kozy'rev N.A., Pavlov V.V., Godik L.A., Dement'ev V.P. *Zheleznodorozhny'e rel'sy' iz e'lektrostali* [Railway rails made of arc-furnace steel]. Novokuznezsk: EvrazXolding, Novokuzneczkij metallurgicheskij kombinat, 2006, 388 p. (In Russ.).
6. Shur E.A., Rezanov V.A. Complex method of rails contacts welding. *Vestnik VNIIZhT*, 2012, no. 3, pp. 20–22. (In Russ.).
7. Gavrilov V.V. Ways of solving the task of increasing operational safety of rails for underground, produced by EVRAZ ZSMK. *Metro i tonneli*, 2012, no. 1, pp. 42, 43. (In Russ.).
8. Gulyaev A.P., Gulyaev A.A. *Metallovedenie: uchebnik dlya vuzov* [Metal science: Textbook for high schools]. Moscow: ID Al'yans, 2012, 644 p. (In Russ.).
9. Weingrill L., Krutzler J., Enzinger N. Temperature field evolution during flash-butt welding of railway rails. *Materials Science Forum*, 2016, vol. 879, pp. 2088–2093. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.879.2088.
10. Protopopov E.V., Kozy'rev N.A., Shevchenko R.A., Kryukov R.E., Fejler S.V., Usol'cev A.A. *Sposob kontaktnoj sty'kovoj svarki rel'sov* [A method of rails butt contact welding]. Patent RF no. 2641586. IPC B 23 K 11/04. *Byulleten' izobretenij*, 2018, no. 2. (In Russ.).
11. Shevchenko R.E. [Improving of a technology of rail steel welding with increased chrome content]. *Trudy' Vseros. nauch. konf. studentov, aspirantov i molody'x ucheny'x. Vy'p. 20. Ch. III. Estestvenny'e i texnicheskie nauki* [Proceedings of the All-Russian Scientific Conference of Students, PhD students and young scientists. Issue. 20. Part III. Natural and technical sciences]. Temlyancev M.V. ed. Novokuznezsk, 2016, pp. 196–198. (In Russ.).
12. Shevchenko R.A., Kozy'rev N.A., Kryukov R.E., Patrushev A.O., Usol'cev A.A. [Selection of optimal welding modes of railway rails]. *Sbornik trudov XX Mezhdunar. nauchno-praktich. konf. "Metallurgiya: texnologii, innovacii, kachestvo"* [Collection of Works XX International. scientific and practical. Conf. "Metallurgy: technology, innovation, quality"]. Novokuznezsk, 2017, pp. 332–336. (In Russ.).