РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЛИННОМЕРНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ПЛЕТЕЙ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНДУКЦИОННОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ

Н. А. КОЗЫРЕВ¹, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения, литейного и сварочного производства, kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru; Р. А. ШЕВЧЕНКО¹, аспирант кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства; С. Н. КРАТЬКО², директор; Р. Е. КРЮКОВ¹, канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства; А. Р. МИХНО¹, магистрант кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства

(¹ Сибирский государственный индустриальный университет, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк;

² ООО "РСИП-М" структурное подразделение рельсосварочное предприятие № 29 (РСИП-29), Россия, Кемеровская обл., пгт Промышленная)

Аннотация. Сварные стыки рельсовых плетей после электроконтактной сварки для устранения зон термического влияния подвергаются термической обработке. В настоящее время для термической обработки сварных стыков в России применяются установки индукционного нагрева, в которых в качестве закалочной среды используется сжатый воздух. Однако этот способ закалки имеет существенные недостатки, включая появление новых зон термического влияния при местном нагреве сварных стыков, ухудшение прямолинейности сварных стыков после охлаждения. Компанией Shlatter предложено решение данной проблемы с использованием процесса контактной стыковой сварки оплавлением рельсов. В Сибирском государственном индустриальном университете проведены теоретические расчеты и лабораторные исследования термического цикла сварки образцов из рельсовой стали, которые показали принципиальную возможность использования данного способа термообработки в промышленных условиях. Способ предполагает после осадки и охлаждения сварного стыка удерживать заданную температуру с момента ее достижения путем пропускания импульсов переменного электрического тока через сварной стык. Температура выдержки выбирается исходя из получения необходимой мелкодисперсной структуры металла шва. Время выдержки определяется инкубационным периодом образования этой структуры и регулируется количеством импульсов тока. В результате проведенных промышленных экспериментов на машине для контактной стыковой сварки МСР-6301 определены оптимальные параметры времени охлаждения после осадки, подогрева и охлаждения после подогрева, а также количество импульсов подогрева. Опробован способ контактной стыковой сварки, позволяющий получать сварное соединение изделий из рельсовой стали Р65 категории ДТ350 с механическими свойствами сварных соединений, превосходящими технические требования СТО РЖД 1.08.002–2009.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка, длинномерные рельсовые плети, индукционная термообработка, изотермическая выдержка, зона термического влияния, статический трехточечный изгиб.

Ссылка для цитирования. Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Кратко С.Н., Крюков Р.Е., Михно А.Р. Разработка технологии изготовления длинномерных рельсовых плетей без использования индукционной термообработки // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 4. С. 488–497.

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-4-488-497

ELABORATION OF A TECHNOLOGY OF LONG RAIL LASHES PRODUCTION WITHOUT INDUCTION HEAT TREATMENT APPLICATION

N. A. KOZYREV¹, HD (Tech), Prof., Head of Dpt "Material Science, Foundry and welding production", kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru; R. A. SHEVCHENKO¹, postgraduate, Dpt "Material Science, Foundry and welding production"; S. N. KRAT'KO², Director; R. E. KRYUKOV¹, PhD (Tech), Prof. Ass., Dpt "Material Science, Foundry and welding production"; A. R. MIKHNO¹, undergraduate, Dpt "Material Science, Foundry and welding production"

(¹ Siberian State Industrial University, Russia, Kemerovo rgn., Novokuznetsk, ² OJSC "RSP-M" structural department rail-welding enterprise № 29 (PCIP-29), Russia, Kemerovo rgn., settlement Promyshlennaya)

Abstract. Welding butts of rail lashes after resistance butt-welding are subjected to heat treatment to eliminate heat-affected zones. At present facilities of induction heating are used in Russia for the heat treatment and compressed air as a quenching media. However, this method of quenching has significant drawbacks, including appearance of new heat-affected zones at the local heating of the welded butts, deterioration of the welded butts' straightness after cooling. Shlatter Company proposed a solution of this problem by application of the process of resistance butt-welding by rails fusion. Theoretical calculations and laboratory studies of the thermal cycle of rail steel samples welding were made in the Siberian State Industrial University, which showed a principal

possibility of this method application under industrial conditions. The method assumes after the welded butt settling and cooling to keep the preset temperature from the moment of its reaching by passing alternative electric current pulses through the welded butt. The temperature of exposure is selected based on obtaining necessary fine grain seam metal structure. The duration of exposure is determined by latency period of the structure formation and is controlled by the number of current pulses. The carried out industrial experiments at the MCP-6301 resistance butt welding machine resulted in determining parameters of cooling time after settling, heating and cooling after the heating, as well as the number of heating pulses. A method of resistance butt welding was tested, enabling to obtain the welded joint of details of the P65 ДТ350 category rail steel. The welded joint had mechanical properties exceeding technical requirements of СТО РЖД 1.08.002–2009 specifications.

Keywords: resistance butt welding, long rail lashes, induction heat treatment, isothermal exposure, heat-affected zone, static three-point bending.

For citation. Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Krat'ko S.N., Kryukov R.E., Mikhno A.R. Elaboration of a technology of long rail lashes production without induction heat treatment application. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii* = *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, vol. 75, no. 4, pp. 488–497. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-4-488-497

Сварные стыки рельсовых плетей после электроконтактной сварки обязательно подвергаются термической обработке на индукционных установках [1, 2]. В настоящее время в России используются установки УИН-001-100/РТ-С и УИН-001-100/РТ-П (далее УИН), производимые ООО «Магнит М». Ранее для термической обработки использовали установки ИТТЗ-250/2,4 с источником питания мощностью 250 кВт, мощность источника питания установок УИН составляет 100 кВт при одинаковой скорости нагрева сварного стыка рельса. Наиболее существенным изменением является замена воздушно-водяной смеси, используемой в качестве закалочной среды в установках ИТТЗ-250/2,4, на сжатый воздух в установках нового поколения. Использование сжатого воздуха обеспечило более качественную термическую обработку сварных стыков, что является особо актуальным в связи с расширением применения на отечественных железных дорогах легированных сталей, в том числе легированных хромом. Для этих сталей закалочное охлаждение воздушно-водяной смесью способствует получению структур с наличием мартенсита, что резко снижает сопротивление рельсов усталостному и хрупкому разрушению рельсовой стали [3].

При всех положительных воздействиях термической обработки [3] с применением закалочной среды в виде сжатого воздуха у современных индукционных установок имеется ряд недостатков, которые связаны с:

- появлением новых зон термического влияния при местном нагреве сварных стыков при термической обработке;
- односторонним охлаждением только со стороны головки, что приводит к ухудшению прямолинейности сварных стыков после охлаждения;
- недостаточной глубиной прогрева сварных стыков при термической обработке.

Локальная термическая обработка сварного стыка приводит к увеличению и появлению новых зон термического влияния по сравнению с зонами при сварке рельсов контактным способом без термической обработки. Увеличение линей-

ной величины зон после термической обработки в головке рельса на расстоянии порядка 40–47 мм от сварного стыка и в его подошве на расстоянии 70–75 мм приводит к снижению механических свойств сварного стыка [3].

Компанией Shlatter [4] предложено решение данной проблемы с использованием процесса контактной стыковой сварки оплавлением рельсов на стационарной рельсосварочной машине GAA 100. 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: “намеренное оплавление”, “предварительное нагревание” и “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 были проведены теоретические расчеты [5, 6] и лабораторные исследования [7–9] управления термическим циклом при сварке образцов из рельсовой стали, они показали принципиальную возможность использования данного способа в промышленных условиях.

Способ 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 [10].

С целью отработки технологии в промышленных условиях были проведены теоретические расчеты, оптимизация технологического процесса и отработка методик в условиях рельсо-сварочных предприятий [11–32].

В настоящей работе в условиях рельсосварочного предприятия проведены две серии экспериментов в промышленных условиях на машине для контактной стыковой сварки МСР-6301.

Для исследования вырезались образцы полно-профильных рельсов Р65 категории ДТ350 длиной 600 мм с известным химическим составом, приведенным в табл. 1. Было проведено две серии экспериментов: первая — согласно матрице полного факторного эксперимента $k = 2^3$, вторая — для подтверждения воспроизводимости результатов выдержавших образцов.

ТАБЛИЦА 1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОБРАЗЦОВ, %

TABLE 1. CHEMICAL COMPOSITION OF THE SAMPLES, %

Серия экспериментов	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
1-я	0,78	0,78	0,55	0,007	0,013	0,37	0,08	0,11
2-я	0,78	0,77	0,55	0,009	0,007	0,41	0,08	0,12
Серия экспериментов	Al	V	Ti	Mo	Nb	Sn	N	Sb
1-я	0,003	0,04	0,003	0,006	0,002	0,005	0,011	0,001
2-я	0,003	0,04	0,003	0,008	0,002	0,006	0,009	0,002

Сварка рельсов производилась по заданному режиму (табл. 2), который соответствует режимам СТО РЖД 1.08.002–2009 “Рельсы железнодорожные, сваренные электроконтактным способом”. Режим сварки главным образом заключается в управлении оплавлением при контактной стыковой сварке, что осуществляется корректировкой задаваемой скорости оплавления в зависимости от текущего значения тока. Это осуществляется изменением установок начала коррекции скорости (ток коррекции $I_{кор}$), тока $I_{ост}$, останавливающего подачу, и тока $I_{рев}$, дающего команду на реверс. Для этого программируемые

значения скорости и тока оплавления, реализующие обратную связь $I_{кор}$, $I_{ост}$, $I_{рев}$, подбирают таким образом, чтобы фактическое среднее значение тока на осциллограмме было в 2 раза меньше тока короткого замыкания. Это соответствует максимуму электрической мощности, развиваемой в контакте между оплавляемыми торцами заготовок. Недопустимые отклонения тока в форме скачкообразных изменений его величины исключаются благодаря быстродействующей обратной связи. Эта же обратная связь стабилизирует текущее значение сварочного тока.

ТАБЛИЦА 2. РЕЖИМ СВАРКИ РЕЛЬСОВ Р65

TABLE 2. P65 RAILS WELDING MODE

Показатель	Номер участка									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S , мм	2	4	3	2,5	2,5	2	1,5	1,5	1,5	1,5
U , %	75	70	55	60	60	65	70	88	88	98
$V_{в}$, мм/с	0,6	1,3	0,8	1	1,1	1,2	0,7	0,9	1,1	1,2
$V_{н}$, мм/с	0,5	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,3	0,2
$I_{кор}$, А	200	300	200	200	250	250	250	300	400	500
$I_{ост}$, А	300	450	350	350	400	400	460	500	600	700
$I_{рев}$, А	400	500	400	400	450	450	550	600	700	800
$I_{кз}$, А	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200

Примечание: $S_{ос}$ = 14 мм — путь осадки; $V_{ос}$ = 100 мм/с — скорость осадки; S_i = 6 мм — путь осадки под током.

Управление режимами изотермической выдержки после сварки осуществляют с помощью персонального компьютера, изменяя программу промышленного контроллера SIMATIC S7-300. С помощью программного обеспечения Simatic Step 7 написана программа, позволяющая управлять режимами изотермической выдержки. Программа была написана на графическом языке LAD, где в качестве команд используется

коммутационная схема, которая очень похожа на электротехническую схему. Для задания необходимых временных параметров были использованы таймеры (рис. 1, а). Для включения сварочного трансформатора использовался триггер, к которому на входы S и R подключены последовательно и параллельно контакты, включающиеся по таймерам (см. рис. 1, б).

Рис. 1. Программа, отвечающая за изотермическую выдержку:

а — таймеры для временных параметров;
б — включение трансформатора

Fig. 1. Program, responsible for isothermal exposure:

а — timers for time parameters; б — transformer switching-on

Для получения информации о термическом влиянии на структуру металла измерение температур в зоне термического влияния во время сварки производилось с помощью тепловизора HotFind-D. Тепловизор HotFind-D позволяет производить измерение температуры до 1500 °С. Тепловизор снабжен неохлаждаемой микробопометрической матрицей в фокальной плоскости объектива разрешением 160×120 пикселей. Передача видеоизображения термограмм на компьютер производится с помощью платы видеозахвата аналогового сигнала в формате NTSC частотой 60 Гц. Тепловизор устанавливался на штативе на расстоянии 1 м от сварного стыка рельсов (рис. 2).

Рис. 2. Оборудование для измерения температуры сварного соединения рельсов

Fig. 2. Equipment for measuring rails welded joint temperature

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.

В дальнейшем проводили испытание нетермообработанных стыков на трехточечный статический изгиб согласно СТО РЖД 1.08.002–2009 “Рельсы железнодорожные, сваренные электроконтактным способом”. Испытания на статический изгиб проводили на прессе ПМС-320. Контрольные образцы испытывали после сварки и удаления грата без дополнительной обработки стыков. При испытаниях на статический поперечный изгиб контрольный образец имел длину не менее 1200 мм со сварным стыком посередине. Нагрузку прикладывали в середине пролета контрольного образца в месте сварного стыка с расстоянием между опорами 1 м. Испытание контрольного образца производили с приложением нагрузки на головку (рис. 3). Результатами испытания являются значения усилия, возникающего при изгибе $P_{изг}$, и значения стрелы прогиба $f_{пр}$, при которых происходит разрушение контрольного образца, либо максимальные значения данных показателей, если образец не разрушился во время испытаний. В табл. 3 приведены результаты испытаний.

Рис. 3. Схема испытания на статический поперечный изгиб

Fig. 3. Diagram of static cross bending

ТАБЛИЦА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ НА СТАТИЧЕСКИЙ ТРЕХТОЧЕЧНЫЙ ИЗГИБ

TABLE 3. TEST RESULTS FOR STATIC THREE-POINT BENDING

Серия экспериментов	Номер образца	Значения фактора	
		$P_{изг}, \text{кН}$	$f_{пр}, \text{мм}$
1-я	1	2002	17,4
	2	1882	17,9
	3	2364	35,4
	4	1970	20,1
	5	2107	23,4
	6	1616	11,0
	7	2059	20,9
	8	2244	31,2
	9	2179	24,4
2-я	9 (3)*	2276	34,2
	10	2493	40,2
Требования СТО РЖД 1.08.002–2009		2000	27,0

* Указан порядковый номер образца, в скобках — номер повторяемого.

В результате эксперимента образцы 9 ($P_{изг} = 2276 \text{ кН}$, $f_{пр} = 34,2 \text{ мм}$) и 10 ($P_{изг} = 2493 \text{ кН}$, $f_{пр} = 40,2 \text{ мм}$) имеют значения показателей испытаний выше ($P_{изг} = 2000 \text{ кН}$, $f_{пр} = 27 \text{ мм}$) требований СТО РЖД 1.08.002–2009. На рис. 4 и 5 представлены осциллограммы процесса сварки для данных оптимальных образцов 9 и 10.

Рис. 4. Осциллограмма сварки образца 9

Fig. 4. Oscillogram of sample 9 welding

Рис. 5. Осциллограмма сварки образца 10

Fig. 5. Oscillogram of sample 10 welding

Согласно полученным данным были построены регрессионные модели для выходных параметров усилия при изгибе и стрелы прогиба:

$$P_{изг} = 1926,5 - 2,05X_1 + 64,38X_2 + 3,2X_3; R^2 = 0,61;$$

$$f_{пр} = 15,72 - 0,04X_1 + 2,37X_2 + 0,07X_3; R^2 = 0,51.$$

Выводы

1. В промышленных условиях опробован способ контактной стыковой сварки, позволяющий получать сварное соединение изделий из рельсовой стали с необходимыми и превосходящими технические требования СТО РЖД 1.08.002–

2009 по механическим свойствам сварные соединения рельсов Р65 категории ДТ350.

2. В результате проведенных промышленных экспериментов на машине для контактной стыковой сварки МСР-6301 определены оптимальные параметры: время охлаждения после осадки

[характеризуется скоростью охлаждения (степень переохлаждения аустенита) и температурой, до которой происходит охлаждение]; время подогрева (характеризуется температурой, до которой происходит нагрев); время охлаждения

после подогрева (характеризуется температурой, до которой происходит охлаждение); количество импульсов подогрева (характеризуется инкубационным периодом превращения аустенита в перлит).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козырев Н.А., Павлов В.В., Годик Л.А., Дементьев В.П. Железнодорожные рельсы из электростали. — Новокузнецк: ЕвразХолдинг, Новокузнецкий металлургический комбинат, 2006. — 388 с.
2. Шур Е.А., Резанов В.А. Комплексный метод контактной сварки рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 3. С. 20–22.
3. Резанов В.А., Федин В.М., Башлыков А.В. и др. Комплексный метод контактной сварки рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 2013. № 2. С. 28–34.
4. Weingrill L., Krutzler J., Enzinger N. Temperature field evolution during flash-butt welding of railway rails // Materials Science Forum. 2016. V. 879. P. 2088–2093. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.879.2088.
5. Расчет оптимальных режимов электроконтактной сварки железнодорожных рельсов / Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, П.Е. Шишкин и др. // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сб. научн. тр. Вып. 37. — Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2016. С. 175–180.
6. Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Усольцев А.А. и др. Расчет оптимальных режимов электроконтактной сварки рельсов откаточных путей горных выработок // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2017. № 3. С. 232–236.
7. Разработка новой технологии сварки рельсов для высокоскоростного движения / Н.А. Козырев, Р.А. Шевченко, Р.Е. Крюков, А.А. Усольцев // Материалы междунар. научно-технич. конф., посвященной 130-летию изобретения Н.Г. Славяновым электродуговой сварки плавящимся электродом “Сварка и контроль–2018” (Пермь, 18–21 сентября 2018 г.). — Пермь: изд-во Пермского национальн. исследов. политехнич. ун-та, 2018. С. 159–167.
8. 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 (1424). С. 50–57.
9. Протопопов Е.В., Козырев Н.А., Крюков Р.Е. и др. Новая технология сварки железнодорожных рельсов // Сб. трудов XV Междунар. конгресса сталеплавателей (г. Москва–Тула, 15–19 октября 2018 г.). — М.: МОО “Ассоциация сталеплавателей”, 2018. С. 296–300.
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. 18.01.2018. Бюл. № 2.
11. Kozzyrev N.A., Usoltsev A.A., Kryukov R.E. etc. Modern methods of rail welding // Key engineering materials. 2017. V. 736. P. 116–121.
12. Выбор оптимальных режимов электроконтактной сварки железнодорожных рельсов / Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, П.Е. Шишкин и др. // Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении: сб. трудов Междунар. научно-практич. конф. 18–21 апреля 2017 г. — Кемерово: КузГТУ, 2017. С. 205–210.
13. Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Усольцев А.А. и др. Статистическая модель управления процессами контактной сварки рельсов // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2017. № 1 (19). С. 4–8.
14. Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Усольцев А.А. и др. Оптимизация технологических параметров процесса контактной стыковой сварки рельсов // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2017. № 1 (19). С. 12–15.
15. Способы получения качественного сварного соединения железнодорожных рельсов / Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.А. Усольцев и др. // Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XX Междунар. научно-практич. конф.: в 2-х ч. Ч. 1. — Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2017. С. 254–257.
16. Многофакторный регрессионный анализ процесса контактной сварки рельсов на машине K1000 / Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, Р.Е. Крюков и др. // Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XX Междунар. научно-практич. конф.: в 2-х ч. Ч. 1. — Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2017. С. 264–267.
17. Шевченко Р.А., Кратько С.Н., Шишкин П.Е. и др. Оптимизация технологических параметров процесса контактной сварки рельсов на машине K1000 методами математического моделирования // Вестник РАЕН (Западно-Сибирское отд-е). 2017. Вып. 20. С. 101–106.
18. Шевченко Р.А., Базайкин В.И., Кратько С.Н. и др. Исследование токового режима сварочной машины K1000 при сварке рельсов // Вестник РАЕН (Западно-Сибирское отд-е). 2017. Вып. 20. С. 106–111.
19. Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Патрушев А.О. и др. Определение оптимальных режимов работы рельсосварочной машины K1000 // Вестник РАЕН (Западно-Сибирское отд-е). 2017. Вып. 20. С. 118–126.
20. Протопопов Е.В., Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Усольцев А.А. и др. Совершенствование технологии сварки железнодорожных рельсов // Вестник РАЕН (Западно-Сибирское отд-е). 2018. Вып. 21. С. 123–128.
21. Shevchenko R.A., Kozzyrev N.A., Kutsenko A.I. etc. Method of researching the influence of isothermic annealing modes on welding of hauling track rails used in mine workings // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. V. 206. P. 1–5 (012031). doi: 10.1088/1755-1315/206/1/012031/.
22. Shevchenko R.A., Kozzyrev N.A., Kryukov R.E. etc. Multi-factor regression analysis of the process of rails contact welding on K1000 machine // Metallurgy 2017. IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. V. 411 P. 1–5 (012088). doi: 10.1088/1757-899X/411/1/012088.
23. Совершенствование технологии электроконтактной сварки и термообработки железнодорожных рельсов / Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, Р.Е. Крюков // Вестник горно-металлургической секции Российской

- академии естественных наук. Отделение металлургии: Сб. науч. трудов. Вып. 40. — Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2018. С. 63–68.
24. Поиск оптимальных технологических параметров режима работы рельсосварочной машины K1100 / Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.О. Патрушев и др. // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сб. научн. тр. Вып. 38. — Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2017. С. 70–76.
 25. Применение методов математического моделирования для оптимизации технологических параметров процесса контактной сварки рельсов на машине K1100 / Р.А. Шевченко, С.Н. Кратько, П.Е. Шишкин и др. // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сб. научн. тр. Вып. 38. — Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2017. С. 76–81.
 26. Анализ токового режима работы сварочной машины K1100 при сварке рельсов на этапе оплавления / Р.А. Шевченко, В.И. Базайкин, С.Н. Кратько и др. // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сб. научн. тр. Вып. 38. — Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2017. С. 81–87.
 27. Выбор оптимальных режимов сварки железнодорожных рельсов / Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, Р.Е. Крюков и др. // Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XX Междунар. научно-практич. конф.: в 2-х ч. Ч. 1. — Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2017. С. 332–336.
 28. 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.
 29. Modern Methods of Rail Welding / N.A. Kozyrev, O.A. Kozyreva, A.A. Usoltsev etc. // International Scientific-Practical Conference: Innovations in Fuel and Energy Complex and Mechanical Engineering (FEC-2017) 18–21 April 2017, Kemerovo, Russian Federation IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2017. V. 253. P. 1–6. doi: 10.1088/1757-899X/253/1/012002.
 30. Analysis of rail welding methods for mine rail access with the use of modern technologies / A.A. Usoltsev, R.A. Shevchenko, N.A. Kozyrev etc. // International Scientific and Research Conference on Knowledge-based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources (KTDUMUR2017), 6–9 June 2017, Novokuznetsk, Russian Federation. 2017. V. 84. P. 1–7. doi: 10.1088/1755-1315/84/1/012025.
 31. Современные методы получения бесстыковых рельсов / Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, Р.Е. Крюков и др. // Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении: сб. трудов Междунар. научно-практич. конф. 18–21 апреля 2017 г. — Кемерово: КузГТУ, 2017. С. 123–127.
 32. Современные способы сварки рельсов / Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, Р.А. Шевченко и др. // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: сб. научн. тр. Вып. 37. — Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2016. С. 166–174.

Поступила 15 января 2019 г.

REFERENCES

1. Kozyrev N.A., Pavlov V.V., Godik L.A., Dement'ev V.P. *Zheleznodorozhnye rel'sy iz elektrostali* [Railway rails from electric steel]. Novokuznetsk: EvrazKholding, Novokuznetskii metallurgicheskii kombinat, 2006, 388 p. (In Russ.).
2. Shur E.A., Rezanov V.A. Complex method of rails butt welding. *Vestnik VNIIZhT*, 2012, no. 3, pp. 20–22. (In Russ.).
3. Rezanov V.A., Fedin V.M., Bashlykov A.V., Fimkin A.I., Zeman S.K. Complex method of rails contact welding. *Vestnik VNIIZhT*, 2013, no. 2, pp. 28–34. (In Russ.).
4. 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.
5. Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Shishkin P.E., Kryukov R.E., Usol'tsev A.A. *Raschet optimal'nykh rezhimov elektrokontaktnoi svarki zheleznodorozhnykh rel'sov* [Calculation of electric contact welding optimal regimes for railway rails]. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektsii Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii: Sb. nauchn. tr.* [Bulletin of the mining and metallurgical section of the Russian Academy of Natural Sciences. Department of Metallurgy: Sat. scientific works]. Novokuznetsk: Izd. tsentr SibGIU, 2016, no. 37, pp. 175–180. (In Russ.).
6. Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Usol'tsev A.A., Kryukov R.E., Shishkin P.E. Calculation of electric contact welding regimes of mine tunnel haul roads rails. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov*, 2017, no. 3, p. 232–236. (In Russ.).
7. Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Kryukov R.E., Usol'tsev A.A. *Razrabotka novoi tekhnologii svarki rel'sov dlya vysokoskorostnogo dvizheniya* [Elaboration of rails welding new technology for high-speed running]. *Materialy mezhdunar. nauchno-tekhnich. konf., posvyashchennoi 130-letiyu izobreteniya N.G. Slavyanovym elektrodugovoi svarki plavyashchimsya elektrodom "Svarka i kontrol'-2018" (Perm', 18–21 sentyabrya 2018 g.)* [Materials of Intern. scientific and technical Conf., dedicated to the 130th anniversary of the invention of N.G. Slavyanov arc welding with consumable electrode "Welding and control – 2018" (Perm, September 18–21, 2018)]. Perm': izd-vo Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 2018, pp. 159–167. (In Russ.).
8. Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Kryukov R.E., Usol'tsev A.A. Elaboration of rails welding new technology for high-speed running. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 8 (1424), pp. 50–57. (In Russ.).
9. Protopopov E.V., Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Shevchenko R.A., Usol'tsev A.A. *Novaya tekhnologiya svarki zheleznodorozhnykh* [A new technology of railway rails welding]. *Sb. trudov. XV Mezhdunar. kongressa staleplavil'shchikov (g. Moskva–Tula, 15–19 oktyabrya 2018 g.)* [Sat works. XV International congress of steelmakers (Moscow – Tula, October 15–19, 2018)]. Moscow: MOO "Assotsiatsiya staleplavil'shchikov", 2018, pp. 296–300. (In Russ.).

10. Protopopov E.V., Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Kryukov R.E., Feiler S.V., Usol'tsev A.A. *Sposob kontaktnoi stykovoï svarki rel'sov* [A method of rails contact butt welding]. Patent RF no. 2641586. IPC B 23 K 11/04. *Byulleten' izobretenii*, 2018, no. 2. (In Russ.).
11. Kozyrev N.A., Usoltsev A.A., Kryukov R.E., Shevchenko R.A., Gizatulin R.A., Valueva A.V. Modern methods of rail welding. *Key engineering materials*, 2017, vol. 736, pp. 116–121.
12. Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Shishkin P.E., Kryukov R.E., Usol'tsev A.A. *Vybor optimal'nykh rezhimov elektrokontaktnoi svarki zheleznodorozhnykh rel'sov* [Selection of optimal regimes of railway rails electric contact welding]. *Innovatsii v toplivno-energeticheskom komplekse i mashinostroenii: sb. trudov Mezhdunar. nauchno-praktich. konf. 18–21 aprelya 2017 g.* [Innovations in the fuel and energy complex and engineering: cat works of the Intern. scientific and practical conf. April 18–21, 2017]. Kemerovo: KuzGTU, 2017, pp. 205–210. (In Russ.).
13. Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Usol'tsev A.A., Patrushev A.O., Shishkin P.E. Statistical model of contact rails welding process control. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*, 2017, no. 1 (19), pp. 4–8. (In Russ.).
14. Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Usol'tsev A.A., Bashchenko L.P., Knyazev S.V. Optimization of technological parameters of a rails contact butt welding process. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*, 2017, no. 1 (19), pp. 12–15. (In Russ.).
15. Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Usol'tsev A.A., Kryukov R.E., Patrushev A.O. *Sposoby polucheniya kachestvennogo svarnogo soedineniya zheleznodorozhnykh rel'sov* [Methods of obtaining quality welded joint of railway rails]. *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo: trudy XX Mezhdunar. nauchno-praktich. konf.: v 2-kh ch. Ch. 1* [Metallurgy: technology, innovation, quality: proc. of the XX International. scientific and practical Conf.: in 2 parts. Part 1]. Novokuznetsk: Izd. tsentr SibGIU, 2017, pp. 254–257. (In Russ.).
16. Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Patrushev A.O., Usol'tsev A.A. *Mnogofaktornyi regressionnyi analiz protsessa kontaktnoi svarki rel'sov na mashine K1000* [Multifactor regression analysis of a rails contact welding process at K100 machine]. *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo: trudy XX Mezhdunar. nauchno-praktich. konf.: v 2-kh ch. Ch. 1* [Metallurgy: technology, innovation, quality: proc. of the XX International. scientific and practical Conf.: in 2 parts. Part 1]. Novokuznetsk: Izd. tsentr SibGIU, 2017, pp. 264–267. (In Russ.).
17. Shevchenko R.A., Krat'ko S.N., Shishkin P.E., Kozyrev N.A., Bazaikin V.I. Optimization of technological parameters of rails contact welding process at K1000 machine by mathematical simulation methods. *Vestnik RAEN (Zapadno-Sibirskoe otd-e)*, 2017, no. 20, pp. 101–106. (In Russ.).
18. Shevchenko R.A., Bazaikin V.I., Krat'ko S.N., Kozyrev N.A., Shishkin P.E. Study of current mode of K1000 welding machine during rails welding. *Vestnik RAEN (Zapadno-Sibirskoe otd-e)*, 2017, no. 20, pp. 106–111. (In Russ.).
19. Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Patrushev A.O., Krat'ko S.N., Shishkin P.E. Determination of optimal modes of K1000 rail-welding machine operation. *Vestnik RAEN (Zapadno-Sibirskoe otd-e)*, 2017, no. 20, pp. 118–126. (In Russ.).
20. Protopopov E.V., Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Usol'tsev A.A., Kryukov R.E. Perfection of railway rails welding technology. *Vestnik RAEN (Zapadno-Sibirskoe otd-e)*, 2018, no. 21, pp. 123–128. (In Russ.).
21. Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Kutsenko A.I., Usol'tsev A.A., Kutsenko A.A. Method of researching the influence of isothermic annealing modes on welding of hauling track rails used in mine workings. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 206, pp. 1–5 (012031). doi: 10.1088/1755-1315/206/1/012031/.
22. Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Patrushev A.O., Usol'tsev A.A. Multi-factor regression analysis of the process of rails contact welding on K1000 machine. *Metallurgy2017. IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 411, pp. 1–5 (012088). doi: 10.1088/1757-899X/411/1/012088.
23. Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Usol'tsev A.A., Kryukov R.E. *Sovershenstvovanie tekhnologii elektrokontaktnoi svarki i termoobrabotki zheleznodorozhnykh rel'sov* [Perfection of a technology of electric contact welding and heat treatment of railway rails]. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektiï Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii: Sb. nauchn. tr.* [Bulletin of the mining and metallurgical section of the Russian Academy of Natural Sciences. Department of Metallurgy: Sat. scientific works]. Novokuznetsk: Izd. tsentr SibGIU, 2018, no. 40, pp. 63–68. (In Russ.).
24. Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Patrushev A.O., Krat'ko S.N., Kryukov R.E. *Poisk optimal'nykh tekhnologicheskikh parametrov rezhima raboty rel'sosvarochnoi mashiny K1100* [Search of optimal technological operating parameters of K1100 rail-welding machine]. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektiï Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii: Sb. nauchn. tr.* [Bulletin of the mining and metallurgical section of the Russian Academy of Natural Sciences. Department of Metallurgy: Sat. scientific works]. Novokuznetsk: Izd. tsentr SibGIU, 2017, no. 38, pp. 70–76. (In Russ.).
25. Shevchenko R.A., Krat'ko S.N., Shishkin P.E., Kozyrev N.A., Bazaikin V.I. *Primenenie metodov matematicheskogo modelirovaniya dlya optimizatsii tekhnologicheskikh parametrov protsessa kontaktnoi svarki rel'sov na mashine K1100* [Application of mathematical simulation methods for optimization technological parameters of rail contact welding process at K1100 machine]. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektiï Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii: Sb. nauchn. tr.* [Bulletin of the mining and metallurgical section of the Russian Academy of Natural Sciences. Department of Metallurgy: Sat. scientific works]. Novokuznetsk: Izd. tsentr SibGIU, 2017, no. 38, pp. 76–81. (In Russ.).
26. Shevchenko R.A., Bazaikin V.I., Krat'ko S.N., Kozyrev N.A., Patrushev A.O. *Analiz tokovogo rezhima raboty svarochnoi mashiny K1100 pri svarke rel'sov na etape oplavleniya* [Analysis of current mode of K1100 welding machine operation during rails welding at the fusion stage]. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektiï Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii: Sb. nauchn. tr.* [Bulletin of the mining and metallurgical section of the Russian Academy of Natural Sciences. Department of Metallurgy: Sat. scientific works]. Novokuznetsk: Izd. tsentr SibGIU, 2017, no. 38, pp. 81–87. (In Russ.).
27. Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Patrushev A.O., Usol'tsev A.A. *Vybor optimal'nykh rezhimov svarki zheleznodorozhnykh rel'sov* [Selection of optimal modes of railway rails welding]. *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo: trudy XX Mezhdunar. nauchno-praktich. konf.: v 2-kh ch. Ch. 1* [Metallurgy: technology, innovation, quality: proc. of the XX International. scientific and practical Conf.: in 2 parts. Part 1]. Novokuznetsk: Izd. tsentr SibGIU, 2017, pp. 332–336. (In Russ.).
28. 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.).

29. Kozyrev N.A., Kozyreva O.A., Usol'tsev A.A., Kryukov R.E., Shevchenko R.A. Modern Methods of Rail Welding. *International Scientific-Practical Conference: Innovations in Fuel and Energy Complex and Mechanical Engineering (FEC-2017) 18–21 April 2017, Kemerovo, Russian Federation IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 253, pp. 1–6. doi: 10.1088/1757-899X/253/1/012002.
30. Usol'tsev A.A., Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Kriukov R.E., Shishkin P.E. Analysis of rail welding methods for mine rail access with the use of modern technologies. *International Scientific and Research Conference on Knowledge-based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources (KTDUMUR2017), 6–9 June 2017, Novokuznetsk, Russian Federation*, 2017, vol. 84, pp. 1–7. doi: 10.1088/1755-1315/84/1/012025.
31. Kozyrev N.A., Usol'tsev A.A., Kryukov R.E., Shevchenko R.A., Shishkin P.E. *Sovremennye metody polucheniya besстыkovykh rel'sov* [Modern methods of butt-less rails obtaining]. *Innovatsii v toplivno-energeticheskom komplekse i mashinostroenii: sbornik trudov Mezhdunar. nauchno-praktich. konf. 18–21 aprelya 2017 g.* [Innovations in the fuel and energy complex and engineering: cat works of the Intern. scientific and practical conf. April 18–21, 2017]. Kemerovo: KuzGTU, 2017, pp. 123–127. (In Russ.).
32. Kozyrev N.A., Usol'tsev A.A., Shevchenko R.A., Kryukov R.E., Shishkin P.E. *Sovremennye sposoby svarki rel'sov* [Modern methods of rails welding]. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi seksii Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii: Sb. nauchn. tr.* [Bulletin of the mining and metallurgical section of the Russian Academy of Natural Sciences. Department of Metallurgy: Sat. scientific works]. Novokuznetsk: Izd. tsentr SibGIU, 2016, no. 37, pp. 166–174. (In Russ.).

Received 15 January 2019