

УДК 625.143.48

**РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СВАРКИ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО ТЕРМОУПРОЧНЕННЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ\****Козырев Н.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой материаловедения, литейного и сварочного производства (kozyrev\_na@mtsp.sibsiu.ru)**Шевченко Р.А., ассистент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства (shefn1200@mail.ru)**Усольцев А.А., к.т.н., доцент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства (a.us\_@ Rambler.ru)**Прудников А.Н., д.т.н., профессор кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства (a.prudnikov@mail.ru)***Сибирский государственный индустриальный университет**  
(654007, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

**Аннотация.** В лабораторных условиях на образцах рельсовой стали изучено влияние режимов сварки с последующей изотермической выдержкой на качественные показатели сварного стыка. Сварку образцов осуществляли путем пропускания импульсов переменного электрического тока после сварки. Сварку проводили на машине для контактной стыковой сварки МС-2008М с внесением ряда изменений в управляющие воздействия. Для измерения температуры металла в зоне термического влияния (ЗТВ) использовали хромель-алюмелевые термопары. Сбор и обработку данных от термопар осуществляли с помощью измерительного комплекса «Tempol». Температуру металла сварного шва (где нет возможности установить термопару) измеряли с помощью тепловизора HotFind-D. Представлены результаты эксперимента и физико-механические свойства образцов: твердость НВ, протяженность ЗТВ, предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение, относительное сужение, наличие неметаллических включений в металле шва. Проведен расчет отклонений твердости (понижение-повышение, суммарное отклонение) на поверхности сварного соединения образцов относительно требований, установленных ГОСТ Р 51685 – 2013. Предложен способ контактной стыковой сварки, который позволяет получать сварное соединение изделий из рельсовой стали с равномерным распределением твердости и малой зоной термического влияния. Определена зависимость микротвердости от объемной доли структурных составляющих. Построены модели влияния параметров импульсного контактного послесварочного подогрева на понижение твердости металла сварного соединения относительно твердости основного металла и на протяженность зоны термического влияния. Предлагаемый способ позволяет регулировать структуру металла сварного соединения рельсов, не прибегая к дополнительной локальной термической обработке.

**Ключевые слова:** рельсы, контактная сварка, термическая обработка, ток, импульс, режим сварки, твердость, зона термического влияния.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-504-511

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящей работе в лабораторных условиях проведены исследования по изучению влияния режимов сварки с последующей изотермической выдержкой образцов из рельсовой стали, проводимой путем пропускания импульсов переменного электрического тока после сварки, на качественные показатели сварного стыка.

**ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Сварку образцов проводили на машине для контактной стыковой сварки МС-2008 с внесением ряда изме-

нений в управляющие воздействия (рис. 1) [1]. Модернизированная машина для контактной стыковой сварки оплавлением содержит: корпус 1; установленные на корпусе подвижный 2 и неподвижный 3 зажимы, которые соединены с устройствами зажатия свариваемых деталей 4 (на схеме не показано) и закреплены на основаниях зажимов; механический привод оплавления и осадки 5, соединенный с подвижным зажимом 2; систему охлаждения 6; сварочный трансформатор 7; переключатель 8 ступеней напряжения сварочного трансформатора 7; релейную панель 9; пульт управления (на схеме не показан); блок концевых выключателей 10; контактор включения сварочного тока 11; электродвигатель 12 привода оплавления и осадки, который через концевой выключатель, предназначенный для подачи сигнала на контроллер 13 о начале этапа термообработки и расположенный в блоке концевых выключателей 10, соединен с контроллером 13. Контроллер 13

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-48-420003 р\_а «Развитие физико-химических и технологических основ создания принципиально нового способа сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов».

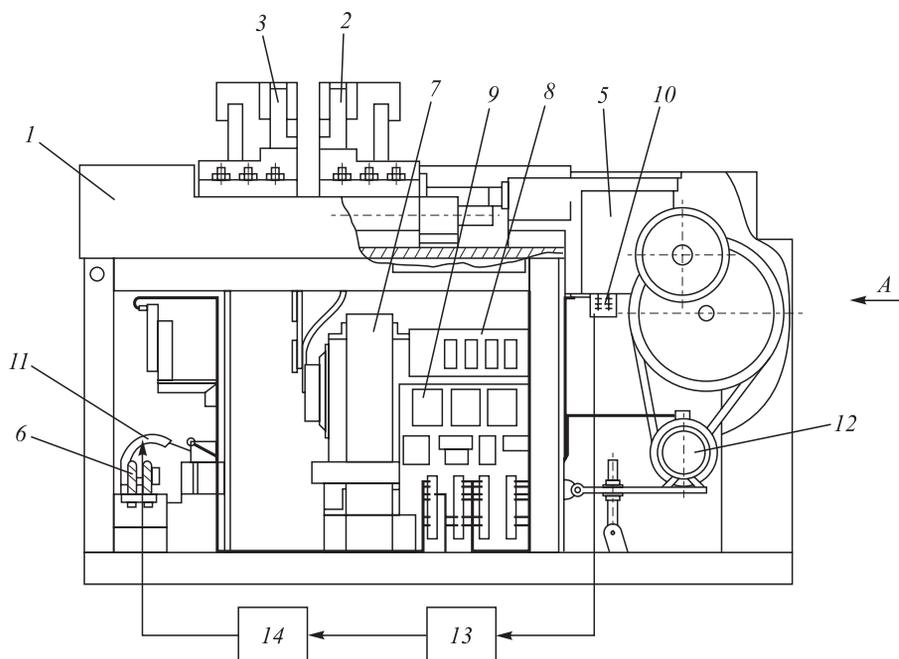


Рис. 1. Схема модернизированной машины МС-2008 для контактной стыковой сварки

Fig. 1. Scheme of upgraded MS-2008 unit for flash-butt welding

соединен со сварочным трансформатором 7 с помощью симистора 14. При помощи контактного реле (на схеме не показано), установленного на релейной панели 9, симистор 14 соединен с контактором включения сварочного тока 11.

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для получения информации о термическом влиянии на структуру металла разработана методика измерения температур в зоне термического влияния (ЗТВ) во время сварки. При этом проводили измерение силы сварочного тока и температуры образцов с целью дальнейшей корректировки режимов. Схема взаимодействия используемого оборудования приведена на рис. 2. Для измерения температуры металла в ЗТВ использовали хромель-алюмелевые термопары. Сбор и обработку данных, полученных от термопар, проводили с помощью измерительного комплекса «Tempol». Температуру металла сварного шва, где нет возможности установить термопару, измеряли с помощью тепловизора HotFind-D.

Для построения математических моделей влияния параметров импульсного контактного послесварочного подогрева на понижение твердости металла сварного соединения относительно твердости основного металла и модели влияния параметров импульсного контактного послесварочного подогрева на протяженность зоны термического влияния использовали планируемый эксперимент, позволяющий построить качественные математические модели и сократить количество экспериментов. Исследование проведено

с использованием полного факторного эксперимента  $N = 2 \cdot 3^k$  [2]. Исследуемыми параметрами управляемого охлаждения являются:  $X_1$  – 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). Математическую обработку экспериментальных данных проводили по известным методикам, изложенным в работах [3 – 7].

Вырезку образцов размером  $90 \times 30 \times 10$  мм с известным химическим составом осуществляли из головки рельсового профиля. После сварки на модернизированной машине МС-2008 при различных режимах согласно исследуемой матрицы проводили снятие грата и изме-



Рис. 2. Блок-схема взаимодействия оборудования

Fig. 2. Block diagram of equipment interaction

рение твердости с помощью твердомера УЗИТ-3. Далее каждый образец разрезали перпендикулярно сварному шву на два электроэрозионным способом на электроэрозионном 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 готовили для металлографического анализа на неметаллические включения и микроструктуру сварного соединения. Исследования проводили с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 в светлом поле при диапазоне увеличений 100 – 1000 крат после травления в спиртовом растворе азотной кислоты. Микротвердость измеряли с помощью микротвердомера HVS-1000.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В табл. 1 представлены результаты эксперимента и полученные физико-механические свойства образцов (твердость HB, протяженность ЗТВ, мм; предел текучести  $\sigma_T$ , Н/мм<sup>2</sup>; временное сопротивление  $\sigma_B$ , Н/мм<sup>2</sup>; относительное удлинение  $\delta_5$ , %; относительное сужение  $\psi$ , %; наличие неметаллических включений в металле шва). Проведен расчет отклонений твердости на поверхности сварного соединения образцов относительно требований, установленных ГОСТ Р 51685 – 2013: понижение твердости  $\Delta_{\min} = \left( \frac{350HB - HB_{\min}}{350HB} \right) \cdot 100$  % и повышение твердости  $\Delta_{\max} = \left( \frac{HB_{\max} - 350HB}{350HB} \right) \cdot 100$  %, суммарное отклонение твердости  $\Delta = \Delta_{\min} + \Delta_{\max}$ , %.

Во всех сварных соединениях наблюдаются характерные зоны [8 – 19]. Изучение макроструктуры сварных соединений лабораторных образцов (химический состав приведен в работе [20]) выявило наличие не-

скольких зон, образованных в результате действия тепла сварки и кратковременного подогрева, используемого для управляемого охлаждения. Выделяются четыре участка с различными структурами металла.

1 – шов. Микроструктура представляет крупнозернистый сорбитообразный перлит. Образование закалочных структур практически на всех образцах отсутствует, даже при скорости охлаждения, при которой характерно образование мартенсита для таких сталей. Это обусловлено снижением содержания углерода в металле сварного шва, в момент оплавления при взаимодействии жидкого металла с атмосферой происходит его окисление.

2 – участок неполного расплавления. Структура образцов 2 – 4, 9 состоит из крупнозернистого сорбитообразного перлита. При исследовании образцов 1, 6, 8 отмечено наличие крупнозернистой структуры (2 – 3 номер шкалы ГОСТ 5639 – 82) с преобладанием мартенситной составляющей, характерной для перегретого металла. В образцах 5, 7 преобладает структура крупнозернистого сорбитообразного перлита и небольшие участки мартенсита размером от 20 до 80 мкм.

3 – участок нормализации. В процессе нагрева протекает фазовое превращение перлита в аустенит и его гомогенизация. Структура образцов 1 – 7, 9 представляет собой мелкодисперсный перлит. В образце 8 практически отсутствует такой участок вследствие высокой скорости охлаждения, не соответствующей скоростям охлаждения при нормализации.

4 – участок сфероидизации перлита. В процессе нагрева протекает фазовое превращение перлита в аустенит, но вследствие недостаточной температуры и малого времени гомогенизации аустенита не происходит. При последующем охлаждении происходит коагуляция цементита на участках оставшегося нерастворенного карбида и укрупнение зерен цементита – сфероидизация.

Т а б л и ц а 1

### Результаты эксперимента

Table 1. Experiment results

Образец	HB <sub>min</sub>	HB <sub>max</sub>	$\Delta_{\min}$ , %	$\Delta_{\max}$ , %	$\Delta$ , %	Протяженность ЗТВ, мм	$\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	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	19,10	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	+

Во всех образцах присутствует такой участок, однако размеры различны в зависимости от режима управляемого охлаждения.

На рис. 3 показано распределение твердости и неметаллических включений в образце 1.

На рис. 4 для образца 1 приведено распределение микротвердости и объемной доли структурных составляющих. При увеличении объемной доли зернистого перлита происходит снижение микротвердости. При увеличении количества закалочных структур происхо-

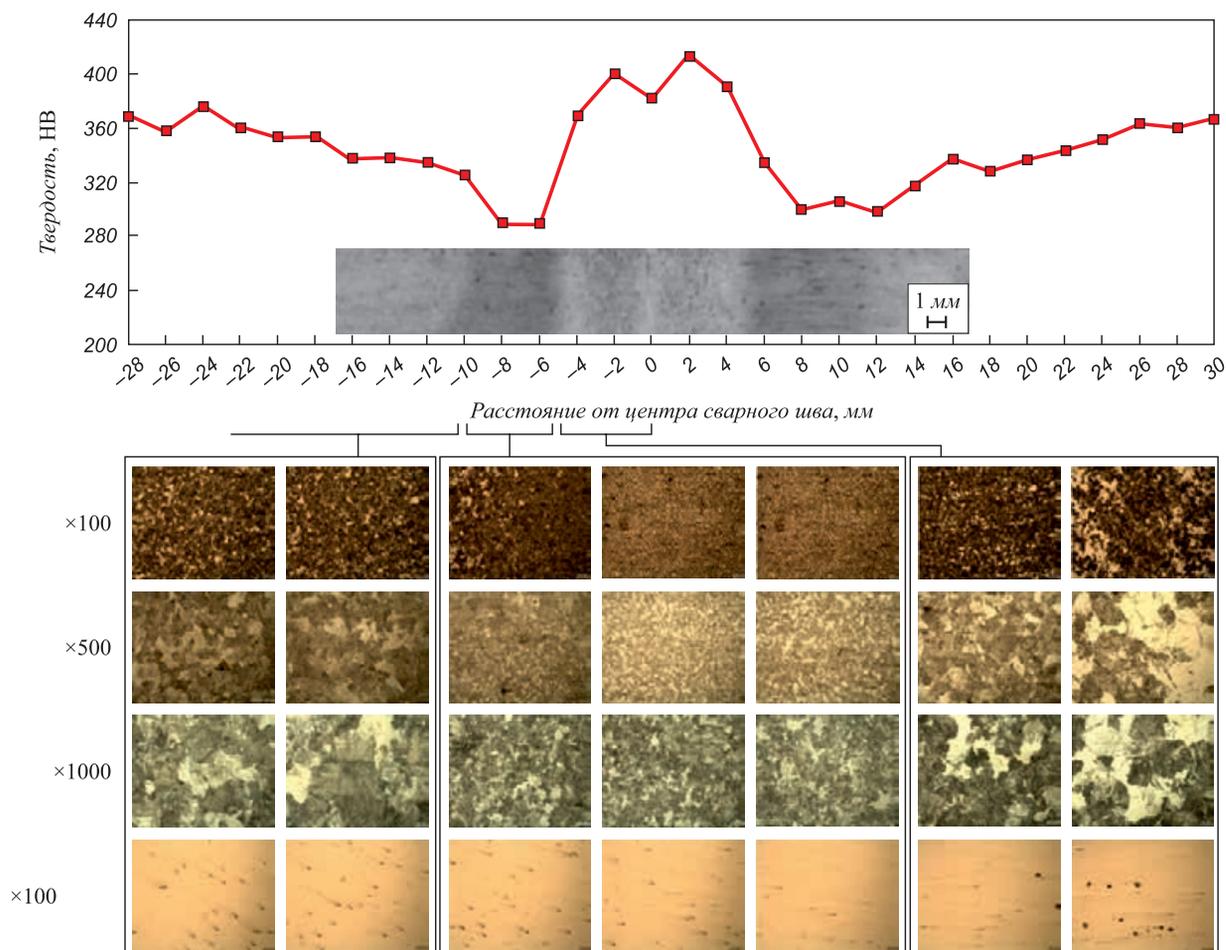


Рис. 3. Распределение твердости, неметаллических включений и структуры в сварном соединении образца 1

Fig. 3. Distribution of hardness, non-metallic inclusions and structure in welded joint of the sample 1

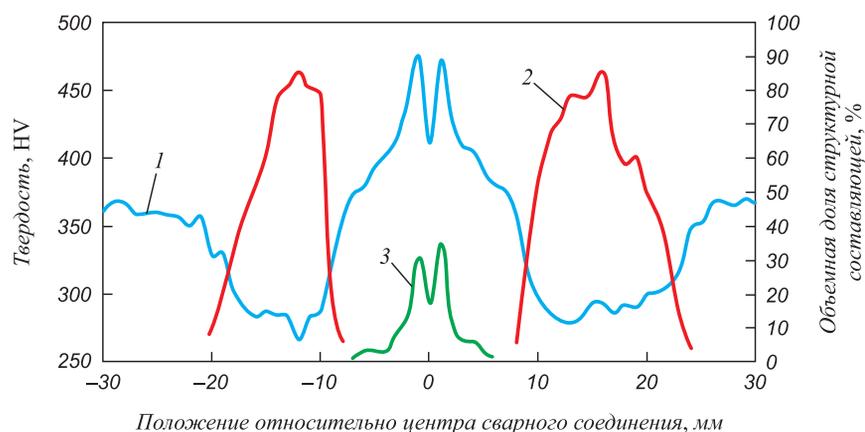


Рис. 4. Распределение микротвердости и объемной доли структурных составляющих в сварном соединении образца 1: 1 – микротвердость; 2 – объемная доля зернистого перлита; 3 – объемная доля мартенсита

Fig. 4. Distribution of microhardness and volume fraction of structural components in welded joint of the sample 1: 1 – microhardness; 2 – volume fraction of granular perlite; 3 – volume fraction of martensite

дит увеличение твердости. На рис. 5 приведено сравнение значений размеров участка сфероидизации (зернистого) перлита, полученных с помощью известных значений мгновенного распределения температурных полей в зоне термического влияния и критических точек  $A_{c_m}$  и  $A_{c_1}$ , и фактической объемной доли зернистого перлита. Корреляция  $R$  изменения размера таких участков, полученных разными способами, составляет 0,98. При этом значения размеров, полученные расчетным путем, отличаются от фактических. Это связано с тем, что значения  $A_{c_m}$  и  $A_{c_1}$  критических точек, полученные с помощью термодинамического моделирования, определяются для сплава в отожженном состоянии, что отличается от условий процесса сварки. Тем не менее, критические точки достаточно хорошо прогнозируются расчетами.

Влияние параметров импульсного контактного послесварочного подогрева на понижение твердости ме-

талла сварного соединения относительно твердости основного металла (рис. 6, а) выражается зависимостью:

$$HB_{\min} = 284 + 2,00X_1 - 67,50X_2 - 1,37X_3 + 5,17X_4;$$

$$R^2 = 0,44.$$

В табл. 2 представлен анализ адекватности полученной регрессионной модели.

Влияние параметров импульсного контактного послесварочного подогрева на протяженность  $L$  зоны термического влияния (рис. 6, б) выражается зависимостью:

$$L = -5,7 + 0,17X_1 + 37,92X_2 - 0,43X_3 + 2,33X_4;$$

$$R^2 = 0,98.$$

В табл. 3 представлен анализ адекватности полученной регрессионной модели.

### Выводы

В лабораторных условиях опробован способ контактной стыковой сварки, позволяющий получать сварное соединение изделий из рельсовой стали с равномерным распределением твердости и малой зоной термического влияния. Определена зависимость микротвердости от объемной доли структурных составляющих. При увеличении объемной доли зернистого перлита происходит снижение микротвердости. При увеличении количества закалочных структур происходит увеличение твердости. Построены модели влияния параметров импульсного контактного послесварочного подогрева на твердость металла сварного соединения относительно твердости основного металла и модель влияния параметров импульсного контактного послесварочного подогрева на протяженность зоны термического влияния. Предлагае-

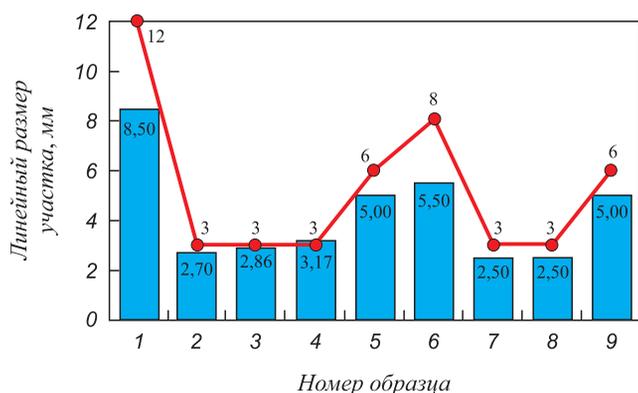


Рис. 5. Сравнение расчетных (■) и фактических (—) размеров участков сфероидизации перлита

Fig. 5. Comparison of calculated (■) and actual (—) sizes of perlite spheroidization sites

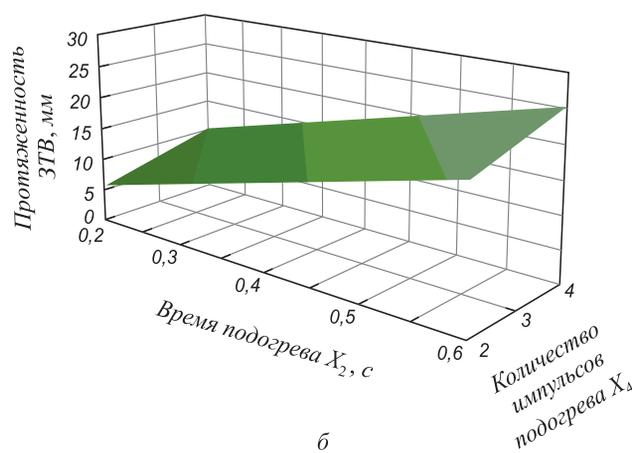
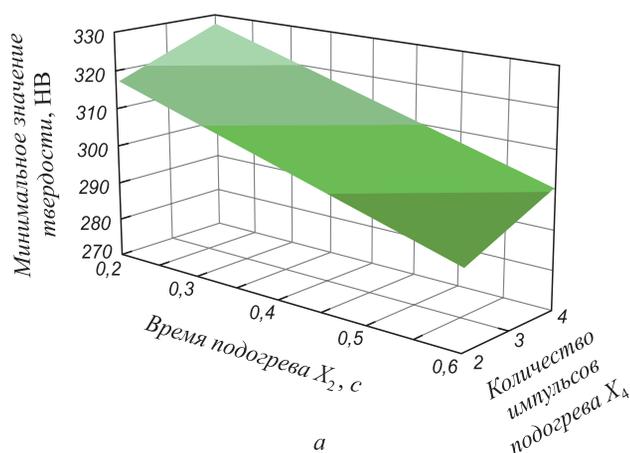


Рис. 6. Зависимость минимальной твердости металла сварного соединения (а) и протяженности ЗТВ (б) от времени подогрева  $X_2$  и количества импульсов подогрев  $X_4$  при  $X_1 = 25$  с и  $X_3 = 10$  с

Fig. 6. Dependence of the minimum hardness of welded metal (а) and HAZ length (б) on heating time  $X_2$  and the number of heating pulses  $X_4$  at  $X_1 = 25$  s and  $X_3 = 10$  s

**Анализ адекватности регрессионной модели влияния параметров импульсного контактного послесварочного подогрева на понижение твердости металла сварного соединения**

*Table 2. Adequacy analysis of the regression model of influence of pulse contact post-welding heating on the decrease in hardness of the welded joint metal*

Показатель	Значение показателя			
	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
Коэффициент регрессии				
Значения коэффициентов регрессии	2,00	-67,50	-1,37	5,17
Критерий Стьюдента ( $t_\phi$ )	0,60	1,41	0,71	0,53
Табличное значение критерия Стьюдента ( $t_{\text{табл}}$ )	2,776			
Стандартная ошибка коэффициента регрессии ( $Sb_i$ )	3,32	47,85	1,91	9,57
Остаточная дисперсия ( $S_e^2$ )	71,69			
Остаточное стандартное отклонение ( $S_e$ )	8,47			
Средний квадрат отклонений модели от среднего ( $S_r^2$ )	983			
Критерий значимости регрессии (критерий Фишера $F_\phi$ )	13,71			
Табличное значение критерия Фишера ( $F_{\text{табл}}$ при $\alpha = 0,05$ )	6,36			

**Анализ адекватности регрессионной модели влияния параметров импульсного контактного послесварочного подогрева на протяженность зоны термического влияния**

*Table 3. Adequacy analysis of regression model of the influence of pulse contact post-welding heating on the length of thermal influence zone*

Показатель	Значение показателя			
	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
Коэффициент регрессии				
Значения коэффициентов регрессии	0,17	37,92	-0,43	2,33
Критерий Стьюдента ( $t_\phi$ )	1	1,16	0,48	0,42
Табличное значение критерия Стьюдента ( $t_{\text{табл}}$ )	2,776			
Стандартная ошибка коэффициента регрессии ( $Sb_i$ )	0,17	2,42	0,10	0,48
Остаточная дисперсия ( $S_e^2$ )	1,41			
Остаточное стандартное отклонение ( $S_e$ )	1,79			
Средний квадрат отклонений модели от среднего ( $S_r^2$ )	103,22			
Критерий значимости регрессии (критерий Фишера $F_\phi$ )	73,40			
Табличное значение критерия Фишера ( $F_{\text{табл}}$ )	6,39			

мый способ позволяет проводить регулирование структуры сварного соединения рельсов без дополнительной локальной термической обработки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2683668 РФ, МПК В23 11/04. Машина для контактной стыковой сварки / Протопопов Е.В., Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Кратко С.Н., Хомичева В.Е. // Заявл. 25.12.2017; опубл. 01.04.2019. Бюл. № 10.
2. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
3. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 2003. – 479 с.
4. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. – М.: Высшая школа, 1979. – 400 с.
5. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 1999. – 576 с.
6. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 464 с.
7. Костин В.Н., Тишина Н.А. Статистические методы и модели: учеб. пособие. – Оренбург: изд. ОГУ, 2004. – 138 с.
8. Myers J., Geiger G.H., Poirier D.R. Structure and properties of thermite welds in rails // Welding Journal. 1982. Vol. 61. No. 8. P. 258 – 268.
9. Теория сварочных процессов: учеб. для вузов по спец. «Оборудование и технология сварочного производства» / В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др.; под ред. В.В. Фролова. – М.: Высшая школа, 1988. – 559 с.
10. Теория сварочных процессов: учеб. изд. / В.М. Неровный, А.В. Коновалов, Б.Ф. Якушин и др.; под ред. В.М. Неровного. – М.: МГТУ им. Баумана, 2016. – 702 с.

11. Weingrill L., Krutzler J., Enzinger N. Temperature field evolution during flash-butt welding of railway rails // *Materials Science Forum*. 2017. Vol. 879. P. 2088 – 2093.
12. 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. No. 7. P. 510 – 520.
13. Mitsuru F., Hiroaki N., Kiyoshi N. Rail flash-butt welding technology // *JFE Technical Report*. 2015. No. 20. P. 159 – 163.
14. 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. P. 84 – 92.
15. Dahl B., Mogard B., Grefot B., Ulander B. Repair of rails on-site by welding // *Svetsaren*. 1995. Vol. 50. No. 2. P. 10 – 14.
16. Takimoto T. Latest welding technology for long rail and its reliability // *Tetsu-to-Hagane*. 1984. Vol. 70. No. 10. P. 40 – 45.
17. Tachikawa H., Uneta T., Nishimoto H. Steel welding technologies for civil construction applications // *Nippon Steel Technical Report*. 2000. Vol. 82. No. 7. P. 35 – 41.
18. Okumura M., Karimine K., Uchino K., Yurioka N. Development of field fusion welding technology for rail-roadrails // *Nippon Steel Technical Report*. 1995. Vol. 65. No. 4. P. 41 – 49.
19. Altemühl B. Welding tramway rails in Bucharest // *Svetsaren*. 2002. Vol. 52. No. 2. P. 32 – 35.
20. Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Прудников А.Н., Башенко Л.П. Разработка и моделирование технологического процесса сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов. Моделирование процессов, протекающих при сварке и локальной термической обработке // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2020. Т. 63. № 2. С. 93 – 101.

Поступила в редакцию 24 декабря 2019 г.

После доработки 24 января 2020 г.

Принята к публикации 31 января 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 7, pp. 504–511.

## WELDING OF DIFFERENTIALLY HEAT-STRENGTHENED RAILS. LABORATORY STUDIES

*N.A. Kozыrev, R.A. Shevchenko, A.A. Usol'tsev, A.N. Prudnikov*

**Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, Russia**

**Abstract.** In laboratory conditions, influence of modes of welding with subsequent isothermal holding on quality parameters of welded joint was studied on rail steel samples. Samples were welded with pulses of alternating electric current after welding. Welding was carried out on MS-2008M resistance butt welding machine with a number of alterations of control actions. To measure temperature of the metal in heat affected zone (HAZ), chromel-alumel thermocouples were used. Collection and processing of data from thermocouples was carried out using TEMPOL measuring complex. Temperature of the weld (where it is not possible to install a thermocouple) was measured using HotFind-D thermal imager. Experimental results and physico-mechanical properties of the samples are presented: HB hardness, HAZ length, yield strength, tensile strength, ultimate elongation, contraction ratio, and presence of non-metallic inclusions in weld metal. Deviations of hardness were calculated in comparison with the requirements established by GOST R 51685 – 2013 state standard on the surface of samples' welded joints: decrease-increase and total deviation of hardness. Method of resistant butt welding is proposed, which makes it possible to obtain welded joint of items produced of rail steel with a uniform distribution of hardness and small zone of thermal influence. Dependence of microhardness on volume fraction of structural components was determined. Models of impact of pulsed contact post-welding heating parameters on lowering hardness of weld metal compared to the base metal and on the extent of heat-affected zone were constructed. The proposed method allows us to adjust structure of metal welded joints of rails without additional local heat treatment.

**Keywords:** rails, resistance welding, heat treatment, current, impulse, welding mode, hardness, heat affected zone.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2020-7-504-511

### REFERENCES

1. Protopopov E.V., Kozыrev N.A., Shevchenko R.A., Krat'ko S.N., Khomicheva V.E. *Mashina dlya kontaktnoi stykovoi svarki* [Unit for resistance butt welding]. Patent RF no. 2683668 RF, MPK B23 11/04. *Byulleten' izobretenii*. 2019, no. 10. (In Russ.).
2. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskii Yu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovii* [Planning an experiment to find optimal conditions]. Moscow: Nauka, 1976, 279 p. (In Russ.).
3. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika* [Theory of probability and mathematical statistics]. Moscow: Vysshaya shkola, 2003, 479 p. (In Russ.).
4. Gmurman V.E. *Rukovodstvo k resheniyu zadach po teorii veroyatnostei i matematicheskoi statistike* [Manual to solving problems in probability theory and mathematical statistics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1979, 400 p. (In Russ.).
5. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostei* [Probability theory]. Moscow: Vysshaya shkola, 1999, 576 p. (In Russ.).
6. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya veroyatnostei i ee inzhenernye prilozheniya* [Probability theory and its engineering applications]. Moscow: Akademiya, 2003, 464 p. (In Russ.).
7. Kostin V.N., Tishina N.A. *Statisticheskie metody i modeli: ucheb. posobie* [Statistical methods and models: Manual]. Orenburg: izd. OGU, 2004, 138 p. (In Russ.).
8. Myers J., Geiger G.H., Poirier D.R. Structure and properties of thermite welds in rails. *Welding Journal*. 1982, vol. 61, no. 8, pp. 258–268.
9. Volchenko V.N., Yampol'skii V.M., Vinokurov V.A. etc. *Teoriya svarochnykh protsessov: ucheb. dlya vuzov po spets. "Oborudovanie i tekhnologiya svarochnogo proizvodstva"* [Theory of welding processes: University textbook for students majoring in welding equipment and technology]. Frolov V.V. ed. Moscow: Vysshaya shkola, 1988, 559 p. (In Russ.).
10. Nerovnyi V.M., Kononov A.V., Yakushin B.F. etc. *Teoriya svarochnykh protsessov: ucheb. izd.* [Theory of welding processes: Textbook]. Nerovnyi V.M. ed. Moscow: MGTU im. Bauman, 2016, 702 p. (In Russ.).
11. Weingrill L., Krutzler J., Enzinger N. Temperature field evolution during flash-butt welding of railway rails. *Materials Science Forum*. 2017, vol. 879, pp. 2088–2093.
12. 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, no. 7, pp. 510–520.
13. Mitsuru F., Hiroaki N., Kiyoshi N. Rail flash-butt welding technology. *JFE Technical Report*. 2015, no. 20, pp. 159–163.
14. 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.
15. Dahl B., Mogard B., Gretoft B., Ulander B. Repair of rails on-site by welding. *Svetsaren*. 1995, vol. 50, no. 2, pp. 10–14.
  16. Takimoto T. Latest welding technology for long rail and its reliability. *Tetsu-to-Hagane*. 1984, vol. 70, no. 10, pp. 40–45.
  17. Tachikawa H., Uneta T., Nishimoto H. Steel welding technologies for civil construction applications. *Nippon Steel Technical Report*. 2000, vol. 82, no. 7, pp. 35–41.
  18. Okumura M., Karimine K., Uchino K., Yurioka N. Development of field fusion welding technology for rail-roadrails. *Nippon Steel Technical Report*. 1995, vol. 65, no. 4, pp. 41–49.
  19. Altemühl B. Welding tramway rails in Bucharest. *Svetsaren*. 2002, vol. 52, no. 2, pp. 32–35.
  20. Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Usol'tsev A.A., Prudnikov A.N., Bashchenko L.P. Welding of differentially heat-strengthened rails. Modeling of processes during welding and local thermal processing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 2, pp. 93–101. (In Russ.).

**Funding.** The work was financially supported by the RFBR and the Kemerovo Region in the framework of scientific project No. 20-48-420003 p\_a “Physicochemical and technological fundamentals of development of essentially new method of welding of differentially heat-strengthened rails”.

**Information about the authors:**

**N.A. Kozyrev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Materials, Foundry and Welding Production”

(kozyrev\_na@mtsp.sibsiu.ru)

**R.A. Shevchenko**, Assistant of the Chair “Materials, Foundry and Welding Production” (shefn1200@mail.ru)

**A.A. Usol'tsev**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Materials, Foundry and Welding Production” (a.us\_@rambler.ru)

**A.N. Prudnikov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Materials, Foundry and Welding Production” (a.prudnikov@mail.ru)

Received December 24, 2019

Revised January 24, 2020

Accepted January 31, 2020