

УДК 625.143.48

*Е.В. Полевой¹, Р.А. Шевченко², Н.А. Козырев², Д.Ю. Кушев¹, А.М. Юнусов¹*¹АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»²Сибирский государственный индустриальный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ СВАРКЕ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ

Качество сварных швов рельсового металла зависит от многих факторов [1 – 19]. Проведенные исследования [20, 21] 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 показали, что у полученных сварных стыков наблюдаются низкие пластические свойства вне зависимости от наличия закалочных структур в металле шва и зоне термического влияния (ЗТВ). Наиболее вероятно, что снижение пластических свойств металла шва в данном случае происходит по причине несплошностей металла сварного соединения.

Контактную стыковую сварку оплавлением рельсов выполняли на воздухе, при этом роль защитных газов играют интенсивно выделяющиеся пары оксидов и свариваемого металла, образующиеся в стыке. В результате недостаточного газообразования возможно возникновение неметаллических включений, которые впоследствии должны в идеале выдавливаться в грат при осадке и удаляться вместе с графом. При несоблюдении режимов сварки возможно образование неметаллических включений в металле шва.

По данным работы [22] образование неметаллических включений в металле шва возможно при присутствии их в свариваемом рельсовом металле, причем в сталях, загрязненных примесями, вероятность образования дефектов по линии сварки выше, чем в чистых сталях. Это обусловлено тем, что в слое жидкого металла на поверхности торцов происходит сегрегация примесей основного металла. Ввиду неравномерного выдавливания жидкого металла в процессе деформации торцов на отдельных участках, например в наиболее глубоких кратерах, происходит скопление жидкого металла и соответственно примесей. Такие участки имеют пониженные механические свойства. Кроме того, в

ряде случаев наблюдаемые в изломах по линии сварки неметаллические включения, принимаемые обычно за дефекты сварки, являются в действительности пороками основного металла.

В настоящей работе проведено исследование неметаллических включений, образующихся при электроконтактной сварке рельсовой стали. Для сварки в лабораторных условиях производили вырезку образцов 90 × 30 × 10 мм из головки рельсов стали марки Э76ХФ. В дальнейшем осуществляли контактную стыковую сварку на машине МС-2008. Далее образцы разрезали перпендикулярно сварному шву на две части электроэрозионным способом на электроэрозионном проволочно-вырезном станке с ЧПУ струйного типа ДК7732 М11. Одна часть образца использовалась для испытания на растяжение, вторая готовилась для проведения металлографического анализа на неметаллические включения и изучения структуры сварного соединения. Макроструктуру сварных стыков изучали после фрезерования и глубокого травления в 50 %-ном водном растворе соляной кислоты. Микроструктуру исследовали с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-71 в светлом поле при диапазоне увеличений в 100 – 1000 крат после травления в спиртовом растворе азотной кислоты. Химический состав всех выявленных включений определяли на сканирующем электронном микроскопе MIRA 3.

Макроструктура металла сварных стыков представлена на рис. 1. На макротемплетах сварных стыков в средней части наблюдается сварной шов в виде светлой полосы и зоны термического влияния по обе стороны от него. В зоне сварного соединения выявлены шлаковые включения в виде темнотравящихся полосок и точек (показано стрелками).

При просмотре нетравленных шлифов в зоне шва образцов выявлены однотипные, расположенные в вертикальном направлении светлые неметаллические включения силикатного характера шириной до 35 мкм (рис. 1, а, б).

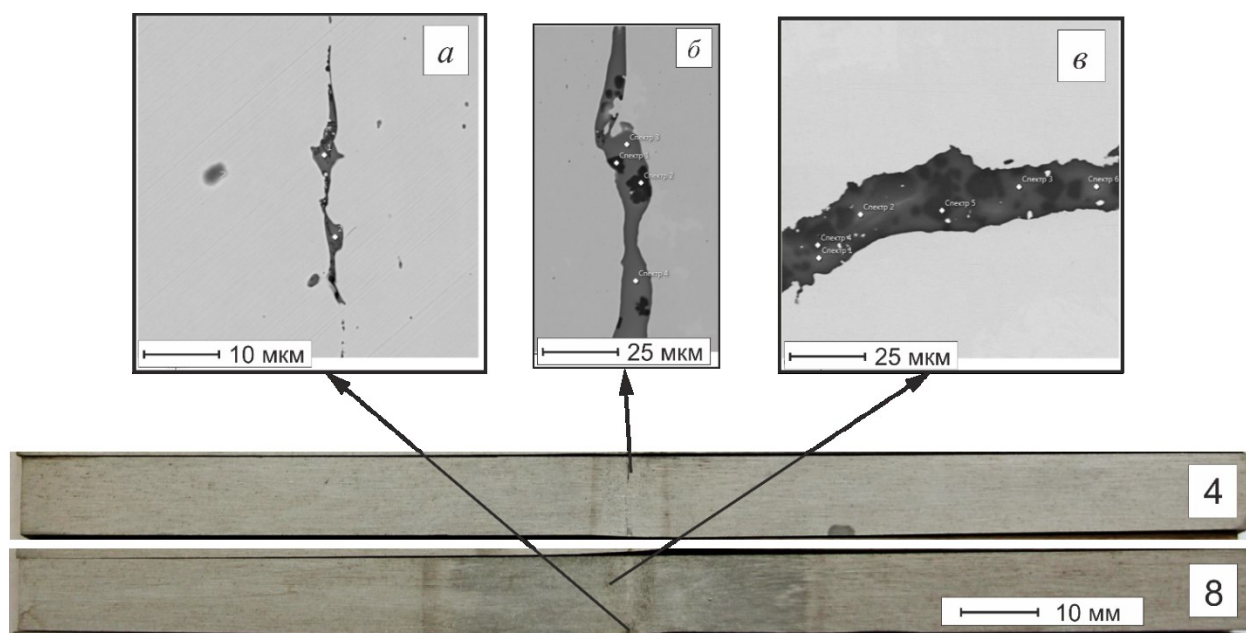


Рис. 1. Неметаллические включения образцов 4 и 8:
а, б – неметаллическое включение в сварном соединении; в – в зоне термического влияния

При исследовании образца 8 выявлена строчка силикатного включения протяженностью 1,51 мм, расположенная в зоне деформации, образовавшейся при осадке (рис. 1, в).

Результаты количественного анализа включений образцов представлены в таблице. Химический состав представлен в отдельных указанных точках с названием «Спектр» и соответствующим номером измерения. В таблице эти точки обозначены номером измерения на соответствующем рисунке.

Анализ химического состава включений показал, что основными составляющими включений, расположенных по месту шва, являются оксиды кремния и марганца, что характерно при образовании высокотемпературной окалины.

Кроме основных оксидов, в составе включений в меньшем количестве (по мере снижения концентрации) присутствуют оксиды алюминия (на уровне 1 – 2 %), железа, титана, хрома. Состав неметаллического включения, выявленного вне зоны шва, типичен для состава неметаллических включений, образующихся в металле при выплавке. Основными соединениями являются оксиды кремния, алюминия, магния. По мере снижения концентрации во включении наблюдаются соединения марганца, натрия, кальция, титана и циркония. Приведенный химический состав включения свидетельствует о шлаковом характере происхождения выявленного неметаллического включения, образовавшегося при разливке.

Химический состав неметаллических включений

Элемент	Содержание элемента, %, в точке											
	рис. 1, а		рис. 1, б				рис. 1, в					
	1	2	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6
O	61,07	60,92	65,77	66,40	60,60	60,61	60,99	60,87	60,78	57,04	57,02	60,95
Al	1,03	1,67	0,23	—	2,16	2,47	8,49	8,74	7,98	27,92	27,9	8,07
Si	20,96	20,29	31,33	32,74	18,68	18,64	17,49	17,13	17,50	—	—	16,96
S	0,16	0,15	—	—	0,25	0,21	—	0,17	—	—	—	0,12
Ca	0,10	0,12	—	—	—	—	1,31	1,15	1,12	—	—	1,19
Na	—	—	—	—	—	—	1,74	2,09	1,70	—	—	1,53
Mg	—	—	—	—	0,34	0,30	5,06	5,64	6,72	13,94	13,96	6,13
Ti	0,22	0,28	0,09	0,07	0,75	0,76	0,75	0,65	0,60	0,12	0,09	1,16
Cr	0,26	0,26	—	—	0,36	0,33	—	—	—	—	—	—
Mn	14,89	14,88	0,64	0,33	16,02	15,97	2,81	2,24	2,39	0,78	0,82	2,70
Fe	1,30	1,43	1,95	0,47	0,84	0,71	0,34	0,28	0,30	0,19	0,19	0,30
Zr	—	—	—	—	—	—	0,58	0,54	0,52	—	—	0,48
Сумма	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

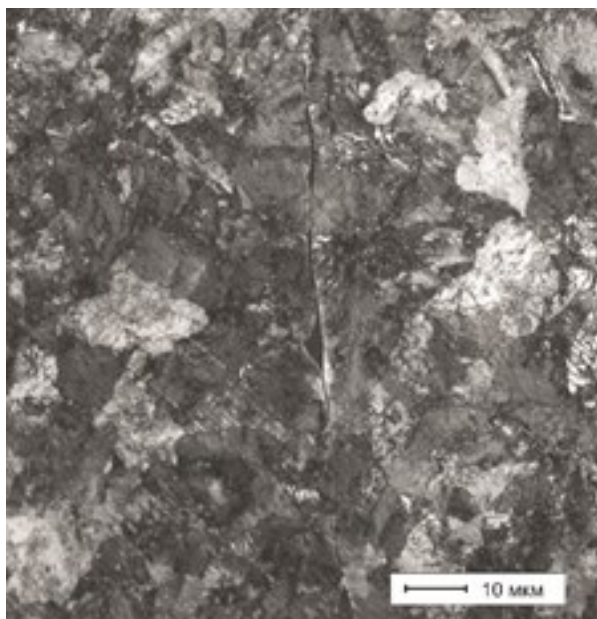


Рис. 2. Микроструктура металла сварного соединения образца 4

При просмотре травленных шлифов от двух образцов 4 и 8 по месту шва обезуглероженной зоны в виде ферритной сетки, образующейся, как правило, при оплавлении рельсовых торцов при сварке стыков, не выявлено, что обусловлено, вероятно, ускоренным нагревом и малым сечением образцов (рис. 2).

Микроструктура образца 4 на удалении до 2,5 мм (рис. 2) от шва состоит из мелкодисперсного пластинчатого перлита (сорбита) с мелкими участками троостита. На расстоянии 2,5 – 4,5 мм наблюдается отпущенная структура скоагулированного сорбита. На удалении свыше 5 мм от шва микроструктура характерна для таковой основного рельсового металла в термоупрочненном состоянии.

При исследовании образца 8 отмечено наличие крупнозернистой структуры (2-3 номер шкалы ГОСТ 5639 – 82 Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна) в околошовной зоне и микроструктуры с преобла-

данием мартенситной составляющей, характерной для перегретого металла (рис. 3).

Выводы. Химический состав включений, выявленных по месту сварного шва, показал, что основными их составляющими являются оксиды кремния, марганца, что характерно при образовании высокотемпературной окалины. Химический состав неметаллического включения, выявленного в металле вне зоны шва, типичен для включений, образующихся при выплавке, и свидетельствует о шлаковом характере его происхождения. В микроструктуре шва обоих образцов ферритная сетка, характерная для рельсовых стыков, не выявлена, что, вероятно, обусловлено ускоренным их нагревом ввиду малого сечения образцов. Микроструктура образца 4 на удалении до 2,5 мм от шва состоит из мелкодисперсного пластинчатого перлита (сорбита) с мелкими участками троостита. Далее на удалении до 4,5 мм от шва структура представляет скоагулированный сорбит. Свыше 5 мм от шва микроструктура характерна для термоупрочненного состояния рельсового металла. В микроструктуре околошовной зоны образца 8 наблюдается преимущественно мартенситная структура с небольшими участками троостосорбита, увеличивающихся по мере удаления от шва. Также в микроструктуре сварного соединения выявлена крупнозернистая структура (2-3 номер шкалы ГОСТ 5639 – 82), характерная для перегретого металла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Multi-factor regression analysis of the process of rails contact welding on K1000 machine / R.A. Shevchenko, N.A. Kozyrev, R.E. Kryukov, A.O. Patrushev, A.A. Usoltsev // Metallurgy 2017. IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 411 (2018) 012088| doi:10.1088/1757-899X/411/1/012088.
2. Кузнецов В.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Козырев Н.А., Крюков Р.Е. Методика определения электрического сопротивления рельсовой

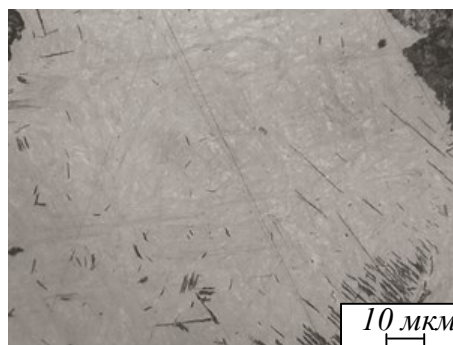
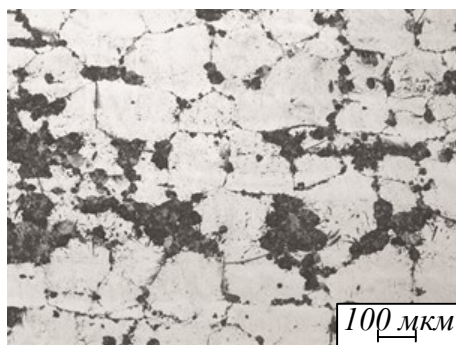


Рис. 3. Микроструктура металла сварного соединения образца 8

- стали // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2018. Вып. 40. С. 111 – 117.
3. Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Усольцев А.А., Крюков Р.Е. Совершенствование технологии электроконтактной сварки и термообработки железнодорожных рельсов // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2018. Вып. 40. С. 63 – 68.
 4. Шевченко Р.Е., Козырев Н.А., Куценко А.И., Усольцев А.А., Куценко А.А. Методика исследования влияния режимов изотермического отжига при сварке рельсов откаточных путей горных выработок // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2018. № 4. С. 269 – 273.
 5. Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Крюков Р.Е., Князев С.В. Современные технологии сварки железнодорожных рельсов // Черная металлургия. Бюллетень научнотехнической и экономической информации. 2018. Вып. 2 (1418). С. 62 – 68.
 6. Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Патрушев А.О., Кратко С.Н., Крюков Р.Е. Поиск оптимальных технологических параметров режима работы рельсосварочной машины K1100 // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2017. Вып. 38. С. 70 – 76.
 7. Шевченко Р.А., Кратко С.Н., Шишкин П.Е., Козырев Н.А., Базайкин В.И. Применение методов математического моделирования для оптимизации технологических параметров процесса контактной сварки рельсов на машине K1100 // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2017. Вып. 38. С. 76 – 81.
 8. Шевченко Р.А., Базайкин В.И., Кратко С.Н., Козырев Н.А., Патрушев А.О. Анализ токового режима работы сварочной машины K1100 при сварке рельсов на этапе оплавления // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2017. Вып. 38. С. 81 – 87.
 9. Козырев Н.А., Усольцев А.А., Шевченко Р.А., Крюков Р.Е., Шишкин П.Е. Современные методы сварки рельсов нового поколения // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 10. С. 785 – 791.
 10. Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Усольцев А.А., Крюков Р.Е., Патрушев А.О. Способы получения качественного сварного соединения железнодорожных рельсов. – В кн.: Металлургия: технологии, инновации, качество. Труды XX Международной научно-практической конференции: в 2-х ч. Ч. 1. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2017. С. 254 – 257.
 11. Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Патрушев А.О., Усольцев А.А. Многофакторный регрессионный анализ процесса контактной сварки рельсов на машине K1000. – В кн.: Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XX Международной научно-практической конференции, в 2-х ч. Ч. 1. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2017. С. 264 – 267.
 12. Шевченко Р.А., Кратко С.Н., Шишкин П.Е., Козырев Н.А., Базайкин В.И. Оптимизация технологических параметров процесса контактной сварки рельсов на машине K1000 методами математического моделирования // Вестник РАЕН (Западно-Сибирское отделение). 2017. Вып. 20. С. 101 – 106.
 13. Шевченко Р.А., Базайкин В.И., Кратко С.Н., Козырев Н.А., Шишкин П.Е. Исследование токового режима сварочной машины K1000 при сварке рельсов // Вестник РАЕН (Западно-Сибирское отделение). 2017. Вып. 20. С. 106 – 111.
 14. Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Патрушев А.О., Кратко С.Н., Шишкин П.Е. Определение оптимальных режимов работы рельсосварочной машины K1000 // Вестник РАЕН (Западно-Сибирское отделение). 2017. Вып. 20. С. 118 – 126.
 15. Kozыrev N.A., Kozыreva O.A., Usoltsev 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. P. 1 – 6.
 16. Usoltsev A.A., Shevchenko R.A., Kozыrev 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 (KTDMUR2017), 6–9 June 2017, Novokuznetsk, Russian Federation. 2017. Vol. 84. P. 1 – 7.
 17. Shevchenko R.A., Kozыrev N.A., Usoltsev A.A., Kriukov R.E., Shishkin P.E. Calculation of optimal modes for electric-contact welding of rails of mine haulage tracks // International Scientific and Research Conference on Knowledge-based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources (KTDMUR2017), 6–9 June 2017, Novokuznetsk, Russian Federation. 2017. Vol. 84. P. 1 – 5.
 18. Усольцев А.А., Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Шишкин П.Е. Анализ ме-

- тодов сварки рельсов для шахтных подъездных путей с использованием современных технологий // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2017. № 3. С. 241 – 248.
19. Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Усольцев А.А., Крюков Р.Е., Шишкин П.Е. Расчет оптимальных режимов электроконтактной сварки рельсов откаточных путей горных выработок // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2017. № 3. С. 232 – 236.
20. 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. Вып. 8 (1424). С. 50 – 57.
21. Протопопов Е.В., Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Шевченко Р.А., Усольцев А.А. Новая технология сварки железнодорожных рельсов. Сб. Трудов. XV Международного конгресса сталеплавателей. Москва – Тула, 15 – 19 октября 2018 г. – М.: МОО «Ассоциация сталеплавателей», 2018. С. 296 – 300.
22. Кучук-Яценко С.И., Лебедев В.К. Контактная сварка непрерывным оплавлением. – Киев: Наукова думка, 1976. – 216 с.
- © 2019 г. *Е.В. Полевой, Р.А. Шавченко, Н.А. Козырев, Д.Ю. Кушев, А.М. Юнусов*
Поступила 14 ноября 2018 г.