

УДК 669.1.17

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЫДЕРЖКИ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ РЕЛЬСОВ ИЗ СТАЛИ МАРКИ Э76ХФ

Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.Р. Михно, К.А. Бутакова, А.Н. Гостевская

E-mail: shefn1200@mail.ru

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

Аннотация. Проведено исследование структуры сварного соединения рельсовой стали марки Э76ХФ при различных режимах контактного подогрева. Методами оптической микроскопии исследована и описана структура на различных участках металла в зоне термического влияния. Установлено, что сварное соединение исследуемых образцов имеет несколько зон с различной структурой, среди которых можно выделить: зону, представляющую собой мелкодисперсный пластинчатый перлит (сорбит) с участками троостита; зону скоагулированного сорбита; зону, микроструктура которой характерна для основного рельсового металла в термоупрочненном состоянии. Выявлено, что проведение после контактной стыковой сварки контактного подогрева снижает количество мартенсита в зоне сварного шва. В ходе исследования были определены оптимальные параметры контактного подогрева, при использовании которых возможно получить структуру материала, позволяющую увеличить срок эксплуатации рельсов.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка, сварной шов, рельсовая сталь, неметаллические включения, структура.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF ISOTHERMAL EXPOSURE PARAMETERS ON THE STRUCTURE FORMATION IN WELDED JOINTS OF RAILS MADE OF STEEL GRADE E76HF

R.A. Shevchenko, N.A. Kozyrev, A.R. Mikhno, K.A. Butakova, A.N. Gostevskaya

E-mail: shefn1200@mail.ru

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. The paper studies the structure of the welded joint of rail steel grade E76HF at various modes of contact heating. The optical microscopy methods were used to study and describe the structure in various metal regions in the heat-affected zone. It was established that the welded joint of the samples under study has several zones with different structures, among which a zone consisting of finely divided lamellar perlite (sorbitol) with sections of troostite, a zone of coagulated sorbitol, and a zone whose microstructure is characteristic of the main rail metal in heat-strengthened condition can be distinguished. It was revealed that conducting contact heating after flash butt welding reduces the amount of martensite in the weld zone. During the study, the optimal parameters of contact heating were determined, thanks to which it is possible to obtain a material structure that allows the service life of rails to be increased.

Keywords: flash butt welding, weld, rail steel, non-metallic inclusions, structure.

Введение

На долю железных дорог приходится до 85 % грузовых и 50 % пассажирских перевозок [1]. По данным работ [2, 3] выделяется два направления развития отрасли: скоростное пассажирское и тяжеловесное грузовое движение, каждое из которых имеет специфические условия эксплуатации. Исходя из этого, к рельсам предъявляются

высокие требования по механическим свойствам, неметаллическим включениям, наличию дефектов.

Наиболее часто встречаемые дефекты [4] связаны с усталостной прочностью металла. По данным ОАО «ВНИИЖТ» [5, 6] причиной появления таких дефектов является загрязненность неметаллическими включениями, вытянутыми в

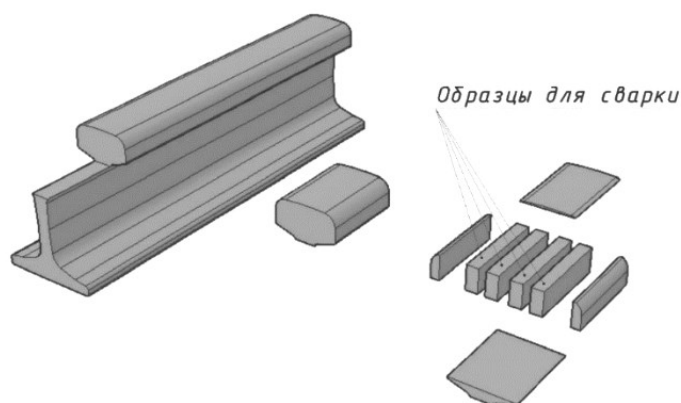


Рис. 1. Схема вырезки образцов

направлении прокатки рельсов [7].

При создании и ремонте бесстыкового железнодорожного пути применяется электроконтактная и алюминотермитная сварка рельсов. В России основную часть рельсов сваривают электроконтактным способом [8 – 10]. В настоящее время переходят от сварки способом непрерывного оплавления с предварительным подогревом к способу пульсирующего оплавления. Этот способ наиболее экономичен и технологичен в сравнении с непрерывным оплавлением. При контактной сварке рельсов так же, как и при других видах сварки, происходит нагрев и непрерывное охлаждение металла в зоне термического влияния. При контактной сварке пульсирующим оплавлением в зоне сварки снижается пластичность металла в результате появления закалочных структур. Для получения более однородной структуры применяется последующая локальная термическая обработка. Недостатком использования локальной термической обработки является увеличение протяженности зоны термического влияния и, соответственно, участков с пониженной твердостью. Большинство дефектов в процессе эксплуатации возникает в зоне термического влияния, которая образуется при сварке и локальной термической обработке. По этой причине многие исследователи большое внимание уделяют изучению причин разрушения в данной зоне. Установлено, что зона термического влияния более подвержена износу и дефек-

там, таким как выкрашивание, изломы сварного соединения, седловины и другие [11, 12].

Исследование микроструктуры рельсов позволяет выявить различные отклонения в технологии их изготовления, определить причины и характер различных внешних и внутренних дефектов металла. Необходимо стремиться к полному устранению иглоподобных структур верхнего бейнитного типа в структуре термически упрочненных рельсов.

Целью настоящей работы является изучение влияния сварочных процессов и контактного подогрева на структуру стали марки Э76ХФ.

Материалы и методы исследования

Для сварки вырезали образцы из рельсов сечением 10×30 мм и длиной 90 мм (рис. 1). Сечение образцов выбирали из условий возможности ведения процесса контактной стыковой сварки непрерывным оплавлением на машине МС–20.08 по следующему режиму: ступень трансформатора 10; $K_{тр} = 65$; $U_2 = 5,76$ В; $I_2 = 11700$ А; $\Delta_{опл} = 10$ мм; $\Delta_{ос} = 4$ мм; $v_{опл} = 1$ мм/с (где $K_{тр}$ – коэффициент трансформации; U_2 – вторичное напряжение; I_2 – вторичный ток; $\Delta_{опл}$ – припуск на оплавление; $\Delta_{ос}$ – припуск на осадку; $v_{опл}$ – скорость оплавления).

Исследования проводили в лабораторных условиях. Для проведения исследований использовали образцы стали марки Э76ХФ с известным химическим составом (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав образцов рельсовой стали

Образец	Массовая доля элементов, %							
	C	Mn	Si	V	Cr	P	S	Al
1	0,76	0,77	0,53	0,04	0,37	0,009	0,005	0,003
2	0,76	0,77	0,53	0,04	0,37	0,004	0,004	0,001
3	0,76	0,77	0,53	0,04	0,37	0,010	0,010	0,003

Режимы контактного подогрева образцов стали Э76ХФ

Режим	Значения факторов			
	X_1 , с	X_2 , с	X_3 , с	X_4 , с
1	25	0,4	20	2
2	20	0,2	10	2

Образец 1 получен способом контактной стыковой сварки непрерывным оплавлением без термической обработки. При сварке образцов 2 и 3 происходил подвод дополнительного тепла в момент их охлаждения путем пропускания через сварной стык переменного электрического тока по заданным режимам (табл. 2). Исследуемыми параметрами введения дополнительного тепла 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).

Металлографический анализ изменений структуры был выполнен с помощью оптического микроскопа Olympus GX-51. Для создания оптического контраста образцы химически травили 4 %-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте в течение 6 с.

Анализ неметаллических включений проводили по методике согласно ГОСТ 1778 – 70.

Исследование микротвердости было проведено с помощью микротвердомера HVS-1000. Нагрузка была постоянной при всех режимах обработки и составляла 1 Н. Время приложения и удержания нагрузки составляло 10 с, время снятия испытательной нагрузки – 5 с.

Результаты исследования и их обсуждение

В соответствии с ГОСТ 1778 – 70 определено, что среди неметаллических включений в образце 1 наиболее часто встречаются точечные оксиды, недеформирующиеся силикаты и пластинчатые силикаты (рис. 2, а – в).

Неметаллические включения образцов 2 и 3, подвергнутых контактному подогреву, по типам идентичны включениям образца 1 и представляют собой точечные оксиды, пластинчатые и недеформирующиеся силикаты.

Выявленные неметаллические включения типичны для неметаллических включений, образующихся в металле при выплавке.

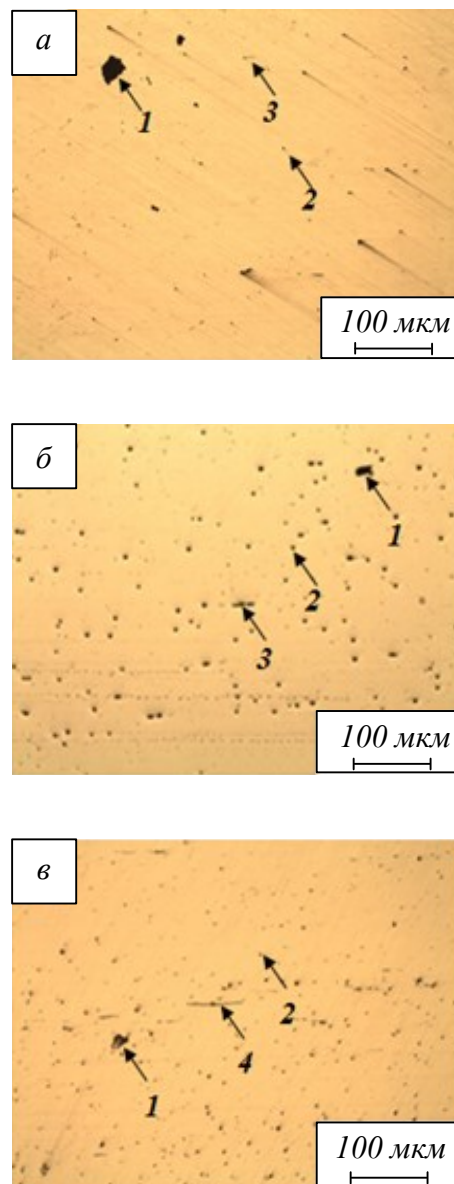


Рис. 2. Неметаллические включения стали Э76ХФ в образцах 1 – 3 (а – в):

1 – силикаты недеформирующиеся; 2 – точечные оксиды; 3 – силикаты пластинчатые; 4 – силикаты хрупкие

Установлено, что преобладающим типом неметаллических включений во всех исследуемых образцах являются точечные оксиды. При этом загрязненность включениями указанного типа в образцах 2 и 3, подвергнутых контактному подогреву, выше, чем в образце 1 (табл. 3).

Микроструктура сварного соединения образ-

Распределение типов неметаллических включений по образцам стали Э76ХФ

Образец	Типы неметаллических включений по образцам, балл			
	Оксиды точечные	Силикаты пластинчатые	Силикаты недеформирующиеся	Силикаты хрупкие
1	1а	1б	4а	–
2	3а	1б	4а	–
3	3а	–	3а	2а

ца 1 представлена на рис. 3. Протяженность зоны термического влияния составляет 4 мм.

Металлографическое исследование микроструктуры образца 1 выявило, что после контактной стыковой сварки область сварного соединения можно разделить на несколько областей: основной металл (рис. 3, а), зона нормализации (рис. 3, б), зона термического влияния (рис. 3, в), зона сварного шва (рис. 3, г).

В зоне сварного шва обнаружено наличие игольчатого мартенсита. Такая структура является недопустимой при эксплуатации рельсов. На расстоянии 4 мм от сварного шва структура изменяется и состоит из мелкодисперсного перлита. На расстоянии от 8 мм структура является характерной для основного металла.

Микроструктура сварного соединения образца 2 представлена на рис. 4. Сварной шов пред-

ставляет собой светлую полосу и зону термического влияния по обе стороны от нее, также можно наблюдать основной металл. Протяженность зоны термического влияния образца составляет 19 мм.

Анализ микроструктуры позволил выделить на исследуемых образцах наиболее характерные области, которые заметно отличаются друг от друга как структурой, так и протяженностью: шов – обезуглероженный слой (рис. 4, г), зона крупного зерна (рис. 4, в), участок нормализации (рис. 4, б), основной металл (рис. 4, а).

Микроструктура образца на удалении до 5 мм от шва состоит из мелкодисперсного пластинчатого перлита (сорбита) с малыми участками троостита. В зоне сварного шва можно выделить крупные участки мартенсита (рис. 4, г). Эта структура является недопустимой при экс-

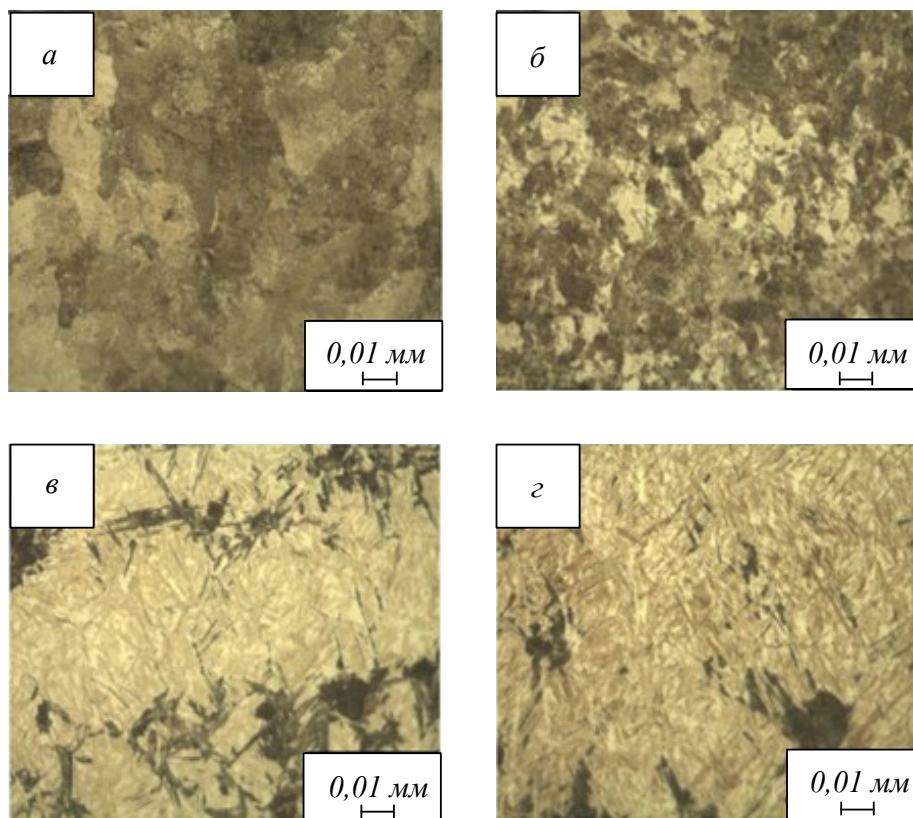


Рис. 3. Изменение структуры в зоне термического влияния образца 1 при контактной стыковой сварке: а – основной металл; б, в – зона термического влияния; г – сварной шов

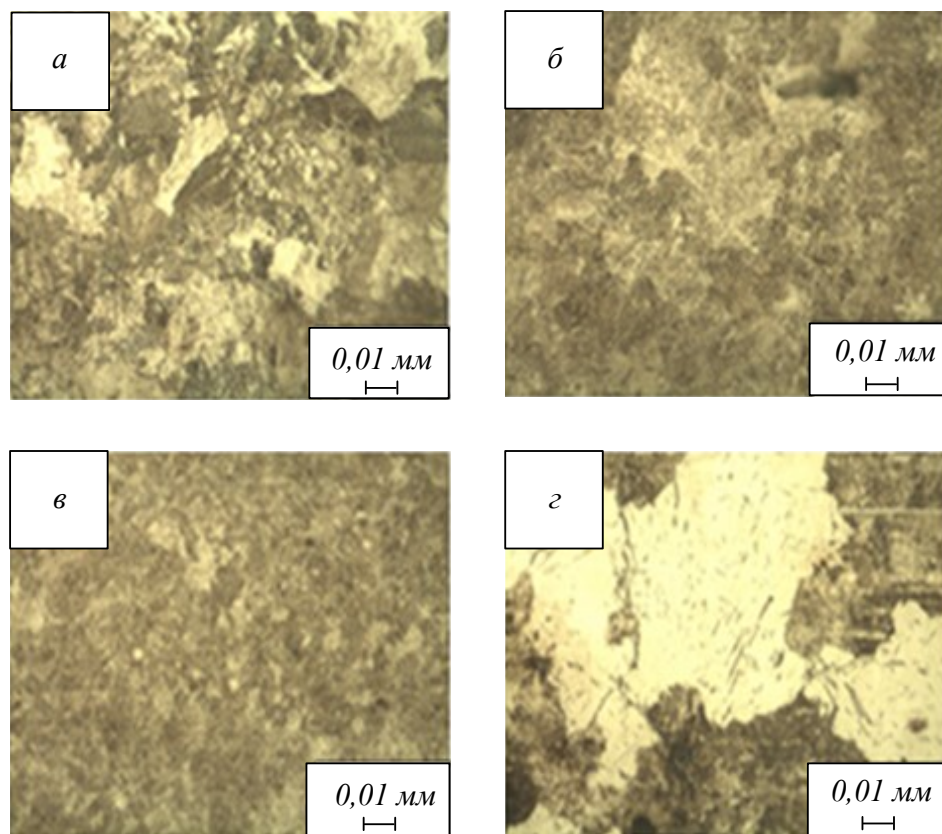


Рис. 4. Структурные превращения в зоне термического влияния образца 2 стали 76ХФ после проведения контактной стыковой сварки по режиму 1:

а – основной металл; *б, в* – зона термического влияния; *г* – зона сварного шва

плутации рельсов. На расстоянии от 5 до 8 мм наблюдается отпущенная структура скоагулированного сорбита (рис. 4, *б, в*). На удалении свыше 10 мм от шва микроструктура характерна для основного рельсового металла в термоупрочненном состоянии (рис. 4, *а*).

Микроструктура сварного соединения образца 3 представлена на рис. 5. Протяженность зоны термического влияния для этого образца составляет 10,5 мм.

Выявленные области в сварном соединении аналогичны областям в соединении образца 2: шов – обезуглероженный слой (рис. 5, *г*), зона крупного зерна (рис. 5, *в*), участок нормализации (рис. 5, *б*), основной металл (рис. 5, *а*).

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

Распределения полученных значений микротвердости по зонам сварного соединения показаны на рис. 6. Микротвердость в образце 1 (рис. 6,

кривая 1) возрастает по мере приближения к центру сварного шва. Среднее значение микротвердости в зоне сварного шва составляет 691 HV, что подтверждает присутствие в зоне сварного соединения мартенсита. В остальных областях сварного соединения микротвердость образца составляет около 280 HV. Минимальное значение микротвердости выявлено на расстоянии 12 мм от сварного соединения.

Микротвердость в образце 2 (рис. 6, кривая 2), резко возрастает по мере приближения к центру сварного шва. В этой зоне ее средние значения составляют от 410,9 HV до 525 HV, что подтверждает присутствие в зоне сварного шва мартенсита. Среднее значение микротвердости в центре сварного шва составляет 451 HV, что в 1,5 раза ниже, чем у образца 1 в той же зоне. Данная зависимость подтверждает снижение количества мартенсита в сварном шве при использовании дополнительного контактного подогрева. Другие области имеют постоянную твердость, близкую к 330 HV. В зоне крупного зерна средняя микротвердость составляет 348,3 HV, в основном металле 335,3 HV.

Микротвердость в образце 3 снижается в зоне сварного шва (рис. 6, кривая 3). В этой зоне значения микротвердости находятся в пределах от

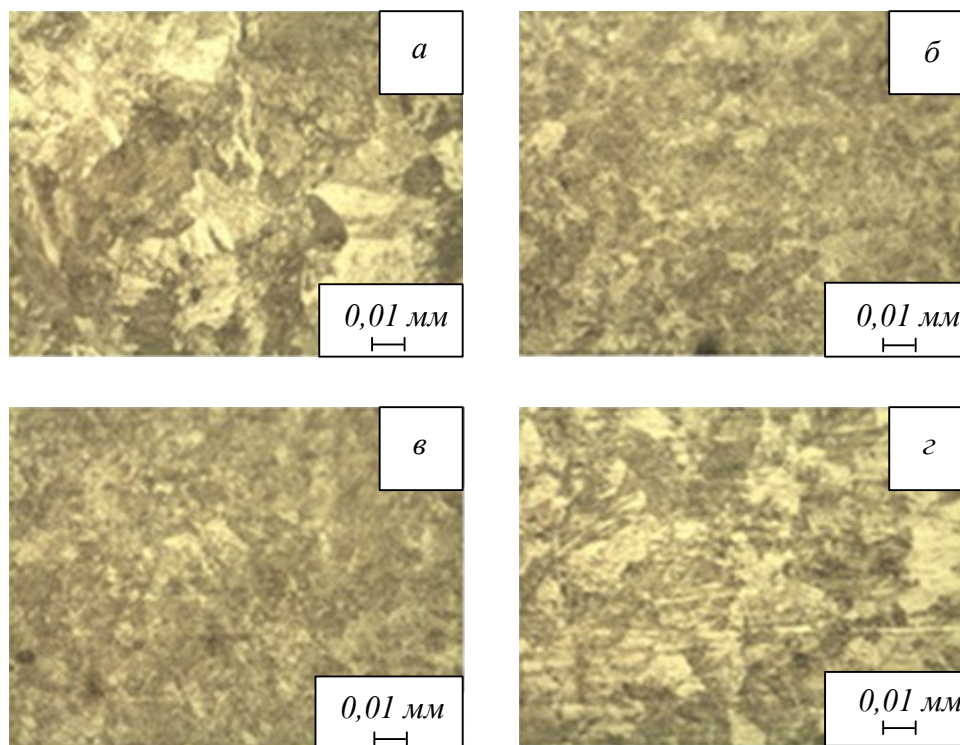


Рис. 5. Структурные превращения в зоне термического влияния образца 3 стали Э76ХФ после проведения контактной стыковой сварки:

а – основного металл; *б, в* – зона термического влияния; *г* – зона сварного шва

256,6 HV до 313,6 HV, что свидетельствует о преобладании в этой зоне мелкодисперсного пластинчатого перлита (сорбита). Среднее значение микротвердости в зоне сварного шва составляет 291,5 HV, что в два раза ниже, чем в образце 1 в той же зоне. Распределение микротвердости свидетельствует об отсутствии в образце 3 в зоне сварного шва участков мартенсита.

Установлены оптимальные параметры после-сварочной обработки образцов для стали Э76ХФ: длительность выдержки – 20 с, длительность им-

пульса 0,2 с, длительность интервала – 10 с, количество импульсов 2.

Выводы

Проведенное по ГОСТ 1778 – 70 исследование показало, что преобладающим типом неметаллических включений в сварных соединениях во всех исследуемых образцах являются точечные оксиды. Выявленные в металле неметаллические включения типичны для включений, образующихся при выплавке, и свидетельствуют о

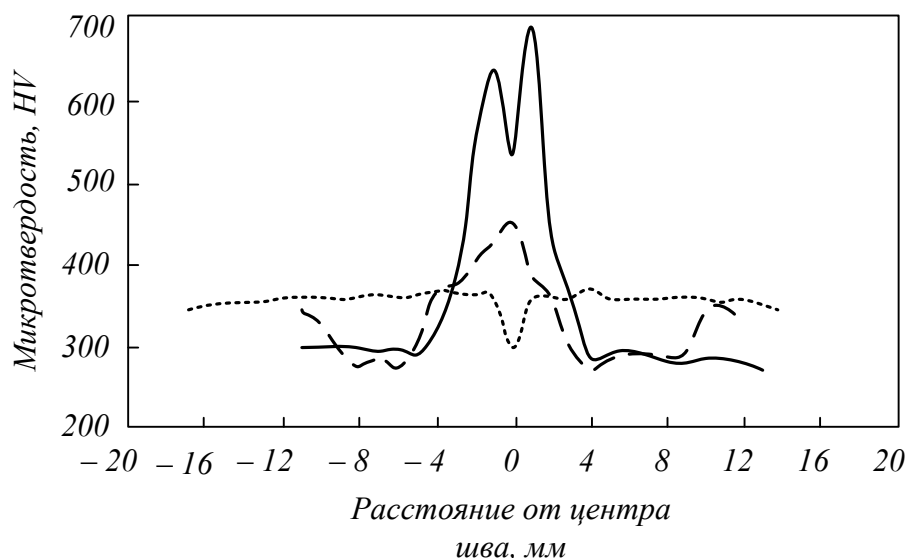


Рис. 6. Распределение микротвердости в сварном соединении:
— — образец 1; --- — образец 2; — образец 3

шлаковом характере их происхождения.

Микроструктура в зоне сварного шва рельса после контактной стыковой сварки без проведения контактного перегрева представляет собой игольчатый мартенсит. Такая структура является недопустимой и может повлиять на сроки эксплуатации рельсов. Показано, что проведение дополнительного контактного подогрева приводит к улучшению структуры вследствие снижения количества мартенсита, что сопровождается снижением микротвердости в зоне сварного шва в 1,5 – 2,0 раза.

Установлены оптимальные параметры после-сварочной обработки образцов для стали Э76ХФ: длительность выдержки – 20 с, длительность импульса 0,2 с, длительность интервала – 10 с, количество импульсов 2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смирнов Л.А., Дерябин А.А., Добужская А.Б. Повышение качества отечественных железнодорожных рельсов // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». 2005. № 6. С. 43 – 49.
2. Захаров С.М., Мугинштейн Л.А., Шур Е.А. Ренессанс железных дорог: новые вызовы для производителей рельсов // Инженерные решения. 2012. № 1. С. 6 – 7.
3. Лисицын А.И. Актуальные требования к рельсовой продукции, поставляемой для ОАО «РЖД». – В кн.: Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых креплений. Сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия». Челябинск, 24 – 25 сентября 2015 г. – Екатеринбург, 2016. С. 193 – 200.
4. Козлов В.А. Рельсовая сталь. Ч. 1 // Производство проката. 2005. № 8. С. 41 – 46.
5. Рейхарт В.А. Испытания железнодорожных рельсов на экспериментальном кольце ВНИИЖТ // Промышленный транспорт XXI век. 2009. № 4. С. 25 – 29.
6. Георгиев М.Н., Межова Е.М., Морозов Е.М. О механизме развития контактно-усталостных трещин в железнодорожных рельсах // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2000. № 9. С. 50 – 52.
7. Борц А.И., Заграничек К.Л., Долгих Л.В. Результаты сравнительных испытаний рельсов отечественных и зарубежных производителей на контактно-усталостную выносливость. – В кн.: Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых креплений. Сборник научных докладов по материалам 128 заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Московская обл., 23 – 25 октября 2012 г. – Екатеринбург, 2013. С. 113 – 127.
8. Шевченко Р.А., 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.
9. Kozurev 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. P. 116 – 121.
10. Гудков А.В., Беляев Д.И., Сальников Б.Б., Хлебников С.В. Машина МСР – 6301 для контактной сварки рельсов в стационарных условиях // Сварочное производство. 2003. № 2. С. 43 – 45.
11. Mutton P., Cookson J., Qiu C., Welsby D. Microstructural characterization of rolling contact fatigue damage in flashbutt welds // Wear. 2016. No. 366. P. 368 – 377.
12. 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.

© 2020 г. Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев,
А.Р. Михно, К.А. Бутакова, А.Н. Гостевская
Поступила 24 января 2020 г.