

**INVESTIGATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF WELDED JOINTS  
OBTAINED BY CONTACT-ARC WELDING FROM RAIL HOIST GRADE E76HF**

*Anastasia Nikolaevna Gostevskaya <sup>1a</sup>, Vladislav Konstantinovich Dolbyshev <sup>1</sup>,  
Artem Vladimirovich Markidonov <sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Siberian State Industrial University, Kirova str. 42, Novokuznetsk, 654007, Russia

<sup>2</sup> Kuzbass Humanitarian and Pedagogical Institute of Kemerovo State University, Tsiolkovsky str. 23, Novokuznetsk, 654027, Russia

<sup>a</sup> lokon1296@mail.ru

---

**ABSTRACT**

The structure of the welded joint of E76KhF rail steel was studied under various modes of contact heating. Optical microscopy methods have been used to study and describe the structure in various parts of the metal in the heat-affected zone. It has been established that the welded joint of the studied samples has several zones with different structures, among which it is possible to distinguish: a zone that is a finely dispersed lamellar perlite (sorbite) with areas of troostite; a zone of coagulated sorbitol; zone, the microstructure of which is typical for the main rail metal in the heat-strengthened state. It was found that contact heating after flash butt welding reduces the amount of martensite in the weld zone. In the course of the study, the optimal parameters of contact heating were determined, using which it is possible to obtain a material structure that makes it possible to increase the service life of the rails.

**KEYWORDS**

Flash butt welding; weld; rail steel; structure; heat affected zone.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ,  
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ КОНТАКТНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ  
ИЗ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ МАРКИ Э76ХФ**

*Анастасия Николаевна Гостевская <sup>1a</sup>, Владислав Константинович Долбышев <sup>1</sup>,  
Арте́м Влади́мирович Маркидо́нов <sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Сибирский государственный индустриальный университет, Россия, 654007, Новокузнецк, ул. Кирова, 42

<sup>2</sup> Кузбасский гуманитарно-педагогический институт Кемеровского государственного университета, Россия, 654027, Новокузнецк, ул. Циолковского, 23

<sup>a</sup> lokon1296@mail.ru

---

**АННОТАЦИЯ**

Проведено исследование структуры сварного соединения рельсовой стали марки Э76ХФ при различных режимах контактного подогрева. Методами оптической микроскопии иссле-

дована 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; структура; зона термического влияния.

### Введение

Самые важные и дорогостоящие элементы железнодорожных путей – это рельсы. Их надежность и безопасность определяется специальными требованиями.

Протяженность железных дорог в России составляет свыше 87000 километров, они состоят из стальных магистралей, которые прокладываются рельсами длиной до 100 метров.

На сегодняшний день становление железнодорожного хозяйства характеризуется развитием современных методов и технологий ремонта путей. Развивающимся методом укрепления строения железнодорожных рельсов является смена болтовых стыков на сварные стыки. Прочностные свойства рельсов, подвергнутых контактной стыковой сварке, определяются подбором параметров сварки. В России для производства путей используют рельсы нового поколения, типа Р65. При проведении контактной стыковой сварки рельсов марки Р65 возможно образование структуры мартенсита в зоне термического влияния.

В условиях роста грузонапряженности, скорости движения и нагрузок на ось предъявляются высокие требования к качеству рельсовой стали как отечественных, так и зарубежных производителей [1–3].

Электроконтактная сварка рельсов – это один из распространенных способов сварки на территории России. Такой метод дает возможность получать надежные сварные стыки при строительстве и ремонте железнодорожных бесстыковых путей [4–6].

Сварные швы рельсовых креплений должны соответствовать требованиям, которые позволяют обеспечить высокое качество сварного соединения и избежать появления дефектов, характерных при сварке. Дефекты, которые появляются при проведении сварки, приводят к образованию и развитию трещин и, как следствие, выходу из строя стыка рельсов, что нарушает безопасность движения [7–9]. Поэтому надежности стыковых соединений рельсов уделяется особое внимание.

На сегодняшний день активно развивается строительство и укладка скоростных магистралей железных дорог с использованием рельсов типа Р65, изготовленных из рельсовой стали [10–12].

Одной из важных проблем сварки рельсов является несоответствие данных, полученных при исследовании контрольных образцов после сварки непрерывным или пульсирующим оплавлением и образцов без воздействия на сварное соединение термообработкой [13–16]. В сравнении с отечественным способом при сварке рель-

совых стыков зарубежный метод выдвигает специальные требования по термообработке. Способ непрерывного оплавления приводит к удлинению зоны термического влияния, что воздействует на прочность сварных соединений рельсовых стыков.

Изучение свойств сварных стыков рельсов показало, что на сегодняшний день сварка рельсов методом непрерывного оплавления не позволяет достигнуть необходимого уровня прочностных характеристик, что в свою очередь приводит к образованию в металле сварного стыка сварочных дефектов. Из-за этого происходит падение срока службы рельсов и приводит к большим затратам на ремонт [17–20].

Исследования показали, что важными условиями, приводящими рельсы к разрушению, считаются: наличие в стали неметаллических включений, присутствие непозволительной структуры в сварном соединении и протяженность зоны термического влияния. Цель исследования – исследовать структуру и протяженность зоны термического влияния при различных режимах сварки.

### 1. Материалы и методы исследования

Для сварки вырезали образцы из рельсов сечением 10×30×90 мм. Сечение образцов выбиралось из условий ведения свар-

ки непрерывным оплавлением на машине МС-20.08. Прежде всего, были выбраны оптимальные режимы, исходя из рекомендуемого режима, представленного в руководстве по применению сварочного аппарата. Изучение воздействия термообработки на структуру сварного соединения проводилось на лучшем режиме, далее производился нагрев по настроенным параметрам. В дальнейшем образцы разрезались, и производилось исследование структуры сварного соединения. Образцы соединяли контактной стыковой сваркой на машине типа МС-20.08.

Контактную стыковую сварку непрерывным оплавлением проводили на машине МС-20.08 по режиму:  $U_2 = 5,76$  В,  $I_2 = 11,7$  кА,  $V_{\text{опл}} = 1$  мм/с,  $\Delta_{\text{опл}} = 10$  мм, где  $K_{\text{тр}}$  – коэффициент трансформации;  $U_2$  – вторичное напряжение;  $I_2$  – вторичный ток;  $\Delta_{\text{опл}}$  – припуск на оплавление;  $\Delta_{\text{ос}}$  – припуск на осадку;  $V_{\text{опл}}$  – скорость оплавления.

При сварке образцов № 1–№ 2 происходил подвод дополнительного тепла в момент их охлаждения путем пропускания через сварной стык переменного электрического тока по заданным режимам (табл. 1).

Для проведения исследований была выбрана рельсовая сталь марки Э76ХФ. Химический состав стали приведен в табл. 2.

**Таблица 1.** Режимы контактного подогрева образцов стали Э76ХФ

**Table 1.** Modes of contact heating of samples of steel E76HF

Режим, № / Mode, No.	Время охлаждения после осадки, с / Cooling time after compression, c	Время подогрева, с / Heating time, c	Время охлаждения после подогрева, с / Cooling time after heating, c	Количество импульсов подогрева, с / Number of heating pulses, c
1	25	0,6	15	4
2	25	0,6	15	2

**Таблица 2.** Химический состав рельсовой стали Э76ХФ

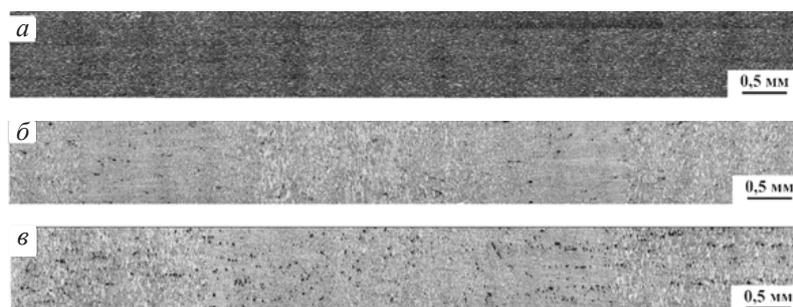
**Table 2.** Chemical composition of E76HF rail steel

№ образца/ No. of sample	C	Mn	Si	Cr	V	P	S	Al	Ni	Cu	Ti	Mo	Nb	Sn	Sb	O
Без сварки/ No welding	0,76	0,77	0,53	0,37	0,04	0,009	0,005	0,003	0,07	0,11	0,002	0,005	0,001	0,005	0,002	0,0009
1	0,76	0,77	0,53	0,36	0,04	0,014	0,007	0,003	0,06	0,08	0,002	0,004	0,001	0,004	0,001	0,0009
2	0,76	0,77	0,53	0,36	0,04	0,014	0,007	0,003	0,06	0,08	0,002	0,004	0,001	0,004	0,001	0,0009

Исследование образцов стали Э76ХФ на неметаллические включения проводилось на металлографическом микроскопе OLYMPUS GX-51 при увеличении в 100 крат в соответствии с ГОСТ 1778-70. Металлографический анализ изменений структуры проводился при увеличении в 500 крат в соответствии с ГОСТ 8233-56. Для создания оптического контраста образцы химически травились раствором, представляющим собой 4%-й раствор азотной кислоты в этиловом спирте, в течение 6 с. Анализ и оценка микроструктуры образцов выполнены по ГОСТ 8233-56. Дальнейшим этапом исследования было проведение дюрOMETрического анализа.

## 2. Результаты и их обсуждение

Макроструктура образцов, представлена на рис. 1. По строению макроструктуры можно определить, что образцы, подвергнутые сварке, имеют несколько зон (зона основного металла, зона термического влияния и сварной шов). По строению макроструктуры можно определить, что образцы, подвергнутые сварке, имеют несколько зон (зона основного металла, зона термического влияния и сварной шов). Макроструктура образца без сварки представлена на рис. 1, а. На рис. 1, б показана макроструктура образца, сваренного по режиму № 0. Протяженность зоны термического влияния образца 1 составляет 4 мм.



**Рис. 1.** Макроструктура образцов стали Э76ХФ:  
а – образец без сварки; б – образец № 1; в – образец № 2

**Fig. 1.** Macrostructure of samples of steel E76KhF:  
a – sample without welding; б – sample No. 1; в – sample No. 2

Макроструктура сварного соединения образца № 1 представлена на рис. 3, в. Протяженность зоны термического влияния образца 1 составляет 5 мм. На рис. 3, г показана макроструктура образца, сваренного по режиму № 2. В ходе исследования было выявлено, что протяженность зоны термического влияния составляет 5 мм.

В рельсовой стали Э76ХФ были выявлены неметаллические шлаковые включения в виде темнотравящихся полосок и точек. Исследование образцов рельсовой стали на неметаллические включения проводилось на металлографическом микроскопе OLYMPUS GX-51 при увеличении в 100 крат в соответствии с ГОСТ 1778-70. В рельсовой стали марки Э76ХФ, было выявлено присутствие неметаллических включений, представленных в табл. 3.

В образце стали Э76ХФ без сварки было выявлено присутствие точечных оксидов (балл № 2а), силикатов недеформирующихся (балл № 1а) и силикатов пластичных (балл № 1а). Образец рельсовой стали марки Э76ХФ № 1 является одним из самых чистых образцов по количеству и видам неметаллических включений. Основной металл образца № 1 содержит неметаллические включения: силикаты недеформирующиеся (балл

№ 3а), оксиды точечные (балл № 1а) и силикаты пластинчатые (балл № 2а). В зоне термического влияния выявлено наличие недеформирующихся силикатов (балл № 3а), точечных оксидов (балл № 1а) и пластинчатые силикаты (балл № 2а). В сварном шве образца № 1, обнаружены силикаты недеформирующиеся (балл № 3а), оксиды точечные (баллы № 1а) и силикаты пластинчатые (балл № 2а). При исследовании образца № 2 установлено, что металл образца является наиболее загрязненным по количеству и видам неметаллических включений. В образце № 1 в основном металле зоне термического влияния сварном шве выявлены силикаты пластинчатые (балл № 4б), оксиды точечные (баллы № 1а), нитриды строчечные (баллы № 3а) и силикаты хрупкие (балл № 2а).

После изучения стали на неметаллические включения был проведен анализ микроструктур образцов стали марки Э76ХФ до и после сварки.

На рис. 2 показана микроструктура образца без сварки. Структура стали Э76ХФ представляет собой перлит различной степени дисперсности, который оценивается баллом 1 – 2 ГОСТ 8233, и является свойственной для структуры нетермоупрочненных рельсов.

**Таблица 3.** Неметаллические включения

**Table 3.** Non-metallic inclusions

№ Образца / No. of sample	Типы неметаллических включений по образцам, балл / Types of non-metallic inclusions by samples, type				
	Оксиды точечные / Dot oxides	Силикаты пластичные / Ductile silicates	Силикаты недеформирующиеся / Non-deforming silicates	Силикаты хрупкие / Brittle silicates	Нитриды строчечные / Line nitrides
Образец без сварки	2 (а)	1 (б)	1 (а)	1 (а)	–
1	1 (а)	2 (а)	3 (а)	–	–
2	4 (а)	4 (б)	–	2(а)	3(а)

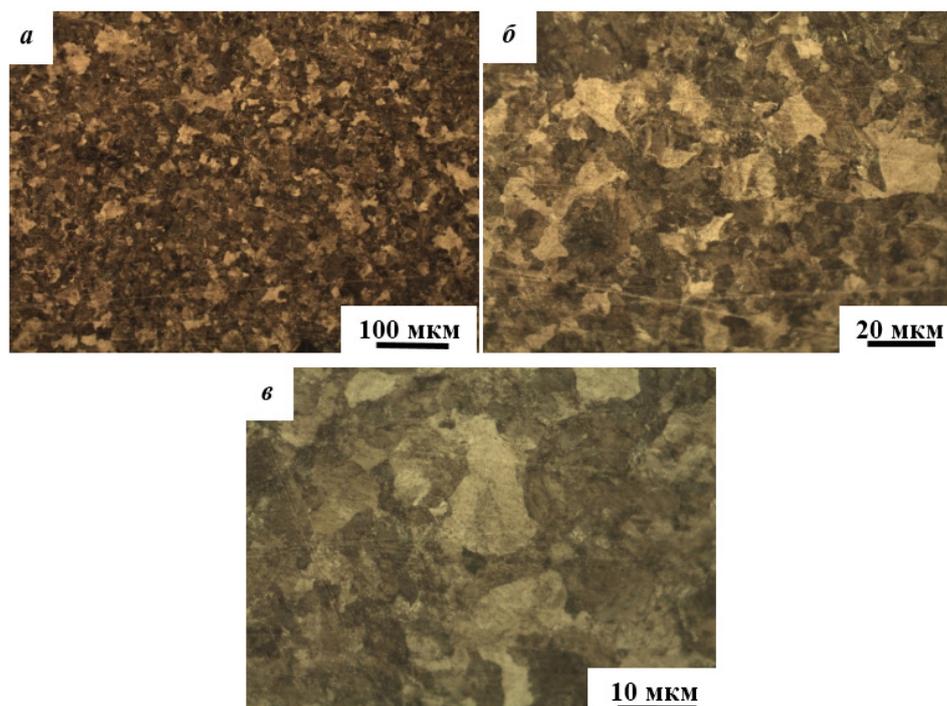


Рис. 2. Микроструктуры образца без сварки рельсовой стали Э76ХФ

Fig. 2. Microstructures of the sample without welding rail steel E76HF

Микроструктура образца стали Э76ХФ после сварки контактным стыковым методом по режиму № 1 представляет собой тонкий

мелкопластинчатый перлит с межпластинчатый расстоянием до 0,6 мкм (рис. 3).

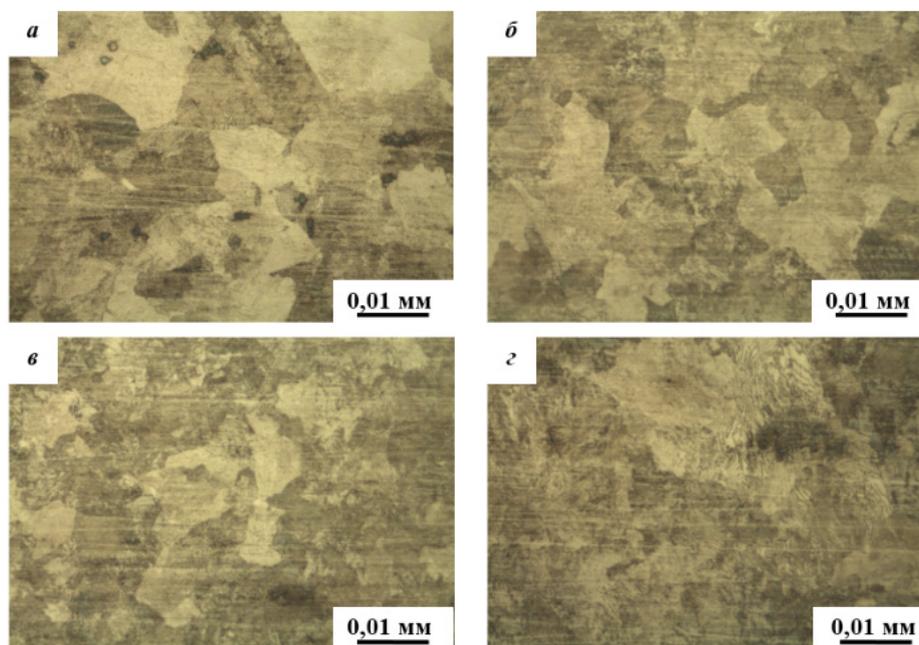


Рис. 3. Микроструктура различных областей, полученная при режиме № 1: а – основной металл; б, в – зона термического влияния; г – сварной шов

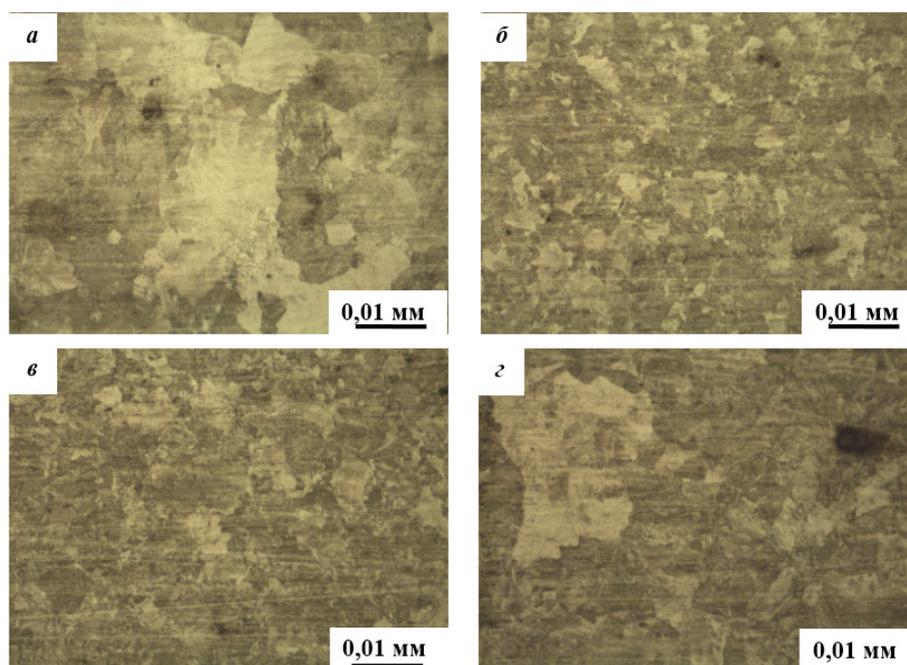
Fig. 3. Microstructure of various areas obtained in mode No. 1: а – base metal; б, в – heat-affected zone; г – welded seam

Микроструктура, представленная на рис. 4, позволила выделить в образце, полученному по режиму № 2, области: сварного шва, зоны крупного зерна, зоны мелкого зерна и основного металла.

По результатам металлографического анализа выявлено, что в сварном шве образца, сваренного по режиму № 2, преобладает сорбитообразный перлит с межпластинчатым расстоянием менее 0,2 мкм. В зоне крупного зерна преобладает структура средне-

пластинчатого перлита с межпластинчатым расстоянием менее 1 мкм.

Из данных, представленных в табл. 4, можно предположить, что в зоне сварного шва образца, полученного по режиму № 1, в этой области преобладает скрыто пластинчатый перлит с межпластинчатым расстоянием 0,3 мкм. В зоне крупного зерна преобладает пластинчатый сорбитообразный перлит с межпластинчатым расстоянием менее 0,6 мкм.



**Рис. 4.** Микроструктура различных областей, полученная при режиме № 2: *a* – основной металл; *б, в* – зона термического влияния; *з* – сварной шов

**Fig. 4.** Microstructure of various areas obtained in mode No. 2: *a* – base metal; *б, в* – heat-affected zone; *з* – welded seam

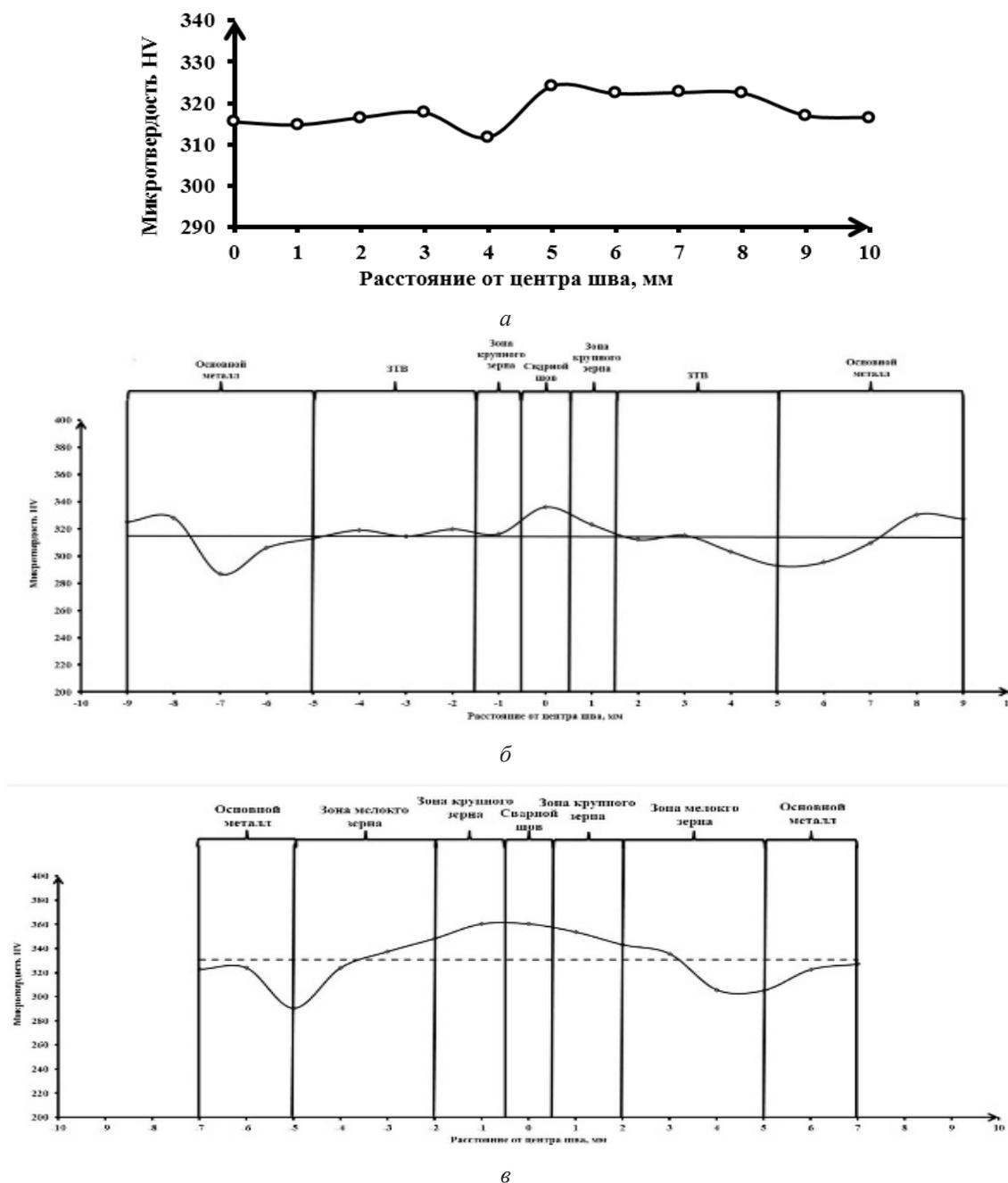
**Таблица 4.** Неметаллические включения

**Table 4.** Non-metallic inclusions

Режим № 1 / Mode No. 1			
Зона / Zone	Протяженность зоны, мм / Zone length, mm	Объемная доля мартенсита/ троостита, % (балл) / Volume fraction of martensite/ troostite, % (ball)	Степень дисперсности пластинчатого перлита, балл / The dispersion degree of lamellar perlite, type
Сварной шов / Weld seam	3,0 мм	–	3
Зона крупного зерна / Coarse grain zone	2,0 мм	–	1
Режим № 2 / Mode No. 2			
Сварной шов / Weld seam	1 мм	–	1
Зона крупного зерна / Coarse grain zone	1,9 мм	–	1

Профили микротвердости по Виккерсу образцов можно наблюдать на графике, представленном на рис. 5. Из графика можно наблюдать, что максимальное значение микротвердости составляет 324,1 HV.

При проведении анализа измерений на микротвердость образца без сварки установлено, что значения микротвердости удовлетворяют техническим требованиям.



**Рис. 5.** Распределение значений микротвердости № 2:  
*а* – материал до сварки; *б* – в зависимости от зоны в сварном соединении образца, сваренного по режиму № 1;  
*в* – в зависимости от зоны в сварном соединении образца, сваренного по режиму № 2

**Fig. 5.** Distribution of microhardness values No. 2:  
*a* – material before welding; *б* – depending on the zone in the welded joint of the sample welded according to mode No. 1;  
*в* – depending on the zone in the welded joint of the sample welded according to mode No. 2

## Выводы

На основании данных о загрязненности неметаллическими включениями, в соответствии с ГОСТ 1778-70, выявлено, что преобладающим типом неметаллических включений в сварных соединениях во всех исследуемых образцах являются точечные оксиды. Исследование неметаллических включений образцов в основном металле и в зоне сварного шва показало, что режимы контактной стыковой сварки непрерывным оплавлением не оказали влияние на загрязненность образцов.

В образцах полученных по режимам сварки № 1 и № 2 в микроструктуре зоны сварного шва и зоны термического влияния участков мартенсита не обнаружено, что соответствует требованиям ГОСТ Р 51685-2013. В соответствии с ГОСТ Р 51685-2013 выявлено, что оптимальная структура, удовлетворяющая требованиям, получена на образце № 1.

Распределение микротвердости образцов, полученных по режимам сварки:  $U_2 = 5,76$  В,  $I_2 = 11,7$  кА,  $V_{\text{опл}} = 1$  мм/с,  $\Delta_{\text{опл}} = 10$  мм, режим контактного подогрева: время охлаждения после осадки 25 с, время подогрева 0,6 с, время охлаждения после подогрева 15 с, количество импульсов подогрева 4 с в зоне сварного соединения имеет удовлетворительные значения.

Наилучшими параметрами контактного подогрева после сварки с точки зрения выявленной микроструктуры, протяженности зоны термического влияния и значений микротвердости являются параметры, использованные в режиме сварки:  $U_2 = 5,76$  В,  $I_2 = 11,7$  кА,  $V_{\text{опл}} = 1$  мм/с,  $\Delta_{\text{опл}} = 10$  мм, режим контактного подогрева: время охлаждения после осадки 25 с, время подогрева 0,6 с, время охлаждения после подогрева 15 с, количество импульсов подогрева 4 с. Этот режим дает возможность получить сварное соединение из рельсовой стали типа Р65 марки Э76ХФ в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685-2013 по структуре и механическим свойствам. Так же данный режим имеет наименьшую протяженность зоны с пониженной микротвердостью.

## Благодарности / Acknowledgments

*Работа выполнена в рамках государственного задания № 0809-2021- 0013.*

*The work was carried out within the framework of the state assignment No. 0809-2021-0013.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гостевская А. Н. Исследование параметров контактной стыковой сварки на применение термического диапазона рельсов марки Э76ХФ // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре технического государственного университета. 2021. № 3 (51). С. 76–81.
2. Yuryev A., Kozyrev N., Shevchenko R., Mikhno A., Gutak O. Phase transformations occurring during the formation of a welded joint from rail steel // E3s web of conferences: URM 2021 – International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources, (Novokuznetsk, June 01–04 2021). V. 330. Novokuznetsk: EDP Sciences, 2021. Article number 02007. DOI: 10.1051/e3sconf/202133002007.
3. Umanskii A. A., Golovatenco A. V., Simachev A. S., Dumova L. V. The Microstructure of Differentially Heat Strengthened Railroad Rails Manufactured by the EVRAZ ZSMK Company // Met Sci Heat Treat. 2022. V. 64, Iss. 5–6. P. 343–349. DOI: 10.1007/s11041-022-00812-y.
4. Kozyrev N., Usol'tsev A. A., Shevchenko R., Kryukov R. E., Shishkin P. E. Modern welding methods of the rails of new generation // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Chernaya Metallurgiya. 2017. V. 60, Iss. 10. P. 785–791. DOI: 10.17073/0368-0797-2017-10-785-791.
5. Kuchuk-Yatsenko S. I., Shvets Yu. V., Didkovskii A. V., Chvertko P. N., Shvets V. I., Mikitin Ya. I. Technology and equipment for resistance flash welding of railway crossings with rail ends through an austenitic insert // Welding International. 2008. V. 22, No. 5. P. 338–341. DOI: 10.1080/09507110802205365.
6. Moltasov A., Tkach P., Krasnowski K. Method for strength calculating of structural elements of mobile machines for flash butt welding of rails // Mechanics and Advanced Technologies. 2017. V. 3, Iss. 81. P. 5–9. DOI: 10.20535/2521-1943.2017.81.114528.
7. Arbabi L., Rahbar M., Jabbari M., Mohammad-Zadeh M., Azimi L., Namvar A. E., Lari A. R. Extended-spectrum  $\beta$ -lactamase-producing E.coli and Klebsiella pneumoniae isolated from urinary tract infections in Milad Hospital, Tehran, Iran // Healthmed. 2012. V. 6, Iss. 11. P. 2818–2822.
8. Pickering F. B. Effect of Processing Parameter on the Origin of non-metallic Inclusions in Production of Clean Steel in Production and Application of Clean Steel. London: Iron and Steel Institute, 1970. P. 75–92.

9. 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. V. 28, No. 7. P. 510–520. DOI: 10.1080/09507116.2012.753237.
10. Aglan H. A., Ahmed S., Kaushal R. K., Fateh M. Effect of Preheating Temperature on the Mechanical and Fracture Properties of Welded Pearlitic Rail Steels // *Engineering*. 2013. V. 05, Iss. 11. P. 837–843. DOI: 10.4236/eng.2013.511101.
11. Bose-Filho W. W., Carvalho A. L. M., Strangwood M. Effects of alloying elements on the microstructure and inclusion formation in HSLA multipass welds // *Materials Characterization*. 2007. V. 58, Iss. 1. P. 29–39. DOI: 10.1016/j.matchar.2006.03.004.
12. Ghazanfari H., Naderi M. Influence of Welding Parameters on Microstructure and Mechanical Performance of Resistance Spot Welded High Strength Steels // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2013. V. 26, No. 5. P. 635–640. DOI: 10.1007/s40195-013-0076-1.
13. Korneva L. V., Yunin G. N., Kozyrev N. A., Atkonova O. P., Polevoi E. V. Quality comparison of OAO NKMK and imported rails // *Steel Transl*. 2010. V. 40, Iss. 12. P. 1047–1050. DOI: 10.3103/S0967091210120065.
14. Shur E. A. Influence of the structure on the service life of rails // Influence of the properties of the metal matrix on the service life of rails: Sb. statei. Ekaterinburg: UIM, 2006. C. 37–63.
15. Lee F. T. Managing thermite weld quality for railroads. 2006. V. 85. P. 24–29.
16. Irving B. Long Island Rail Road orders an all-welded fleet // *Welding journal*. 1997. V. 22, Iss. 9. P. 33–37.
17. Kargin V. A., Tikhomirova L. B., Abramov A. D., Galai M. S. Effect of vibroimpact treatment on the physical and mechanical properties of the surface layer of welded joints in rails // *Welding International*. 2014. V. 28, Iss. 3. P. 245–247. DOI: 10.1080/09507116.2013.796676.
18. Mitsuru F., Hiroaki N., Kiyoshi N. Rail flash-butt welding technology // *JFE Technical Report*. 2015. No. 20. P. 159–163.
19. Rukavchuk Yu. P., Rozhdestvensky S. A., Etingen I. Z. Defective joints of aluminothermic welding of rails // *Put' i put'evoje hozyaistvo*. 2011. No. 4. P. 26–27.
20. Saita K., Karimine K., Ueda M., Iwano K., Yamamoto T., Hiroguchi K. Trends in Rrail Welding Technologies and Our Future Approach // *Nippon steel & sumitomo metal technical report*. 2013. V. 105. P. 84–92.