

ОАО «Центральный научно-исследовательский институт информации
и технико-экономических исследований черной металлургии»

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

БЮЛЛЕТЕНЬ научно-технической и экономической информации

Журнал включен в перечень научных изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением
законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия
Регистрационный номер ПИ № 77-18479

Издается с 1944 года, ежемесячно

Том 76, № 3

2020

Москва,
ОАО «Черметинформация»

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ СВАРНЫХ ШВОВ РЕЛЬСОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ИХ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ СВАРКЕ

Е. В. ПОЛЕВОЙ¹, канд. техн. наук, начальник научно-исследовательского отдела дирекции по рельсовому производству;

Н. А. КОЗЫРЕВ², д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения, литейного и сварочного производства, kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru;

Р. А. ШЕВЧЕНКО², ассистент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства;

А. А. УСОЛЬЦЕВ², канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства
(¹ АО “ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат”,

Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк;

² ФГБОУ ВО “Сибирский государственный индустриальный университет”,
Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк)

Аннотация. Качество сварных соединений рельсов зависит от различных факторов, в частности от вида и количества неметаллических включений, образующихся при их электроконтактной сварке. Для подтверждения гипотезы о причинно-следственной связи снижения механических свойств сварных стыков и состава неметаллических включений сварного шва осуществлен их химический и металлографический анализ. Для исследования неметаллических включений использовали образцы размером 90×30×10 мм, вырезанные из головки рельсов из стали Э76ХФ. После контактной стыковой сварки на машине МС-2008 образцы разрезали электроэрозионным способом перпендикулярно сварному шву на две части. Одну часть образца использовали для испытания на растяжение, а вторую — для металлографического анализа неметаллических включений и 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 GX71 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. Установлено, что основными составляющими включений, выявленных по месту сварного шва, являются оксиды кремния и марганца, а также в меньшем количестве оксиды алюминия, железа, титана, хрома. В микроструктуре шва образцов ферритная сетка, характерная для рельсовых стыков, не обнаружена, что, вероятно, обусловлено ускоренным их нагревом ввиду малого сечения образцов.

Ключевые слова: сварные соединения рельсов, электроконтактная сварка, неметаллические включения, макроструктура сварных стыков, химический состав неметаллических включений.

Ссылка для цитирования: Полевой Е.В., Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А. Исследование состава неметаллических включений сварных швов рельсовых соединений, полученных при их электроконтактной сварке // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 3. С. 251–256.

Doi: 10.32339/0135-5910-2020-3-251-256

STUDY OF NON-METALLIC INCLUSIONS COMPOSITION IN RAIL JOINTS WELDED SEAMS, OBTAINED AT THEIR CONTACT ARC WELDING

E. V. POLEVOI¹, PhD (Tech.), Head of R&D Dpt., Rails production Directorate; N. A. KOZYREV², HD (Tech.), Prof., Head of Dpt. “Material Science, Foundry and Welding production”, kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru;

R. A. SHEVCHENKO², Ass. of Dpt. “Material Science, Foundry and Welding production”;

A. A. USOL'TSEV², PhD (Tech.), Prof. Ass., Dpt. “Material Science, Foundry and Welding production”

(¹ JSC “EVRAZ United West-Siberian steel-works”, Russia, Kemerovo rgn., Novokuznetsk;

² FGBOU VO “Siberian State Industrial University”, Russia, Kemerovo rgn., Novokuznetsk)

Abstract. The quality of welded rail joints depends on various factors, in particular, on the type and quantity of non-metallic inclusions, formed at their contact arc welding. To check a hypothesis of the cause-effect of welded joint mechanical properties decrease and composition of non-metallic inclusions in the welded seams, their chemical and metallographic analysis accomplished. To study the non-metallic inclusions, samples of 90×30×10 mm dimensions used, cut of Э76ХФ steel rail head. After contact butt welding at MC-2008 machine, the samples were cut by electro-erosion method perpendicularly to the welding seam into two parts. One part of the sample was used for tensile test, the other – for metallographic analysis for non-metallic inclusions and structure of the welded joint. The microstructure of the welded butts studied after milling and intensive etching in the 50% water solution of

hydrochloric acid. The microstructure was studied at the optical microscope OLYMPUS GX71 in the light field at magnification 100–1000 folds after etching in an alcohol solution of nitric acid. The chemical composition of all the revealed inclusions were determined at the scanning electron microscope MIRA 3. It was established, that silicon and manganese oxides were the basic components of inclusions, revealed in the welded seam, as well as oxides of aluminum, iron, titanium, chrome – to a less amount. In the samples seam microstructure the ferrite net, typical for rail butts, was not discovered, which is probably stipulated by their accelerated heating due to the small section of the samples.

Key words: welded rail joints, contact arc welding, non-metallic inclusions, macrostructure of the welded butts, chemical composition of non-metallic inclusions.

For citation: Polevoi E.V., Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Usol'tsev A.A., Study of non-metallic inclusions composition in rail joints welded seams, obtained at their contact arc welding. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii* = *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2020, vol. 76, no. 3, pp. 251–256. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2020-3-251-256

Качество сварных соединений из рельсовой стали, полученных электроконтактным способом сварки, зависит от различных факторов [1–6]. Лабораторные исследования [7, 8] по изучению влияния на качественные показатели сварного стыка режимов сварки с последующей изотермической выдержкой образцов из рельсовой стали, производимой путем пропускания импульсов переменного электрического тока после сварки, показали, что у полученных сварных стыков наблюдаются низкие пластические свойства вне зависимости от наличия закалочных структур в металле шва и зоне термического влияния. Наиболее вероятно, что снижение пластических свойств 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 окислов и свариваемого металла, образующиеся в стыке. В результате недостаточной газовой защиты возможно образование неметаллических включений, которые в ходе даль-

нейших сварочных операций должны выдавливаться в грат при осадке и удаляться вместе с ним.

По данным работы [9], образование неметаллических включений в шве возможно при их присутствии 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, неметаллических включений. 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.

Материалы и методы исследования

Проведено исследование неметаллических включений, образующихся при электроконтактной сварке рельсовой стали. Для сварки в лабораторных условиях производили вырезку образцов размером 90×30×10 мм из головки рельсов из стали Э76ХФ. Химический состав рельсовой стали, используемой при исследовании электросопротивления: 0,76 % C; 0,77 % Mn; 0,53 % Si; 0,37 % Cr; 0,04 % V; 0,009 % P; 0,005 % S; 0,003 % Al; 0,07 % Ni; 0,11 % Cu; 0,005 % Mo; 0,001 % Nb; 0,005 % Sn; 0,002 % Sb (по массе). В дальнейшем производили контактную стыковую сварку на машине МС-2008. Далее образцы разрезали перпендикулярно сварному шву на две части электроэрозионным способом на электро-

эрозионном проволочно-вырезном станке с ЧПУ струйного типа ДК7732-М11. Одну часть образца использовали для испытания на растяжение, а вторую — для металлографического анализа неметаллических включений и 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 GX71 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.

Результаты

На макротемплетах сварных соединений в средней части наблюдается сварной шов в виде светлой полоски и зоны термического влияния (ЗТВ) по обе стороны от него. В зоне сварного

соединения видны шлаковые включения в виде темнотравящихся полосок и точек (рис. 1, показано стрелками).

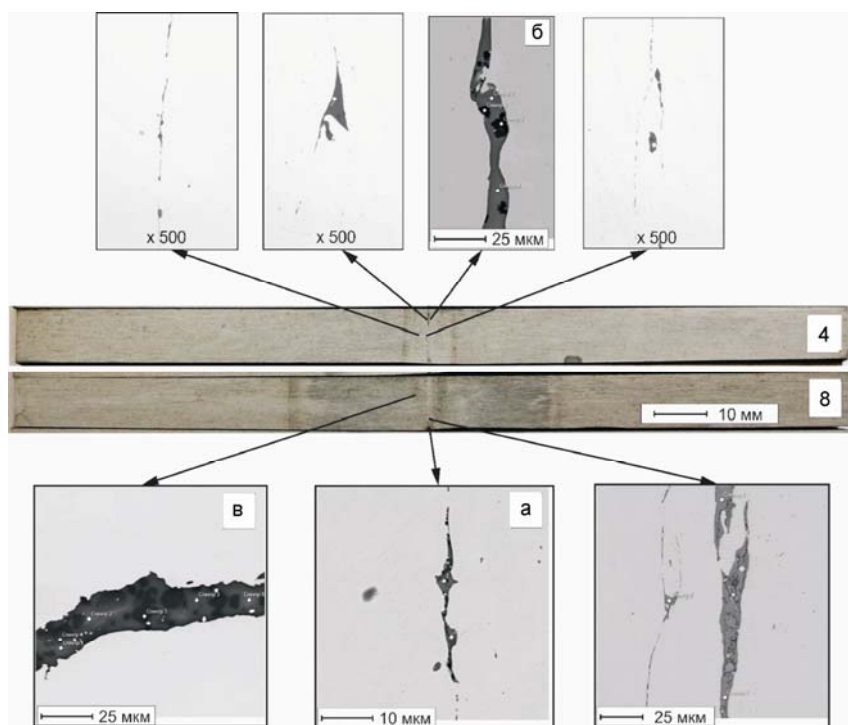


Рис. 1. Неметаллические включения образцов № 4 и 8:
а, б — в сварном соединении; в — в зоне термического влияния

Fig. 1. Non-metallic inclusions of samples Nos. 4 and 8:
а, б — in the welded joint; в — in the heat-affected zone

При изучении нетравленных шлифов в зоне шва образцов выявлены однотипные, расположенные в вертикальном направлении светлые неметаллические включения силикатного характера шириной до 35 мкм (см. рис. 1, а, б). При исследовании образца № 8 выявлена строчка силикатного включения протяженностью 1,51 мм, расположенная в зоне деформации, образовавшейся при осадке (см. рис. 1, в).

Представлен химический состав в отдельных указанных точках с названием “Спектр” и соответствующим номером измерения. Результаты количественного анализа включений образцов представлены в таблице. В таблице данные точки обозначены номером измерения на соответствующем рисунке.

При анализе химического состава включений определено, что основными составляющими

включений, расположенных по месту шва, являются оксиды кремния и марганца. Это характерно при образовании высокотемпературной окалины. Кроме основных окислов 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 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, %

CHEMICAL COMPOSITION OF NON-METALLIC INCLUSIONS, %

Химический элемент	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

При просмотре травленных шлифов 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).

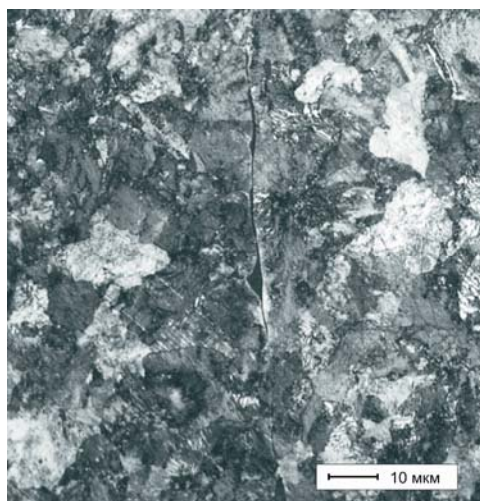


Рис. 2. Микроструктура металла сварного соединения образца № 4, ×1000

Fig. 2. Microstructure of the welded joint metal, sample No. 4, ×1000

Микроструктура образца № 4 на удалении до 2,5 мм 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 основного рельсового металла в термоупрочненном состоянии.

При исследовании образца № 8 отмечено наличие крупнозернистой структуры (номер 2–3 шкалы ГОСТ 5639–82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна) в околосшовной зоне и микроструктуры с преобладанием мартенситной составляющей, характерной для перегретого металла (рис. 3).

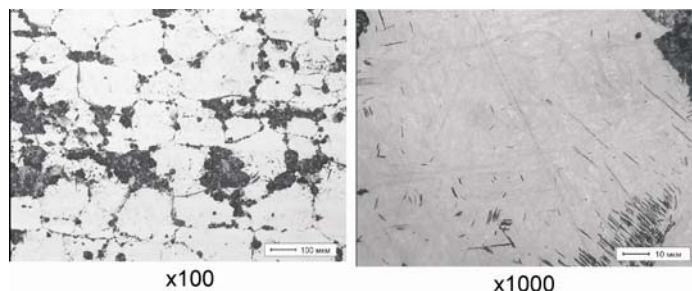


Рис. 3. Микроструктура металла сварного соединения образца № 8

Fig. 3. Microstructure of the welded joint metal, sample No. 8

Выводы

Химический анализ включений, обнаруженных по месту сварного шва, показал, что основными их составляющими являются оксиды кремния, марганца, характерные при образовании высокотемпературной окалины. Химический со-

став неметаллического включения, находящегося в основном 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 обнаружена, что, вероятно, обусловлено ускоренным их нагревом ввиду малого сечения. Микроструктура образца № 4 на удалении до 2,5 мм от шва состоит из мелкодисперсного пластинчатого перлита (сорбита) с мелкими участками троостита. Далее до 4,5 мм 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, увеличивающиеся по мере удаления от шва. Также в микроструктуре сварного соединения выявлена крупнозернистая структура (номер 2–3 шкалы ГОСТ 5639–82), характерная для перегретого металла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Kryukov R.E. etc. 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. V. 411. P. 1–5 (012088). Doi: 10.1088/1757-899X/411/1/012088.
2. Кузнецов В.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А. и др. Методика определения электрического сопротивления рельсовой стали // *Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: сб. науч. трудов*. 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: сб. науч. трудов*. 2018. Вып. 40. С. 63–68.
4. Шевченко Р.Е., Козырев Н.А., Куценко А.И. и др. Методика исследования влияния режимов изотермического отжига при сварке рельсов откаточных путей горных выработок // *Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов*. 2018. № 4. С. 269–273.
5. Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А. и др. Современные технологии сварки железнодорожных рельсов // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2018. № 2 (1418). С. 62–68.
6. Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Патрушев А.О. и др. Определение оптимальных режимов работы рельсосварочной машины K1000 // *Вестник Российской академии естественных наук (Западно-Сибирское отделение)*. 2017. Вып. 20. С. 118–126.
7. 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.
8. Новая технология сварки железнодорожных рельсов / Е.В. Протопопов, Н.А. Козырев, Р.Е. Крюков и др. // *Сб. трудов XV Международного конгресса сталеплавыльщиков (г. Москва–Тула, 15–19 октября 2018 г.)*. — М.: МОО “Ассоциация сталеплавыльщиков”, 2018. С. 296–300.
9. Кучук-Яценко С.И., Лебедев В.К. Контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением: монография. — Киев: Наукова думка, 1976. — 216 с.

Поступила 18 декабря 2019 г.

REFERENCES

1. Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Patrushev A.O., Usoltsev 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.
2. Kuznetsov V.A., Shevchenko R.A., Usol'tsev A.A., Kozyrev N.A., Kryukov R.E. Methodology of electrical resistance determination of rail steel. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sekti Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii*, 2018, no. 40, pp. 111–117. (In Russ.).
3. Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Usol'tsev A.A., Kryukov R.E. Perfection of a technology of arc-contact welding and heat treatment of railway rails. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sekti Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii*, 2018, no. 40, pp. 63–68. (In Russ.).
4. Shevchenko R.E., Kozyrev N.A., Kutsenko A.I., Usol'tsev A.A., Kutsenko A.A. Methodology of study of isothermal annealing modes effect at welding of rails for haulage ways of mining workings. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov*, 2018, no. 4, pp. 269–273. (In Russ.).
5. Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Usol'tsev A.A., Kryukov R.E., Knyazev S.V. Modern technologies of railway rails welding. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tehnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 2 (1418), pp. 62–68. (In Russ.).
6. Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Patrushev A.O., Krat'ko S.N., Shishkin P.E. Determination of the optimal operation mode of K1000 welding machine. *Vestnik Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk (Zapadno-Sibirskoe otdelenie)*, 2017, no. 20, pp. 118–126. (In Russ.).

7. Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Kryukov R.E., Usol'tsev A.A. Elaboration of a new technology of welding rails for high-speed movement. *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.).
8. Protopopov E.V., Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Shevchenko R.A., Usol'tsev A.A. *Novaya tekhnologiya svarki zheleznodorozhnykh rel'sov* [A new technology of railway rails welding]. *Sb. trudov. XV Mezhdunarodnogo kongressa staleplavil'shchikov (g. Moskva–Tula, 15–19 oktyabrya 2018 g.)* [Sat Proceedings of the XV International Congress of Steelmakers (Moscow–Tula, October 15–19, 2018)]. Moscow: MOO “Assotsiatsiya staleplavil'shchikov”, 2018, pp. 296–300. (In Russ.).
9. Kuchuk-Yatsenko S.I., Lebedev V.K. *Kontaktnaya stykovaya svarka nepreryvnym oplavleniem* [Contact-butt welding by continuous fusion]. Kiev: Naukova dumka, 1976, 216 p. (In Russ.).

Received December 18, 2019