

Оригинальная статья

УДК 620.170: 621.791

DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-40-46

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И ПОВЕРХНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА СВАРНЫХ ШВОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

© 2022 г. Р. Е. Крюков, Е. В. Громов, А. Р. Михно, А. В. Жуков

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии исследованы структурно-фазовое состояние и поверхность разрушения металла сварных швов стали 09Г2С, выполненных с применением новых сварочных материалов на основе техногенного сырья металлургического производства (шлака производства силикомарганца и пыли электрофильтров алюминиевого производства). Изготовление сварных соединений выполнялось в лабораторных условиях с использованием сварочной проволоки марки Св-08ГА на оборудовании научно-производственного центра «Сварочные процессы и технологии» ФГБОУ ВО «СибГИУ». С использованием оборудования ФГБУН «Институт сильноточной электроники СО РАН» (г. Томск) выполнен количественный анализ параметров структуры и дислокационной субструктуры металла сварных швов. Оценены вклады скалярной и избыточной плотности дислокаций в прочность металла сварных швов. Установлено, что основной фазой металла исследуемых сварных швов (независимо от введения добавки) является твердый раствор на основе α -железа (феррит, ОЦК кристаллическая решетка, α -фаза). Кроме α -железа в металле сварного шва присутствуют частицы карбида железа (цементит) и (преимущественно в образце без добавки) силицида железа состава Fe₃S. Анализируя электронно-микроскопические изображения структуры металла сварного шва, было замечено, что наиболее узкие контуры формируются у межфазных границ включение – матрица. Такими включениями, выявленными методами просвечивающей электронной микроскопии, могут являться частицы цементита, расположенные в объеме и на границах зерен феррита, и частицы силицида железа округлой (сферической) формы, расположенные в объеме зерен феррита. Выявлено, что включения второй фазы, присутствующие в металле сварного шва, являются концентраторами напряжений и могут быть центрами зарождения микротрещин при механическом воздействии на материал.

Ключевые слова: сварной шов, флюс, шлак силикомарганца, структура, фазовый состав, поверхность разрушения

Для цитирования: Крюков Р.Е., Громов В.Е., Михно А.Р., Жуков А.В. Структурно-фазовое состояние и поверхность разрушения металла сварных швов, выполненных с применением новых материалов на основе техногенного сырья // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4 (42). С. 40 – 46. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-40-46](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-40-46)

Original article

STRUCTURAL-PHASE STATE AND METAL FRACTURE SURFACE OF WELDS MADE WITH THE USE OF NEW MATERIALS BASED ON TECHNOGENIC RAW MATERIALS

© 2022 R. E. Kryukov, E. V. Gromov, A. R. Mikhno, A. V. Zhukov

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. The structural-phase state and the metal fracture surface of 09G2S steel welds made using new welding materials based on technogenic raw materials of metallurgical production (silica manganese slag and aluminum electrofilter dust) were studied by scanning and transmission electron microscopy methods. The production of welded joints was carried out in laboratory conditions using welding wire of the Sv-08GA brand on the equipment of the scientific and production center "Welding Processes and Technologies" of SibSIU. Quantitative analysis of the parameters of the structure and dislocation substructure of the weld metal was performed, using the equipment of the Institute of High-current Electronics SB RAS (Tomsk). The contributions of scalar and excessive dislocation density to the strength of the weld metal are estimated. It is established that the main metal phase of the studied welds (regardless of the introduction of the additive) is a solid solution based on α -iron (ferrite, BCC crystal lattice, α -phase). In addition to α -iron, particles of iron carbide (cementite) and (mainly in the sample without additives) iron silicide of the composition Fe₃S are present in the weld metal. Analyzing electron microscopic images of the structure of the weld metal, it was noticed that the narrowest contours are formed at the interfacial boundaries of the inclusion – matrix. Such inclusions detected by transmission electron microscopy methods may be cementite particles located in the volume and at the boundaries of ferrite grains, and iron silicide particles of rounded (spherical) shape located in the volume of ferrite grains. It is revealed that the inclusions of the second phase present in the weld metal are stress concentrators and can be centers of microcrack nucleation under mechanical action on the material.

Keywords: weld, flux, silica manganese slag, structure, phase composition, fracture surface

For citation: Kryukov R.E., Gromov V.E., Mikhno A.R., Zhukov A.V. Structural-phase state and metal fracture surface of welds made with the use of new materials based on technogenic raw materials. *Bulletin of Siberian State Industrial University*. 2022, no. 4 (42), pp. 40 – 46. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-40-46](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-40-46)

Введение

В последнее десятилетие наблюдаются опережающее развитие технологий электродуговой сварки [1, 2], создание широкого многообразия новых сварочных материалов и расширение областей их использования [3, 4]. Применение углеродфторсодержащих материалов во флюсах [5, 6] открыло новые технологические возможности в повышении качества макроструктуры стальных сварных соединений по содержанию неметаллических включений и газовых пор [7]. Однако недостаток данных о структурно-фазовых состояниях, дислокационной субструктуре и морфологии поверхностей разрушения сварных швов, полученных с использованием новых флюсов из шлака силикомарганца и углеродфторсодержащей добавки (ФД-УФС), сдерживает развитие этого перспективного направления.

Целью настоящей работы является обоснование совместного применения флюса из шлака силикомарганца и ФД-УФС для электродуговой сварки путем проведения подробных исследований структурно-фазовых состояний металла сварного шва.

Материалы и методы исследования

Сварку под флюсом на основе шлака производства силикомарганца с применением ФД-УФС в

количестве 6 % (образец 1) и без нее (образец 2) проводили встык без скоса кромок с двух сторон на образцах размерами 500×75×16 мм из листовой стали марки 09Г2С. Процесс проводили проволокой Св-08ГА с использованием сварочной установки АСАW-1250 при режиме: $I_{св} = 700$ А – ток; $U_d = 30$ В – напряжение; $V_{св} = 35$ м/ч – скорость сварки.

Структуры поверхности разрушения и поверхности травления металла сварного шва анализировали методами сканирующей электронной микроскопии. Травление поверхности образцов осуществляли путем облучения импульсным электронным пучком на установке «СОЛЮ» [8 – 10]. Параметры облучения: энергия ускоренных электронов 18 кэВ; плотность энергии пучка электронов 10 Дж/см²; длительность импульса воздействия пучка электронов 50 мкс; количество импульсов 3; частота следования импульсов 0,3 с⁻¹; облучение проводили в среде остаточного инертного газа (аргон) при давлении 0,02 Па. Исследования морфологии - фаз, дефектной субструктуры и фазового состава металла сварного шва осуществляли методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии.

Химический состав металла сварного шва
Table 1. Chemical composition of the weld metal

Образец	Количество элементов, % (по массе)										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Nb	Al	S	P	Fe
1	0,12	0,66	1,43	0,02	0,06	0,10	0,011	0,012	0,027	0,008	остальное
2	0,09	0,71	0,51	0,03	0,10	0,11	0,014	0,023	0,018	0,012	остальное

Основные результаты

Исследования химического состава (табл. 1) показывают, что образцы металла сварного шва отличаются по степени легирования, а именно, суммарная концентрация легирующих элементов (C, Si, Mn, Cr, Ni, Cu, Nb, Al) в образце с добавкой ФД-УФС составляла 2,413 % (по массе), в образце без добавки – 1,487 % (по массе). Основное отличие в элементном составе металла шва исследуемых образцов наблюдается по концентрации марганца и углерода.

Следующей отличительной особенностью изломов исследуемых сварных швов является наличие неметаллических включений, характерных преимущественно для сварного шва 2 (без добавки) (рис. 1). Размеры неметаллических включений изменяются в пределах от 10 мкм до 15 мкм. Следует ожидать, что присутствие в металле сварного шва таких включений будет способствовать его охрупчиванию. Таким образом, анализ структуры поверхности разрушения позволяет говорить, что сварной шов металла образца 2 (без добавки), содержащий сравнительно большое количество неметаллических включений, может быть более хрупким по сравнению со сварным швом образца 1 (с добавкой ФД-УФС).

Фазовый состав и дефектную субструктуру металла сварного шва изучали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии [11 – 15]. Установлено, что основной фазой металла

исследуемых сварных швов (независимо от введения добавки) является твердый раствор на основе α -железа (феррит, ОЦК кристаллическая решетка, α -фаза). Кроме α -железа в металле сварного шва присутствуют частицы карбида железа (цементит) и (преимущественно в образце 2 (без добавки)) силицида железа состава Fe_3Si (ОЦК кристаллическая решетка, $a = 0.28277$ нм).

На рис. 2 показаны области с фрагментированной дислокационной субструктурой. Средний размер фрагментов в образце 1 (рис. 2, а) составляет 450 нм, в образце 2 (рис. 2, б) – 550 нм. В объеме фрагментов присутствует дислокационная субструктура в виде хаотически распределенных дислокаций. Скалярная плотность дислокаций в такой структуре одинакова и составляет в образцах 1 и 2 соответственно $2,7 \cdot 10^{10}$ и $2,65 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Амплитуда внутренних полей напряжений [16 – 19] напрямую связана с поперечным размером изгибных контуров. При этом, чем меньше поперечный размер контура, тем выше амплитуда полей напряжений в данной области материала. Анализируя электронно-микроскопические изображения структуры металла сварного шва, было замечено, что наиболее узкие контуры формируются у межфазных границ включения – матрица (рис. 3). Такими включениями, выявленными методами просвечивающей электронной микроскопии, могут являться частицы цементита, расположенные в объеме и на грани-

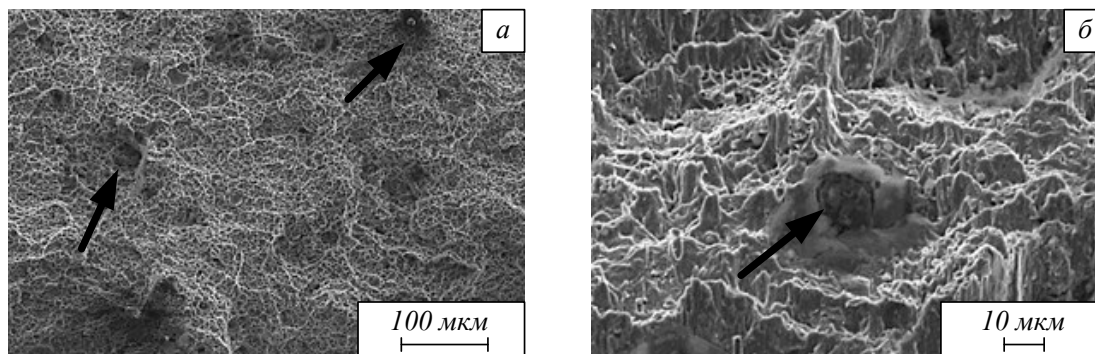


Рис. 1. Поверхность вязкого излома металла сварного шва образца 2 (стрелками указаны неметаллические включения)
Fig. 1. The surface of the viscous fracture of the weld metal of sample 2 (non-metallic inclusions are indicated by arrows)

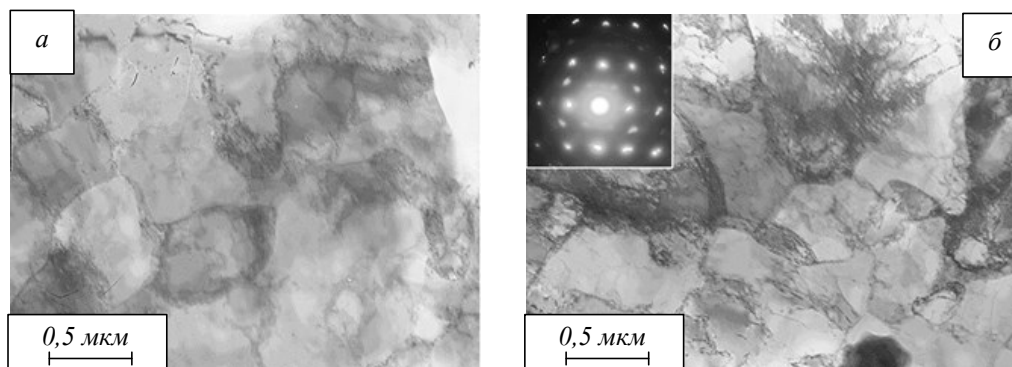


Рис. 2. Фрагментированная дислокационная субструктура металла сварного шва образцов 1 и 2 (а и б)
Fig. 2. Fragmented dislocation substructure of a weld metal of the samples 1 and 2:
а – sample 1; б – sample 2

цах зерен феррита, и частицы силицида железа округлой (сферической) формы, расположенные в объеме зерен феррита. Следовательно, включения второй фазы, присутствующие в металле сварного шва, являются концентраторами напряжений и могут быть центрами зарождения микротрещин при механическом воздействии на материал.

Электронно-микроскопические исследования металла сварного шва позволили выполнить количественный анализ характеристик структуры стали, результаты которого представлены в табл. 2 (где ρ – скалярная плотность дислокаций; ρ_{\pm} – избыточная плотность дислокаций; σ_d – вклад в упрочнение металла, обусловленный торможением подвижных дислокаций дислокациями «леса»; σ_d – вклад в упрочнение металла, обусловленный внутренними полями напряжений). Определяли скалярную и избыточную плотность дислокаций [19, 20], проводили оценку упрочнения металла вследствие присутствия дислокационной субструктуры и внутренних полей напряжений.

Скалярная и избыточная плотность дислокаций в структуре металла сварного шва 2 выше, чем в металле сварного шва 1. Более высокие

скалярная и избыточная плотности дислокаций металла сварного шва 2 относительно металла сварного шва 1 приводят к более высокому значению вклада в упрочнение металла, обусловленному торможением подвижных дислокаций дислокациями «леса», и вклада в упрочнение металла, обусловленного внутренними полями напряжений. Последнее указывает на более высокий уровень внутренних напряжений в сварном шве 2 и, возможно, на более значительное количество концентраторов напряжений, которые могут приводить к охрупчиванию материала данного образца.

Выводы

Методами сканирующей и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии проведены исследования структуры и фазового состава поверхности разрушения металла сварного шва. Показано, что в металле сварного шва при использовании флюса из шлака силикомарганца с добавкой ФД-УФС частицы второй фазы расположены хаотически, а в металле сварного шва без добавки частицы второй фазы декорируют границы зерен феррита. Анализ структуры поверхности разрушения

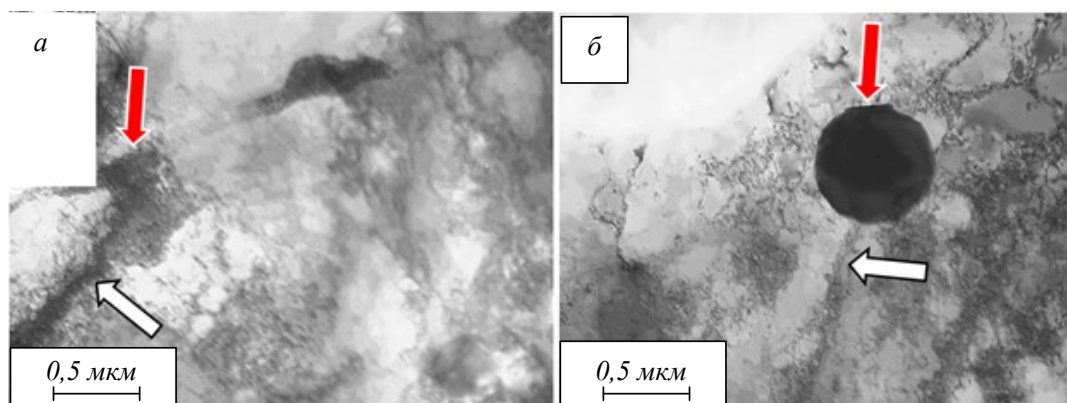


Рис. 3. Изгибные контуры экстинкции, присутствующие на электронно-микроскопических изображениях структуры металла сварного шва образцов 1 и 2 (а и б) (контуры указаны светлыми стрелками, включения второй фазы – темными стрелками)
Fig. 3. Flexural extinction contours present on electron microscopic images of the weld metal structure of samples 1 and 2 (contours are indicated by light arrows, inclusions of the second phase – by dark arrows):
а – sample 1; б – sample 2

Результаты анализа дефектной субструктуры и фазового состава металла сварного шва
Table 2. The results of the analysis of the defective substructure and phase composition of the weld

Параметр	Образец	
	1 (с добавкой ФД-УФС)	2 (без добавки)
$\rho \cdot 10^{-10}, \text{ см}^{-2}$	2,92	3,22
$\rho_{\pm} \cdot 10^{-10}, \text{ см}^{-2}$	2,04	2,87
$\sigma_{\text{д}}, \text{ МПа}$	340	360
$\sigma_{\text{д}}, \text{ МПа}$	285	465

исследуемых сварных швов выявил наличие немагнитических включений, характерных преимущественно для металла сварного шва без добавки, что может указывать на его повышенную хрупкость по сравнению с металлом сварного шва с использованием добавки ФД-УФС. Показано, что структура металла сварного шва без добавки характеризуется более высоким уровнем внутренних полей напряжений и, возможно, большим количеством концентраторов напряжений, которые могут приводить к охрупчиванию материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kozyrev N.A., Mikhno A.R., Usoltsev A.A., Kryukov R.E., Umanskiy A.A. Use of silicomanganese slag and ladle electric steelmaking slag in manufacturing the welding fluxes for surfacing the mining equipment // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Article 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/206/1/012032>
- Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Nepomnyashchikh A.S., Usoltsev A.A., Popova M. V. Development of a new flux-cored wire based on the gas cleaning dust of the silicomanganese // Welding International. 2020. Vol. 34. No. 10-12. P. 455–459. <https://doi.org/10.1080/09507116.2021.1964862>
- Liu L., Zhang Z., Song G., Shen Y. Effect of cadmium chloride flux in active flux TIG welding of magnesium alloys // Materials Transactions. 2006. Vol. 47. No. 2. P. 446–449. <https://doi.org/10.2320/matertrans.47.446>
- Eremin E.N., Losev A.S. Wear resistance increase of pipeline valves by overlaying welding flux-cored wire // Procedia Engineering. 2015. Vol. 113. P. 435–440. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.324>
- Kryukov R.E., Kozyrev N.A., Usoltsev A.A., Kozyreva O.E. New welding fluxes based on silicomanganese slag for deposition and welding of canopies and crib bed of mine support // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources. 2017. Article 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/84/1/012019>
- Kryukov N.E., Koval'skii I.N., Kozyrev N.A., Igushev V.F., Kryukov R.E. Arc welding of vertical oil tanks working at low temperatures // Welding International. 2013. Vol. 27. No. 7. P. 534–536. <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.715944>
- Gromov V.E., Yuriev A.B., Kryukov R.E., Kozyrev N.A., Ivanov Yu.F., Shliarova Yu.A., Semin A.P. Effect of carbon-fluorine additive to flux on the structure, defective substructure and fracture surface of electric arc surfacing of low-carbon wire // Journal of Materials Research and Technology. 2022. Vol. 18. P. 2104–2111. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.100>
- Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / Ю.А. Денисова, Ю.Ф. Иванов, О.В. Иванова, И.А. Иконникова, Н.Н. Коваль, О.В. Крысина, Е.А. Петрикова, А.Д. Тересов, В.В. Шугоров. Томск: Изд-во НТЛ, 2016. 303 с.
- Osintsev K.A., Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Panchenko I.A., Chen X. Effect of pulsed-electron-beam irradiation on the surface structure of a non-equiatom high-entropy alloy of the Al–Co–Cr–Fe–Ni system // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2021. Vol. 15. No. 4. P. 846–850. <https://doi.org/10.1134/S1027451021040340>
- Иванов Ю.Ф., Тересов А.Д., Петрикова Е.А., Иванова О.В., Романов Д.А. Разработка комплексной методики борирования нержавеющей стали концентрированными потоками энергии. В кн. Взаимодействие излучений с твердым телом. Материалы 13-й Международной конференции, Минск, 30 сентября – 03 октября 2019 г. Минск: Белорусский государственный университет, 2019. С. 251–254.
- Шалаева Е.В. Просвечивающая электронная микроскопия в исследовании фазовых превращений, упорядочения и разупорядочения в неорганических соединениях, сплавах, минералах // Минералы: строение, свойства, методы исследования. 2012. № 4. С. 65.
- Rakhadilov B.K., Tabiyeva Y.Y., Uazyrkhanova G.K., Zhurerova L.G., Popova N.A. Effect of electrolyte - plasma surface hardening on structure wheel steel 2 // Bulletin of the Karaganda

- University. Physics Series. 2020. No. 2 (98). P. 68–74. <https://doi.org/10.31489/2020Ph2/68-74>
13. Tabieva E., Zhurerova L.G., Baizhan D. Influence of electrolyte-plasma hardening technological parameters on the structure and properties of banding steel 2 // *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 839. P. 57–62.
 14. Ищенко А.А., Тарасов Ю.И., Рябов Е.А., Асеев С.А., Шефер Л. Сверхбыстрая просвечивающая электронная микроскопия // *Тонкие химические технологии*. 2017. № 12 (1). С. 5–25. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2017-12-1-5-25>
 15. Смирнов А.Н., Кречетов А.А., Глинка А.С. Структурно-фазовое состояние стали 35ХГС после механотермической обработки // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2010. № 6 (82). С. 47–51.
 16. Пимонов М.В., Романов Д.А., Чен Х.-Z. Структура поверхностного слоя стали 40Х после финишных этапов механической обработки резанием // *Физика и химия обработки материалов*. 2020. № 4. С. 17–30. <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2020-4-17-30>
 17. Belonogov E.K., Kushev S.B., Soldatenko S.A., Turaeva T.L. Morphology and structure characteristics of nanoscale carbon materials containing graphene // *Journal of Advanced Materials and Technologies*. 2021. Vol. 6. No. 4. P. 247–255. <https://doi.org/10.17277/jamt.2021.04.pp.247-255>
 18. Структурно-фазовые состояния и механизмы упрочнения деформированной стали / Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, Н.А. Попова и др. Новокузнецк: ООО Полиграфист, 2016. 510 с.
 19. Конева Н.А., Киселева С.Ф., Попова Н.А. Эволюция структуры и внутренние поля напряжений. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing RU, 2017. 148 с.
 20. Абабков Н.В., Смирнов А.Н., Попова Н.А., Конева Н.А., Никоненко Е.Л. Исследование структуры и свойств металла разрушенного и не разрушенного паропроводов из стали 20 после одинакового срока эксплуатации // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2018. Т. 15. № 2. С. 176–181. <https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2018.02.002>
- REFERENCES**
1. Kozyrev N.A., Mikhno A.R., Usoltsev A.A., Kryukov R.E., Umanskiy A.A. Use of silicomanganese slag and ladle electric steelmaking slag in manufacturing the welding fluxes for surfacing the mining equipment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018, article 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/206/1/012032>
 2. Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Nepomnyashchikh A.S., Usoltsev A.A., Popova M. V. Development of a new flux-cored wire based on the gas cleaning dust of the silicomanganese. *Welding International*. 2020, vol. 34, no. 10-12, pp. 455–459. <https://doi.org/10.1080/09507116.2021.1964862>
 3. Liu L., Zhang Z., Song G., Shen Y. Effect of cadmium chloride flux in active flux TIG welding of magnesium alloys. *Materials Transactions*. 2006, vol. 47, no. 2, pp. 446–449. <https://doi.org/10.2320/matertrans.47.446>
 4. Eremin E.N., Losev A.S. Wear resistance increase of pipeline valves by overlaying welding flux-cored wire. *Procedia Engineering*. 2015, vol. 113, pp. 435–440. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.324>
 5. Kryukov R.E., Kozyrev N.A., Usoltsev A.A., Kozyreva O.E. New welding fluxes based on silicomanganese slag for deposition and welding of canopies and crib bed of mine support. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources*. 2017, article 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/84/1/012019>
 6. Kryukov N.E., Koval'skii I.N., Kozyrev N.A., Igyushev V.F., Kryukov R.E. Arc welding of vertical oil tanks working at low temperatures. *Welding International*. 2013, vol. 27, no. 7, pp. 534–536. <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.715944>
 7. Gromov V.E., Yuriev A.B., Kryukov R.E., Kozyrev N.A., Ivanov Yu.F., Shliarova Yu.A., Semin A.P. Effect of carbon-fluorine additive to flux on the structure, defective substructure and fracture surface of electric arc surfacing of low-carbon wire. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022, vol. 18, pp. 2104–2111. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.100>
 8. Denisova Yu.A., Ivanov Yu.F., Ivanova O.V., Ikonnikova I.A., Koval' N.N., Krysina O.V., Petrikova E.A., Teresov A.D., Shugorov V.V., Koval' N.N., Ivanov Yu.F. *Evolution of the structure of the surface layer of steel subjected to electron-ion-plasma processing methods*. Tomsk: Publishing house of NTL, 2016. 303 p. (In Russ.).
 9. Osintsev K.A., Gromov V.E., Kononov S.V., Ivanov Yu.F., Panchenko I.A., Chen X. Effect of pulsed-electron-beam irradiation on the surface structure of a non-equiatomic high-entropy alloy of the Al–Co–Cr–Fe–Ni system. *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2021, vol. 15, no. 4, pp. 846–850. <https://doi.org/10.1134/S1027451021040340>
 10. Ivanov Yu.F., Teresov A.D., Petrikova E.A., Ivanova O.V., Romanov D.A. Development of a comprehensive technique for borating stain-

- less steel with concentrated energy flows. In: «The interaction of radiation with a solid». *Proceedings of the 13th International Conference*, Minsk, September 30 – October 03, 2019. Minsk: Belarusian State University, 2019, pp. 251–254. (In Russ.).
11. Shalaeva E.V. Transmission electron microscopy in the study of phase transformations, ordering and disordering in inorganic compounds, alloys, minerals. *Minerals: structure, properties, research methods*. 2012, no. 4, pp. 65. (In Russ.).
 12. Rakhadilov B.K., Tabiyeva Y.Y., Uazyrkhanova G.K., Zhurerova L.G., Popova N.A. Effect of electrolyte - plasma surface hardening on structure wheel steel 2. *Bulletin of the Karaganda University. Physics Series*. 2020, no. 2 (98), pp. 68–74. <https://doi.org/10.31489/2020Ph2/68-74>
 13. Tabieva E., Zhurerova L.G., Baizhan D. Influence of electrolyte-plasma hardening technological parameters on the structure and properties of banding steel 2. *Key Engineering Materials*. 2020, vol. 839, pp. 57–62.
 14. Ishchenko A.A., Tarasov Yu.I., Ryabov E.A., Aseev S.A., Shefer L. Ultrafast transmission electron microscopy. *Fine chemical technologies*. 2017, no. 12 (1), pp. 5–25. (In Russ.). <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2017-12-1-5-25>
 15. Smirnov A.N., Krechetov A.A., Glinka A.S. Structural-phase state of 35KHGS steel after mechanochemical treatment. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2010, no. 6 (82), pp. 47–51. (In Russ.).
 16. Pimonov M.V., Romanov D.A., Chen X.-Z. The structure of the surface layer of 40X steel after the finishing stages of mechanical processing by cutting. *Physics and chemistry of materials processing*. 2020, no. 4, pp. 17–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2020-4-17-30>
 17. Belonogov E.K., Kushev S.B., Soldatenko S.A., Turaeva T.L. Morphology and structure characteristics of nanoscale carbon materials containing graphene. *Journal of Advanced Materials and Technologies*. 2021, vol. 6, no. 4, pp. 247–255. <https://doi.org/10.17277/jamt.2021.04.pp.247-255>
 18. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Popova N.A. et al. *Structural-phase states and mechanisms of hardening of deformed steel*. Novokuznetsk: OOO Polygraphist, 2016, 510 p. (In Russ.).
 19. Koneva N.A., Kiseleva S.F., Popova N.A. *Evolution of the structure and internal stress fields*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing RU, 2017, 148 p. (In Russ.).
 20. Ababkov N.V., Smirnov A.N., Popova N.A., Koneva N.A., Nikonenko E.L. Investigation of the structure and properties of the metal of destroyed and undisturbed steam pipes made of steel 20 after the same service life. *Fundamental problems of modern materials science*. 2018, vol. 15, no. 2, pp. 176–181.

(In Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2018.02.002>

Сведения об авторах

Роман Евгеньевич Крюков, к.т.н., доцент, доцент кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: rek_nzrmk@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3394-7941

Виктор Евгеньевич Громов, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-5147-5343

Алексей Романович Михно, аспирант института машиностроения и транспорта, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: mikno-mm131@mail.ru

ORCID: 0000-0002-7305-6692

Андрей Владимирович Жуков, аспирант института машиностроения и транспорта, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: svarka42@mail.ru

Information about the authors

Roman E. Kryukov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-3394-7941

E-mail: rek_nzrmk@mail.ru

Viktor E. Gromov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-5147-5343

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Aleksii R. Mikhno, Postgraduate student of the Institute of Mechanical Engineering and Transport, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-7305-6692

E-mail: mikno-mm131@mail.ru

Andrey V. Zhukov Postgraduate student of the Institute of Mechanical Engineering and Transport, Siberian State Industrial University

E-mail: svarka42@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 17.10.2022

После доработки 17.11.2022

Принята к публикации 21.11.2022

Received 17.10.2022

Revised 17.11.2022

Accepted 21.11.2022