

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.791.011

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-1-42-47



ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Шекшеев М.А., Ширяева Е.Н.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): статья посвящена проблемам формирования структур наплавленного металла низкоуглеродистых сталей. Повышение работоспособности сварных соединений обуславливает необходимость применения технологических решений и приемов, которые улучшают структуру наплавленного металла и обеспечивают высокий уровень механических свойств. В работе проводится сравнительный анализ применения стационарных и импульсных режимов механизированной дуговой сварки и применения нано- и ультрадисперсных инокуляторов монокарбида вольфрама WC для управления структурообразованием наплавленного металла шва. **Используемые методы:** исследуемые образцы были получены способами дуговой сварки с последующим изготовлением шлифов для микроисследований. Для исследования структуры наплавленных образцов применялась световая металлография и измерение твердости по методу Виккерса. Анализ микроструктуры выполнялся с помощью световых микроскопов Meiji Techno и Микромед-Мет с применением системы компьютерного анализа изображений Thixomet Pro. Твердость наплавленного металла измеряли по методу Виккерса с помощью прибора HV-1000. **Новизна:** получены новые данные по сравнению эффективности применения стационарных и импульсных режимов механизированной дуговой сварки и применения нано- и ультрадисперсных частиц инокулятора монокарбида вольфрама WC для управления структурообразованием наплавленного металла шва. **Результат:** получены варианты структур металла при различных вариантах технологического воздействия на расплав сварочной ванны. Из анализа результатов металлографических исследований можно заключить, что наилучший вариант формирования структуры наплавленного металла достигается путем введения в расплав сварочной ванны инокулирующих нано- и ультрадисперсных частиц монокарбида вольфрама. **Практическая значимость:** полученные в результате исследований данные могут быть применены при проектировании технологических процессов сварки и наплавки низкоуглеродистых, низколегированных сталей, а также при разработке новых функциональных сварочных материалов.

Ключевые слова: сварка, наплавка, покрытый электрод, сварочная проволока, структура металла, твердость, нанопорошок, инокулирование, модифицирование.

Работа выполнена в рамках государственной поддержки молодых российских ученых – гранта Президента РФ (№ МК-3849.2021.4)

© Шекшеев М.А., Ширяева Е.Н., 2021

Для цитирования

Шекшеев М.А., Ширяева Е.Н. Формирование структуры наплавленного металла низкоуглеродистой стали при различных технологических воздействиях // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №1. С. 42–47. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-42-47>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

FORMING THE STRUCTURE OF DEPOSITED METAL OF LOW-CARBON STEEL UNDER VARIOUS TYPES OF TREATMENT

Sheksheev M.A., Shiryaeva E.N.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance): The paper is devoted to the problems of forming the structures of deposited metal of low-carbon steels. Improving the performance of welded joints contributes to the use of technological solutions and techniques that improve the structure of deposited metal and provide a high level of mechanical properties. The paper presents a comparative analysis of stationary and pulse modes of mechanized arc welding and nano- and ultra-dispersed inoculators of tungsten monocarbide WC to control the structure formation of deposited weld metal. **Methods Applied:** The samples under study were manufactured by arc welding methods followed by the production of metallographic samples for microanalysis. Light metallography and Vickers hardness measurement were used to study the structure of the deposited samples. The microstructure was analyzed using Meiji Techno and Micromed-Met light microscopes using the Thixomet Pro computer image analysis system. Hardness of the deposited metal was measured using the Vickers method on an HV-1000 hardness tester. **Originality:** New data were obtained to compare efficiency of stationary and pulse modes of mechanized arc welding and nano- and ultra-dispersed inoculators of tungsten monocarbide WC for controlling the structure formation of deposited weld metal. **Findings:** The authors got options of the metal structures under various types of treatment of the molten bath. Having analyzed metallographic studies, we may conclude that the best option of forming the structure of deposited metal is achieved by adding to the molten bath inoculating nano- and ultra-dispersed particles of tungsten monocarbide. **Practical Relevance:** The data obtained as a result of the research may be applied in the design of technological processes of welding and surfacing of low-carbon, low-alloy steels, as well as in the development of new functional welding materials.

Keywords: welding, surfacing, coated electrode, welding wire, metal structure, hardness, nanopowder, inoculation, modification.

The research was carried out as part of the state support of young Russian researchers – the grant of the President of the Russian Federation (No. MK-3849.2021.4).

For citation

Sheksheev M.A., Shiryaeva E.N. Forming the Structure of Deposited Metal of Low-Carbon Steel Under Various Types of Treatment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 1, pp. 42–47. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-42-47>

Введение

Применение новых высокопрочных материалов при изготовлении металлоконструкций [1–4] обусловило необходимость применения прогрессивных технологий для их сварки и наплавки [5–7].

Работоспособность металла сварных соединений определяется их структурой и комплексом механических свойств, сформировавшихся в условиях термических циклов сварки [8–10].

Существуют различные технологические приемы, которые позволяют управлять структурообразованием металла сварочной ванны как в момент ее кристаллизации, так и спустя какое-то время после завершения этого процесса [11,12].

Одним из таких способов является применение импульсных режимов, когда в процессе сварки с определенной частотой через электрод, помимо постоянного тока, подается импульсный ток, который влияет на формирование и отделение капли расплавленного металла с торца элект-

рода. Однако такой способ возможно реализовать только при применении сварки в среде защитных газов.

Другим вариантом управления формированием структуры металла шва является применение функциональных сварочных материалов с особыми свойствами. В частности, применение штучных электродов для ручной дуговой сварки с покрытием, содержащим в себе нано- и ультрадисперсные тугоплавкие компоненты, позволяет влиять на образование первичной структуры металла шва [13,14].

К сварным соединениям низкоуглеродистых и низколегированных сталей предъявляют повышенные требования к параметрам их качества. Поэтому целью настоящей работы являются сравнительные исследования влияния нано- и ультрадисперсных тугоплавких компонентов и стационарного и импульсного режимов сварки на структуру и механические свойства металла сварных соединений низкоуглеродистой стали.

Материалы и методы исследования

Тестовые образцы наплавленного металла получали путем сварки фрагментов проката из стали 20 размерами 330×100×10 мм со стандартной V-образной разделкой.

Механизированную сварку осуществляли в смеси защитных газов (72% Ar + 18% CO₂) сварочной омедненной проволокой марки Св-08Г2С диаметром 1,2 мм. Для сварки образцов использовали аппарат фирмы EWM Phoenix 500 pulse. Сварку осуществляли на стационарных и импульсных режимах с током до 200 А обратной полярности.

Ручную дуговую сварку осуществляли электродами с экспериментальным покрытием основного типа и стержнем из стали Св-08А диаметром 3,0 мм. В одном варианте покрытие содержало нано- и ультрадисперсные частицы монокрибида вольфрама WC (рис. 1) в количестве 0,4% от массы сухой смеси покрытия. В другом варианте покрытие электродов частиц WC не содержало. В качестве источника питания сварки применяли аппарат инверторного типа фирмы EWM Pico 230. Сварку осуществляли на токе до 130 А обратной полярности.

Анализ микроструктуры выполнялся на поперечных травленных образцах сварных соединений с помощью световых микроскопов Meiji Techno и Микромед-Мет с применением системы компьютерного анализа изображений Thixomet Pro.

Твердость наплавленного металла измеряли по методу Виккерса с помощью прибора HV-1000. Производили не менее трех измерений при нагрузке на индентор 0,3 кгс.

Полученные результаты и их обсуждение

Металлографический анализ образцов, полученных механизированной сваркой на стационарных режимах, показал, что металл шва имеет литую структуру с характерными столбчатыми образованиями. Крупные столбчатые кристаллиты окружены оторочкой периферийного феррита с прорастающими из нее вглубь кристалла игольчатыми образованиями видманштеттового феррита (рис. 2). Периферийный феррит образует непрерывную матрицу, которая как бы опоясывает кристаллы.

Структура образцов, выполненных на импульсных режимах сварки, также имеет столбчатое строение, однако в строении периферийного феррита наблюдается раздробленность на отдельные фрагменты (рис. 3). Наблюдается скудность образований избыточного и видманштеттового феррита. Игольчатые образования прорастают практически на всю глубину кристаллитов.

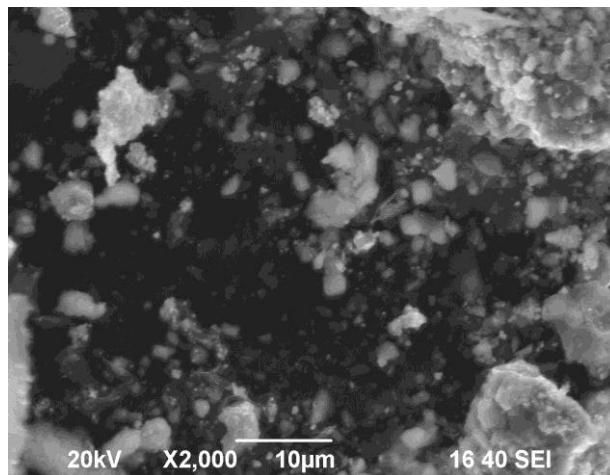


Рис. 1. Порошок монокрибида вольфрама WC (размер частиц до 50 нм), ×2000

Fig. 1. Powder of tungsten monocarbide WC (the particle size is up to 50 nm), ×2000



Рис. 2. Структура металла шва, выполненная проволокой Св-08Г2С на стационарных режимах, ×100

Fig. 2. The structure of the weld metal made with Sv-08G2S wire in stationary modes, ×100

Твердость наплавленного металла обоих образцов находится в диапазоне 221–238 единиц HV.

Анализ образцов, полученных ручной дуговой сваркой покрытыми электродами, не содержащими инокулирующих компонентов, показал, что металл шва имеет крупнокристаллическую структуру с твердостью 218–232 единиц HV (рис. 4). Данный тип структуры типичен для швов, выполненных электродами, предназначенными для сварки низкоуглеродистых, низколегированных сталей. Наблюдаются образования периферийного феррита, выпавшего по границам первичных зерен (кристаллов) с незначительными включениями видманштеттового феррита.

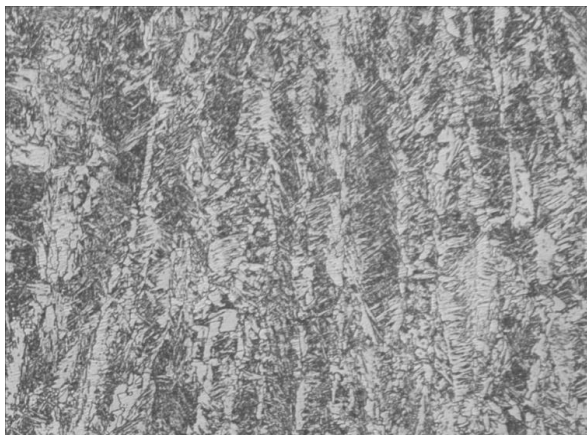


Рис. 3. Структура металла шва, выполненная проволокой Св-08Г2С на импульсных режимах, $\times 100$

Fig. 3. The structure of the weld metal made with Sv-08G2S wire in pulse modes, $\times 100$

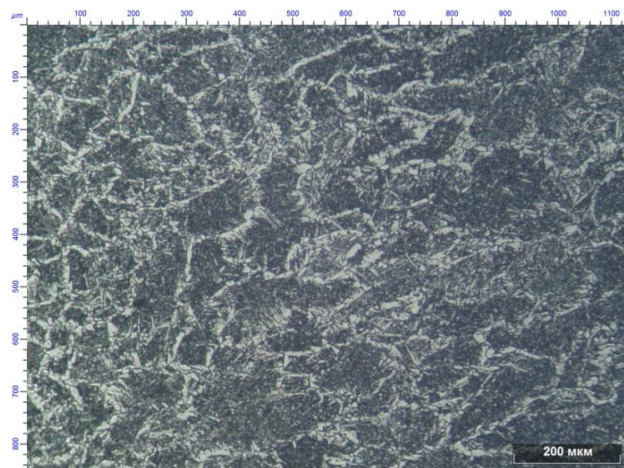


Рис. 5. Структура металла шва, выполненного экспериментальными электродами, содержащими частицы WC, $\times 100$

Fig. 5. Structure of the weld metal made with experimental electrodes containing WC particles, $\times 100$

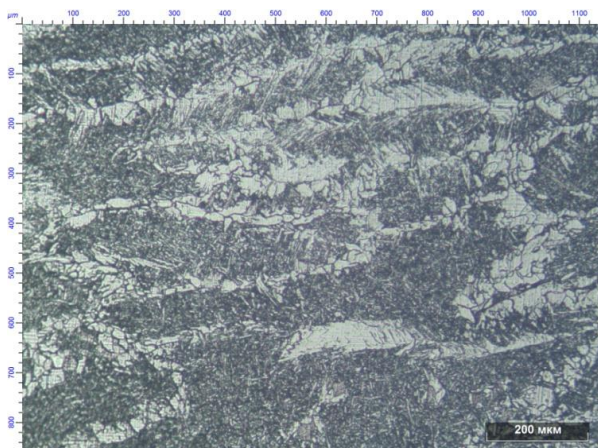


Рис. 4. Структура металла шва, выполненного экспериментальными электродами, не содержащими частиц WC, $\times 100$

Fig. 4. The structure of the weld metal made with experimental electrodes that do not contain WC particles, $\times 100$

Металл шва, полученный электродами, содержащими в своем покрытии нано- и ультрадисперсные частицы WC, имеет четко выраженную ячеистую структуру с твердостью 230–242 единиц HV (рис. 5). Кристаллиты имеют глобулярную морфологию и окружены сеткой периферийного феррита, образующего непрерывную матрицу. В сравнении с металлом, не подвергшимся инокулированию частицами WC, кристаллиты в рассматриваемом образце имеют более равновесное состояние и заметно меньший размер.

Проанализировав результаты металлографических исследований, можно заключить, что наилучший вариант формирования структуры наплавленного металла достигается путем введения в расплав сварочной ванны инокулирующих нано- и ультрадисперсных компонентов, в частности монокарбида вольфрама.

При импульсном воздействии тока морфология кристаллитов не изменяется, но при этом происходит дробление границ этих кристаллов (периферийного феррита) на фрагменты неправильной формы, которые во многом формируют объем структуры наплавленного металла.

При введении в металл сварочной ванны частиц-инокуляторов последние выступают в качестве искусственных центров кристаллизации и стимулируют процесс образования кристаллов не только от границ оплавленного металла, но и непосредственно в объеме расплава. Тем самым достигается эффект объемной кристаллизации с образованием более равновесной структуры.

Заключение

Таким образом, на основе результатов проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Структура металла, наплавленного проволокой Св-08Г2С на стационарных режимах, характеризуется наличием столбчатых кристаллитов, окруженных оторочкой периферийного феррита с прорастающими из нее вглубь кристаллов игольчатыми образованиями видманштеттовой структуры. Твердость металла составляет 221–238 единиц HV.

2. Металл, наплавленный проволокой Св-08Г2С на импульсных режимах, имеет столбчатую структуру, при этом сетка периферийного феррита раздроблена на фрагменты. Наблюдается скученность образований избыточного и видманштеттового феррита. Твердость

металла составляет 227–234 единиц HV.

3. Сварной шов, полученный экспериментальными электродами, не содержащими инокулирующих компонентов, имеет крупнокристаллическую структуру, типичную для швов низкоуглеродистых сталей. Твердость металла составляет 218–232 единиц HV.

4. Металл шва, полученный электродами, содержащими в своем покрытии нано- и ультра-

дисперсные частицы WC, имеет ячеистую структуру. Кристаллиты глобулярной морфологии окружены сеткой периферийного феррита, образующего непрерывную матрицу. Твердость металла составляет 230–242 единиц HV.

5. Наилучший вариант формирования структуры наплавленного металла достигается путем введения в расплав сварочной ванны инокулирующих нано- и ультрадисперсных компонентов.

Список литературы

1. Назначение и область применения ультрахладостойкого наноструктурированного листового проката / П.П. Полецков, К. Хакимуллин, Д.Г. Набатчиков и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15, № 2. С. 85–88.
2. Анализ мирового уровня разработок в области производства горячекатаного высокопрочного хладостойкого листового проката с пределом текучести ≥ 600 Н/мм² / П.П. Полецков, А.С. Кузнецова, Д.Ю. Алексеев и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т. 18. № 4. С. 32–38.
3. Исследование структуры и свойства сварных соединений арматурного проката класса прочности А500С / М.А. Шекшеев, С.В. Михайлицын, А.Б. Сычков и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 12. С. 925–929.
4. Особенности структурообразования и формирования свойств сварных соединений из арматурных сталей классов прочности А500С и В500С / М.А. Шекшеев, А.Б. Сычков, С.В. Михайлицын и др. // Черные металлы. 2021. №2. С. 28–33.
5. Разработка технологии механизированной сварки в среде защитных газов сталей типа 15Х5М / А.А. Халимов, А.Г. Халимов, А.С. Надршин и др. // Нефтегазовое дело. 2016. Т. 14. № 2. С. 179–187.
6. Структура и твердость наплавленных на низкоуглеродистую сталь износостойких покрытий при низкочастотной модуляции тока / Ю.Н. Сараев, В.П. Безбородов, М.В. Перовская и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 6. С. 469–473.
7. Сараев Ю.Н. Совершенствование технологий сварки и наплавки на основе методов адаптивного импульсного управления энергетическими параметрами режима для производства и ремонта конструкций ответственного назначения в условиях низких климатических температур // Тяжелое машиностроение. 2018. № 7–8. С. 14–22.
8. Воздействие на факторы образования холодных трещин сварного соединения стали 10Г2ФБЮ посредством регулирования погонной энергии / А.Г. Алрухайми, М.А. Иванов, А.К. Тиньгаев и др. // Сварочное производство. 2020. № 2. С. 3–11.
9. Повышение механических характеристик сварных соединений из стали класса прочности К65 / М.В. Шахматов, Д.С. Яковлев, А.Н. Маковецкий и др. // Сварка и диагностика. 2015. № 5. С. 52–55.
10. Шахматов М.В., Яковлев Д.С. Моделирование тепловых процессов при многодуговой сварке // Сварка и диагностика. 2015. № 2. С. 49–53.
11. Исследование влияния рода тока и алгоритма его модуляции на эксплуатационные показатели сварных соединений / Ю.Н. Сараев, А.Г. Лунев, А.С. Киселев и др. // Сварочное производство. 2019. № 3. С. 3–8.
12. Сараев Ю.Н. Анализ направлений совершенствования технологических процессов сварки и наплавки на основе методов управляемого высокоэнергетического воздействия на характеристики тепломассопереноса при импульсно-дуговых технологиях сварки и наплавки // Евразийское Научное Объединение. 2017. Т. 1. № 11 (33). С. 47–50.
13. Исследование влияния ультрадисперсных частиц монокарбида вольфрама на структуру наплавленного металла / М.А. Шекшеев, С.В. Михайлицын, А.Б. Сычков и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Металлургия. 2018. Т. 18. № 4. С. 128–136.
14. Разработка сварочных электродов с композитным наномодифицирующим покрытием / М.А. Шекшеев, С.В. Михайлицын, А.Б. Сычков и др. // Заготовительные производства в машиностроении. 2019. Т. 17. № 6. С. 252–254.

References

1. Poletskov P.P., Khakimullin K., Nabatchikov D.G. et al. Purpose and scope of application of ultra-cold-resistant nanostructured steel sheets. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 2, pp. 85–88. (In Russ.)

2. Poletskov P.P., Kuznetsova A.S., Alekseev D.Yu. et al. Analysis of world development in the production of hot-rolled high-strength cold-resistant steel sheets with a yield strength of $\geq 600 \text{ N / mm}^2$. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2020, vol. 18, no. 4, pp. 32–38. (In Russ.)
3. Sheksheev M.A., Mikhailitsyn S.V., Sychkov A.B. et al. Study on the structure and properties of welded joints of reinforced rolled products of strength class A500C. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2019, vol. 62, no. 12, pp. 925–929. (In Russ.)
4. Sheksheev M.A., Sychkov A.B., Mikhailitsyn S.V. et al. Features of structure formation and formation of properties of welded joints made of reinforcing steels of strength classes A500C and B500C. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2021, no. 2, pp. 28–33. (In Russ.)
5. Khalimov A.A., Khalimov A.G., Nadrshin A.S. et al. Development of the technology of mechanized protective gas shielded welding of steels of the 15Kh5M type. *Neftegazovoe delo* [Oil and Gas Business], 2016, vol. 14, no. 2, pp. 179–187. (In Russ.)
6. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P., Perovskaya M.V. et al. The structure and hardness of wear-resistant coatings deposited on low-carbon steel under low-frequency current modulation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2020, vol. 63, no. 6, pp. 469–473. (In Russ.)
7. Saraev Yu.N. Improvement of welding and surfacing technologies based on the methods of adaptive pulse control of the energy parameters of the mode for the production and repair of critical structures at low climatic temperatures. *Tyazheloe mashinostroenie* [Heavy Engineering], 2018, no. 7–8, pp. 14–22. (In Russ.)
8. Alrukhaimi A.G., Ivanov M.A., Tingaev A.K. et al. Influence on factors of formation of cold cracks of a welded joint of 10G2FBYu steel grade by regulating heat input. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding Production], 2020, no. 2, pp. 3–11. (In Russ.)
9. Shakhmatov M.V., Yakovlev D.S., Makovetsky A.N. et al. Improving the mechanical characteristics of welded joints made of steel of strength class K65. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics], 2015, no. 5, pp. 52–55. (In Russ.)
10. Shakhmatov M.V., Yakovlev D.S. Modeling of thermal processes in multi-arc welding. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics], 2015, no. 2, pp. 49–53. (In Russ.)
11. Saraev Yu.N., Lunev A.G., Kiselev A.S. et al. Study on the influence of the type of current and its modulation algorithm on performance of welded joints. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding Production], 2019, no. 3, pp. 3–8. (In Russ.)
12. Saraev Yu.N. Analysis of areas for improving the technological processes of welding and surfacing based on the methods of controlled high-energy influence on the characteristics of heat and mass transfer in pulse-arc welding and surfacing technologies. *Evraziyskoe Nauchnoe Obединenie* [Eurasian Scientific Association], 2017, vol. 1, no. 11, pp. 47–50. (In Russ.)
13. Sheksheev M.A., Mikhailitsyn S.V., Sychkov A.B. et al. Study on the effect of ultrafine particles of tungsten monocarbide on the structure of deposited metal. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya* [South Ural State University Bulletin. Series: Metallurgy], 2018, vol. 18, no. 4, pp. 128–136. (In Russ.)
14. Sheksheev M.A., Mikhailitsyn S.V., Sychkov A.B., et al. Development of welding electrodes with a composite nanomodifying coating. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Blank Production in Mechanical Engineering], 2019, vol. 17, no. 6, pp. 252–254. (In Russ.)

Поступила 24.02.2021; принята к публикации 15.03.2021; опубликована 25.03.2021
Submitted 24/02/2021; revised 15/03/2021; published 25/03/2021

Шекшеев Максим Александрович – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: shecsheev@yandex.ru. ORCID 0000-0003-4790-2821

Ширяева Елена Николаевна – аспирант,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: e.shyryaeva@mail.ru. ORCID 0000-0001-5143-3285

Maxim A. Sheksheev – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia
Email: shecsheev@yandex.ru. ORCID 0000-0003-4790-2821

Elena N. Shiryayeva – PhD student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia
Email: e.shyryaeva@mail.ru. ORCID 0000-0001-5143-3285