

УДК 621.791.92

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НАПЛАВЛЕННЫХ НОВОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V

И. В. Осетковский, Н. А. Козырев, Е. А. Будовских, А. Р. Михно, Л. П. Башченко

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

Аннотация. Методами световой и растровой электронной микроскопии, рентгеноспектрального микроанализа, определения микротвердости выявлены особенности микроструктуры электродуговых покрытий, наплавленных порошковой проволокой (состав проволоки 0,40 % C, 0,78 % Si, 1,04 % Mn, 1,61 % Cr, 0,49 % Ni, 0,51 % Mo, 0,65 % V, 0,001 % Co, 0,001 % W, 0,07 % Cu, 0,059 % S, 0,02 % P). Показано, что по структуре металлическая основа покрытий имеет столбчатое строение и представляет собой грубоиглочатый мартенсит. В структуре слоев выявлены неметаллические включения глобулярного вида двух размерных групп со средними размерами 12 и 27 мкм, образованные оксидами алюминия, марганца и кремния. На шлифах наблюдаются многочисленные мелкие включения сульфидов неправильной глобулярной формы диаметром 3 – 4 мкм. Толщина покрытий 3 мм, глубина зоны термического влияния, сформированной при смешивании наплавочного материала с материалом подложки, – 5 мм. Распределение микротвердости отражает двуслойное строение модифицированной поверхности, в наплавленном слое микротвердость достигает 500 HV (50 HRC), в зоне термического влияния – 300 HV (35 HRC).

Ключевые слова: порошковая проволока, электродуговая наплавка, структура, мартенсит, оксиды, сульфиды, микротвердость

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания (шифр темы 0809-2021-0013).

Для цитирования: Осетковский И.В., Козырев Н.А., Будовских Е.А., Михно А.Р., Башченко Л.П. Особенности структуры и свойств наплавленных новой порошковой проволокой электродуговых покрытий системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 2 (40). С. 17 – 22.

FEATURES OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF ELECTRIC ARC COATING SYSTEMS Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V DEPOSITED BY NEW FLUX-CORED WIRE

I. V. Osetkovskii, N. A. Kozyrev, E. A. Budovskikh, A. R. Mikhno, L. P. Bashchenko

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

Abstract. Using the methods of light and scanning electron microscopy, X-ray spectral microanalysis, determination of microhardness, the microstructure features of electric arc coatings deposited with flux-cored wire are revealed (wire composition 0.40 % C, 0.78 % Si, 1.04 % Mn, 1.61% Cr, 0.49% Ni, 0.51 % Mo, 0.65 % V, 0.001 % Co, 0.001 % W, 0.07 % Cu, 0.059 % S, 0.02 % P). It is shown that the structure of coatings metal base has a columnar structure of a coarse-needle martensite. In the structure of the layers, nonmetallic inclusions of a globular type of two dimensional groups with average sizes of 12 and 27 μm formed by aluminum, manganese and silicon oxides were revealed. Numerous small inclusions of sulfides of irregular globular shape with a diameter of 3 – 4 μm were observed on the sections. The thickness of the coatings is 3 mm, the depth of the thermal influence zone formed by mixing the surfacing material with the substrate material is 5 mm. The

microhardness distribution reflects the two-layer structure of the modified surface, in the deposited layer the microhardness reaches 500 HV (50 HRC), in the zone of thermal influence – 300 HV (35 HRC).

Keywords: flux-cored wire, electric arc coating, structure, properties, martensite, oxides, sulfides, microhardness

Funding: The research was supported within the framework of the state assignment (subject code 0809-2021-0013).

For citation: Osetkovskii I.V., Kozyrev N.A., Budovskikh E.A., Mikhno A.R., Bashchenko L.P. Features of the structure and properties of electric arc coating systems Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V deposited by new flux-cored wire // Bulletin of SibSIU. 2022, no. 2, pp. 17 – 22 (In Russ.).

Введение

Электродуговая наплавка широко применяется для защиты от абразивного износа технологического оборудования в металлургической, горнодобывающей, строительной и других отраслях промышленности [1, 2]. Как правило, пэтом используются дорогостоящие зарубежные наплавочные материалы, которые не всегда соответствуют предъявляемым требованиям. Это обуславливает актуальность разработки новых наплавочных материалов, обеспечивающих оптимальные структуру и свойства защитных покрытий в конкретных условиях эксплуатации.

Универсальным сварочным материалом является порошковая проволока, которая пригодна для наплавки слоев с особыми свойствами, в частности для защиты от абразивного изнашивания [3 – 5]. В ряде исследований в этом направлении разрабатываются новые составы порошковых проволок для защиты поверхности горно-шахтного оборудования [6 – 10].

Целью настоящей работы является исследование структуры кристаллизации и неметаллических включений, а также изучение распределения твердости по глубине покрытий системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V, наплавленных новой порошковой проволокой электродуговым методом.

Материалы и методы исследования

Экспериментальные исследования включали изготовление порошковой проволоки, автоматическую наплавку покрытий под флюсом, механическую обработку, подготовку образцов для исследований.

Состав порошковой проволоки для наплавки подбирали, исходя из необходимости защиты поверхности от абразивного изнашивания. В настоящей работе для обеспечения повышения срока службы деталей (шнека угольного комбайна) горно-шахтного оборудования использовали следующий новый состав порошковой проволоки и электродуговых покрытий системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V: 0,40 % C, 0,78 % Si, 1,04 % Mn, 1,61 % Cr, 0,49 % Ni, 0,51

% Mo, 0,65 % V, 0,001 % Co, 0,001 % W, 0,07 % Cu, 0,059 % S, 0,02 % P (по массе). Использовали углеродфторсодержащий материал, изготовленный из техногенных отходов (пыли газоочистки производства алюминия).

Наплавку пластин из стали 09Г2С размерами 200×150×10 мм проводили сварочным трактором ASAW-1250 в два слоя. Для наплавки использовали флюс АН-26С. Для проволоки диаметром 6 мм приемлемое качество наплавляемого валика с минимальным содержанием газовых пор получено при режиме: сила тока – 450 А, напряжение – 30 В, скорость сварки – 10 м/мин.

Изучение микроструктуры наплавленных покрытий проводили на поперечных шлифах после полировки до и после травления 4 %-ым спиртовым раствором азотной кислоты.

Распределение химического состава по элементам структуры изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа MIRA 3 LMN. Количественный анализ химического состава включений проводили по двум спектрам в каждом из двух выявленных размерных типов включений.

Микротвердость по Виккерсу HV под нагрузкой 49 Н измеряли с помощью микротвердомера Qness 60 M EVO, оснащенного объективами для структурного анализа. Измерения проводили от поверхности покрытия вглубь с интервалом 1,0 мм. Полученные значения переводили в единицы HRC.

Обсуждение результатов

Особенности структуры кристаллизации. При исследовании микроструктуры наплавленного металла образцов после химического травления установлено, что она имеет дендритное (столбчатое) строение, характерное для литого металла, и представляет собой грубоигольчатый мартенсит (рис. 1).

Анализ размеров и химического состава включений. При исследовании загрязненности наплавленных слоев на шлифах выявлены однотипные включения глобулярного вида трех размерных групп со средними размерами 3 – 4, 12 и 27 мкм.

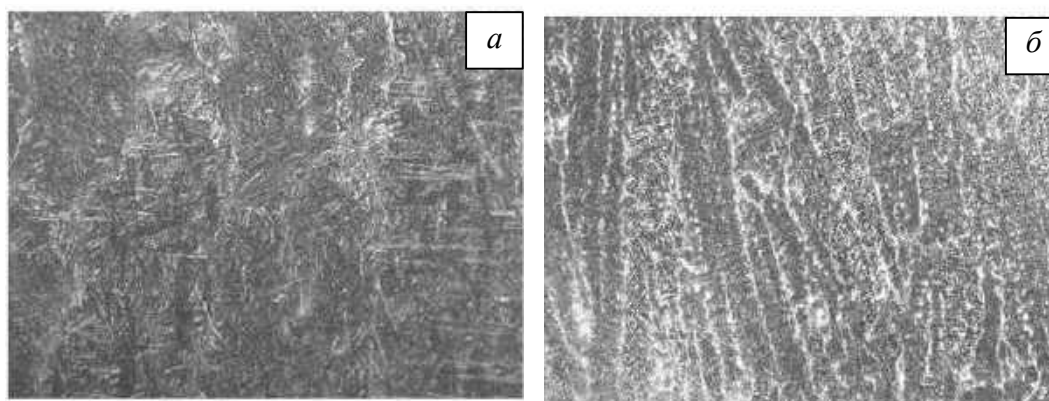


Рис. 1. Микроструктура наплавленного слоя при увеличении 500 (а) и 100 (б)
Fig. 1. Microstructure of the deposited layer at magnification of 500 (a) and 100 (b)

Мелкие включения неправильной глобулярной формы обогащены серой и включают марганец (рис. 2). В составе включений второй группы обнаружены кремний, алюминий и марганец, входящие, по-видимому, в состав оксидов.

Крупные включения неоднородны по составу (рис. 3). Они содержат области с размерами до 4 – 6 мкм, в составе которых кислород (42,7 %), магний (12,6 %), алюминий (39,5 %), марганец (4,0 %). В «основе» включений кислород (36,9 %), фтор (14,9 %), натрий (6,6 %), магний (4,61 %), алюминий (15,9 %), кремний (15,7 %), кальций (1,7 %), марганец (2,8 %) (по массе). Таким образом, основными составляющими крупных включений являются оксиды алюминия и кремния.

Распределение микротвердости по глубине покрытий. Результаты определения микротвердости наплавленного металла показаны на рис. 4 и приведены в таблице. Видно, что до глубины примерно 3 мм микротвердость достигает 500 HV, а затем резко падает и до глубины 9 мм держит-

ся на уровне 300 HV, после чего еще раз падает до уровня 160 HV. Такое распределение микротвердости отражает то, что, с одной стороны, наплавку проводили в два слоя, а с другой – смешивание наплавочного материала с материалом подложки.

Выводы

Микроструктура наплавленного металла образцов имеет дендритное (столбчатое) строение, характерное для литого металла, и представляет собой грубоигольчатый мартенсит. В металле наплавки исследуемых образцов выявлены неметаллические включения трех размерных групп 3 – 4, 12 и 27 мкм. Основными составляющими включений в наплавленном покрытии являются оксиды кремния, алюминия, фтора, натрия, магния и марганца. Максимальная твердость наплавленного покрытия в слое толщиной 3 мм составила 501 HV (49,5 HRC).

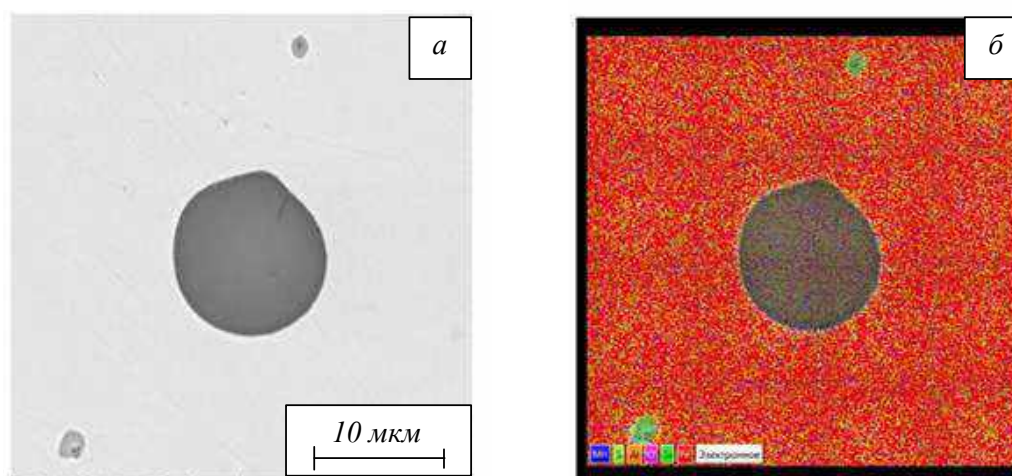


Рис. 2. Рентгеноспектральный микроанализ элементного состава неметаллических включений наплавленного покрытия:
а – электронно-микроскопический снимок; б – карта распределения химических элементов, входящих в состав включений (красный – железо; синий – марганец; салатовый – сера; оранжевый – алюминий; зеленый – кремний)

Fig. 2. X-ray spectral microanalysis of the elemental composition of nonmetallic inclusions of the deposited coating:
а – electron microscopical image; б – distribution map of the chemical elements included in the inclusions (red – iron; blue – manganese; light green – sulfur; orange – aluminum; green – silicon)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин). М.: Издательство МСХА, 2002. 632 с.
2. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г. Абразивное изнашивание. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
3. Рябцев И.А., Сенченков И.К. Теория и практика наплавочных работ. Киев: Екотехнологія, 2013. 400 с.
4. Восстановление деталей машин: справочник / Ф.И. Пантелеенко, В.П. Лялякин, В.П. Иванов, В.М. Константинов; под ред. В.П. Иванова. М.: Машиностроение, 2003. 672 с.
5. Михайлицын С.В., Зверева И.Н., Шекшеев М.А. Сварочные и наплавочные материалы. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 228 с.
6. Пат. 2726230 РФ. МПК⁸ В23 К35/368 Порошковая проволока / Уманский А.А., Козырев Н.А., Михно А.Р., Думова Л.В., Усольцев А.А., Козырева О.А., Осетковский И.В., Комаров А.А. Заявл. 09.01.2020, опубл. 10.07.2020. Бюл. № 19.
7. Осетковский И.В., Козырев Н.А., Кибко Н.В., Попова М.В., Гусев А.И. Разработка износостойкой порошковой проволоки системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V

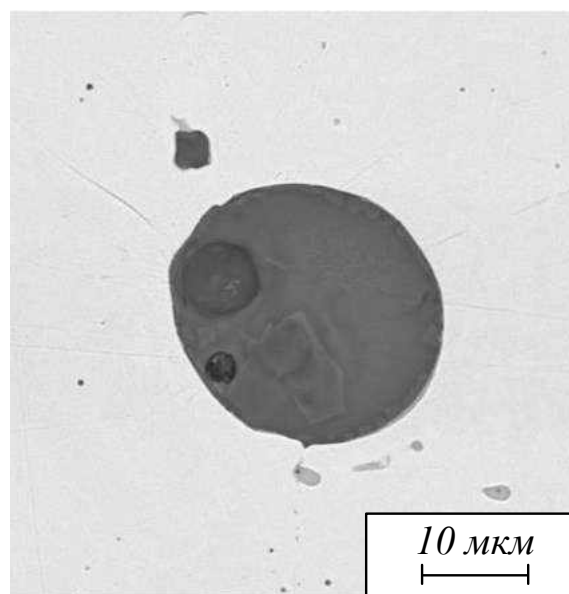


Рис. 3. Неоднородная структура крупных неметаллических включений

Fig. 3. Heterogeneous structure of large nonmetallic inclusions

для наплавки деталей горношахтного оборудования // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2017. № 3. С. 131–135.

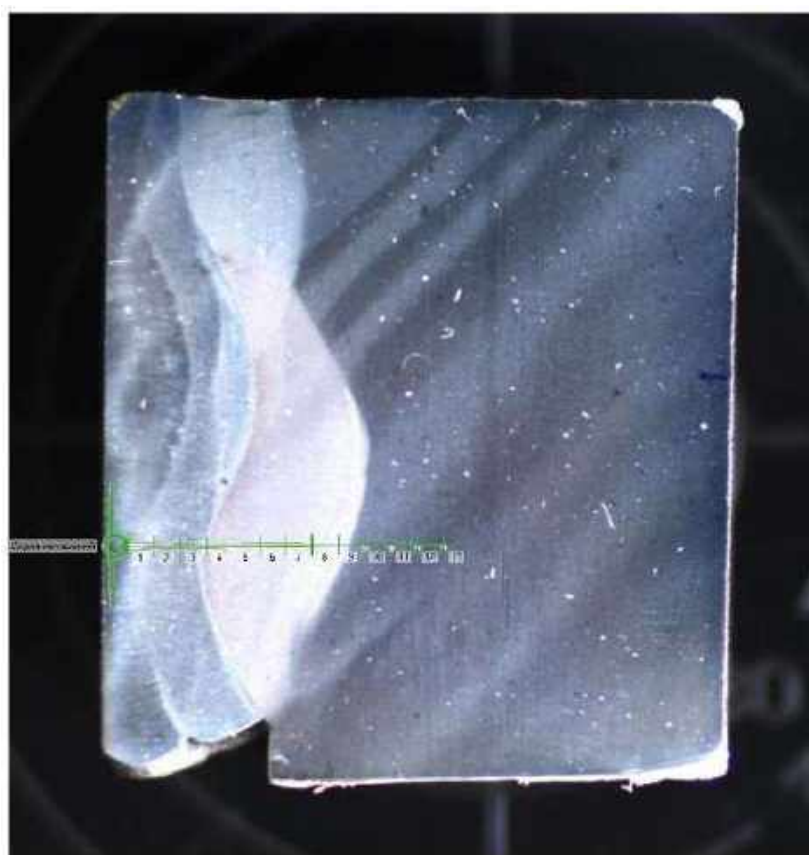


Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине модифицированного поверхностного слоя

Fig. 4. Microhardness distribution over the depth of modified surface layer

Распределение микротвердости по глубине x модифицированного слоя
Microhardness distribution over the depth x of the modified layer

x , мм	0,5	1,5	2,6	3,6	4,7	5,7	6,7	7,8	8,8	9,9	10,9	12,0	13,0
HV	501	478	523	287	296	300	296	302	310	164	160	159	162
HRC	49,5	47,5	50,5	32,0	34,0	34,0	34,0	34,0	35,0				

8. Осетковский И.В., Козырев Н.А., Гусев А.И., Крюков Р.Е., Попова М.В. Свойства металла, наплавленного порошковыми проволоками систем Fe – C – Si – Mn – Ni – Mo – W и Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2017. Вып. 38. С. 155–162.
9. Osetkovskiy I.V., Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Usoltsev A.A., Gusev A.I. Development of a wear-resistant flux cored wire of Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V system for deposit welding of mining equipment parts. In: International scientific and research conference on knowledge-based technologies in development and utilization of mineral resources (KTD-MUR 2017), 6–9 June 2017. Novokuznetsk, 2017. Vol. 84. P. 1–7.
10. Осетковский И.В., Козырев Н.А., Гусев А.И. и др. Сравнительный анализ абразивной износостойкости металла, наплавленного порошковыми проволоками систем Fe – C – Si – Mn – Ni – Mo – W – V и Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V // Заготовительные производства в машиностроении. 2019. Т. 17. № 5. С. 198–202.
- A.A., Kozyreva O.A., Osetkovskii I.V., Komarov A.A. Byul. no. 19. (In Russ.).
7. Osetkovskii I.V., Kozyrev N.A., Kibko N.V., Popova M.V., Gusev A.I. Development of wear-resistant flux-cored wire of the Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V system for surfacing parts of mining equipment. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov*. 2017, no. 3, pp. 131–135. (In Russ.).
8. Osetkovskii I.V., Kozyrev N.A., Gusev A.I., Kryukov R.E., Popova M.V. Properties of metal deposited with flux-cored wires of Fe – C – Si – Mn – Ni – Mo – W and Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V systems. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektsii Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii*. 2017, vol. 38, pp. 155–162. (In Russ.).
9. Osetkovskiy I.V., Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Usoltsev A.A., Gusev A.I. Development of a wear-resistant flux cored wire of Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V system for deposit welding of mining equipment parts. In: *International Scientific and Research Conference on Knowledge-based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources (KTD-MUR 2017)*, 6–9 June 2017. Novokuznetsk, 2017, vol. 84, pp. 1–7.
10. Osetkovskii I.V., Kozyrev N.A., Gusev A.I. etc. Comparative analysis of abrasive wear resistance of metal deposited with flux-cored wires of Fe – C – Si – Mn – Ni – Mo – W – V and Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V systems. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2019, vol. 17, no. 5, pp. 198–202. (In Russ.).

REFERENCES

1. Garkunov D.N. Tribotechnics (design, manufacture and operation of machines). Moscow: Izdatel'stvo MSKhA, 2002, 632 p. (In Russ.).
2. Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Kolokol'nikov M.G. Abrasive wear. Moscow: Mashinostroyeniye, 1990, 224 p. (In Russ.).
3. Ryabtsev I.A., Senchenkov I.K. Theory and practice of surfacing works. Kiev: Ekotekhnologiya, 2013, 400 p. (In Russ.).
4. Panteleenko F.I., Lyalyakin V.P., Ivanov V.P., Konstantinov V.M. Handbook on restoration of machine parts. Ivanov V.P. ed. Moscow: Mashinostroyeniye, 2003, 672 p. (In Russ.).
5. Mikhailitsyn S.V., Zvereva I.N., Shekshiev M.A. Welding and surfacing materials. Moscow; Vologda: Infra-Inzheneriya, 2020, 228 p. (In Russ.).
6. Patent RF 2726230. MPK8 B23 K35/368. Flux-cored wire / Umanskii A.A., Kozyrev N.A., Mikhno A.R., Dumova L.V., Usol'tsev

Сведения об авторах

Осетковский Иван Васильевич, аспирант кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства, Сибирский государственный индустриальный университет

Николай Анатольевич Козырев, д.т.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-7391-6816

E-mail: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

Евгений Александрович Будовских, д.т.н., доцент, старший научный сотрудник, Сибирский государственный индустриальный университет

Email: budovskikh@mail.ru

ORCID: ORCID 0000-0002-3795-0726

Алексей Романович Мухно, аспирант кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-7305-6692

E-mail: mikno-mm131@mail.ru

Людмила Петровна Бащенко, к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0003-1878-909X

E-mail: luda.baschenko@gmail.com

Information about the authors

Ivan V. Osetkovskii, Postgraduate of the Chair “Materials, Foundry and Welding Production”, Siberian State Industrial University

Nikolai A. Kozyrev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Vice-Rector for Research and Innovation, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-7391-6816

E-mail: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

Evgeny A. Budovskikh, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher, Siberian State Industrial University

Email: budovskikh@mail.ru

ORCID: ORCID 0000-0002-3795-0726

Aleksei R. Mikhno, Postgraduate of the Chair “Materials, Foundry and Welding Production”, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-7305-6692

E-mail: mikno-mm131@mail.ru

Lyudmila P. Bashchenko, Cand. Sci (Eng.), Associate Professor of the Department of Heat Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0003-1878-909X

Email: Luda.baschenko@gmail.com

© 2022 г. И.В. Осетковский, Н.А. Козырев, Е.А. Будовских, А.Р. Мухно, Л.П. Бащенко
Поступила в редакцию 11 февраля 2022 г.