



РАЗДЕЛ 2. ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 621.793.79

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.025



ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Co-Cr-Fe-Mn и Co-Cr-Fe-Mn-Ni, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ

Роман Евгеньевич Крюков ¹, Алексей Романович Михно ²,
Ирина Алексеевна Панченко ³, Сергей Валерьевич Коновалов ⁴,
Станислав Сергеевич Перов ⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, Россия

¹ rek_nzrmk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3394-7941>

² mikno-mm131@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7305-6692>

³ i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1631-9644>

⁴ konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

⁵ stas.perov.2005@inbox.ru

Аннотация. В условиях научно-производственного центра «Сварочные процессы и технологии» изготовлены исследовательские образцы порошковых электродных проволок системы алюминий – кобальт – хром – железо – марганец и кобальт – хром – железо – марганец – никель. Изготовление электродной проволоки системы алюминий – кобальт – хром – железо – марганец осуществлялось путем заполнения оболочки из стали 08Пс. Электродная проволока системы кобальт – хром – железо – марганец – никель изготовлена путем заполнения оболочки из стали 12Х18Н9. Наполнителем изготавливаемых порошковых проволок являлись следующие легирующие компоненты: хромистый порошок с содержанием хрома не менее 98,5 %; металлический марганец с содержанием марганца не менее 99,7 %; алюминиевая крошка; кобальтовый электролитический порошок с содержанием кобальта не менее 99 %; никелевый карбонильный порошок с содержанием никеля не менее 99,5 %. Методом автоматической электродуговой сварки под слоем флюса ОК FLUX 10.71 (ESAB) проведено наплавление изготовленных электродных проволок на сталь 9MnSi5. Из поверхности наплавленных образцов методом электроэрозионной резки изготовлена серия образцов для изучения распределения и усвоения химических элементов, проведения испытаний на растяжение, ударную вязкость, изучения микротвердости. Полученные результаты распределения и усвоения химических элементов свидетельствуют о том, что наплавленные электродными проволоками образцы имеют порядка 60–70 % Fe и 30–40 % вводимых легирующих компонентов. Покрытие, полученное путем наплавления электродной проволоки системы алюминий – кобальт – хром – железо – марганец, достаточно твердое, но при этом хрупкое (микротвердость наплавленного слоя в два раза выше, чем у подложки – стали 9MnSi5). Сплав, полученный путем наплавления электродной проволоки системы кобальт – хром – железо – марганец – никель, позволяет получить наплавленный слой на 15 % тверже, чем подложка. При этом полученный сплав обладает достаточно высокими показателями ударной вязкости и предела прочности при растяжении.

Ключевые слова: порошковая проволока, электродуговая наплавка, микротвердость, высокоэнтропийные материалы, микроструктура.

Благодарности: авторы выражают признательность коллегам за помощь, благодарность за финансовую поддержку исследования Российский научный фонд. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00350, <https://rscf.ru/project/23-29-00350>.

Для цитирования: Физико-механические свойства сплавов системы Al-Co-Cr-Fe-Mn и Co-Cr-Fe-Mn-Ni, полученных методом дуговой наплавки порошковой проволоки / Р. Е. Крюков [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 3, С. 149–153. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.025. EDN: <https://elibrary.ru/YJEFWU>.

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SYSTEM ALLOYS Al-Co-Cr-Fe-Mn and Co-Cr-Fe-Mn-Ni OBTAINED BY METHOD OF ARC SURFACING OF FOX-CORED WIRE

Roman E. Kryukov ¹, Alexey R. Mikhno ², Irina A. Panchenko ³,
Sergey V. Kononov ⁴, Stanislav S. Perov ⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State Industrial University", Novokuznetsk, Russia

¹ rek_nzrmk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3394-7941>

² mikno-mm131@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7305-6692>

³ i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1631-9644>

⁴ kononov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

⁵ stas.perov.2005@inbox.ru

Abstract. In the conditions of the research and production center "Welding Processes and Technologies", re-search samples of flux-cored electrode wires of the aluminum - cobalt - chromium - iron - manganese and cobalt - chromium - iron - manganese - nickel system were manufactured. The production of electrode wire of the aluminum - cobalt - chromium - iron - manganese system was carried out by filling a shell of 08PS steel. Electrode wire of the cobalt - chromium - iron - manganese - nickel system is made by filling a shell of steel 12X18H9. The filler of the manufactured flux-cored wires were the following alloying components: chromium powder with a chromium content of at least 98.5 %; metallic manganese with a manganese content of at least 99.7 %; aluminum chips; cobalt electrolytic powder with a cobalt content of at least 99 %; nickel carbonyl powder with a nickel content of at least 99.5 %. Using the method of automatic electric arc welding under a layer of flux OK FLUX 10.71 (ESAB), the manufactured electrode wires were deposited onto 9MnSi5 steel. A series of samples were made from the surface of deposited samples using electrical discharge cutting to study the distribution and absorption of chemical elements, conduct tensile tests, impact strength, and study microhardness. The obtained results of the distribution and assimilation of chemical elements indicate that the samples deposited with electrode wires have about 60-70 % Fe and 30-40 % of the introduced alloying components. The coating obtained by fusing electrode wire of the aluminum - cobalt - chromium - iron - manganese system is quite hard, but at the same time fragile (the microhardness of the deposited layer is two times higher than that of the substrate - 9MnSi5 steel). The alloy obtained by fusing electrode wire of the cobalt - chromium - iron - manganese - nickel system allows us to obtain a deposited layer that is 15 % harder than the substrate. At the same time, the resulting alloy has fairly high impact strength and tensile strength.

Keywords: flux-cored wire, arc welding, microhardness, high-entropy materials, microstructure.

Acknowledgements: The authors are grateful to their colleagues for their help, and to the Russian Science Foundation for financial support of the study. The study was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 23-29-00350, <https://rscf.ru/project/23-29-00350>.

For citation: Kryukov, R.E., Mikhno, A.R., Kononov, S.V., Panchenko, I.A. & Perov, S.S. (2025). Physical and mechanical properties of system alloys Al-Co-Cr-Fe-Mn and Co-Cr-Fe-Mn-Ni obtained by method of arc surfacing of FOX-Cored Wire. Polzunovskiy vestnik, (3), 149-153. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.03.025. EDN: <https://elibrary.ru/YJEFWU>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует множество методов и технологий для создания неразъемных соединений и покрытий на металлах и сплавах с использованием электрической дуги [1–3]. Поскольку до 80 % аварий и поломок в машинах и механизмах связаны с износом, целесообразно использовать для восстановления изношенной поверхности электродуговую наплавку и электродуговые покрытия. Применение этих технологий способствует увеличению долговечности и срока службы стальных деталей и изделий в условиях интенсивного абразивного износа, коррозии и эрозии под воздействием агрессивной окружающей среды [4–7].

Дуговая сварка с применением порошковых проволок представляет собой один из самых экономичных и высокопроизводительных методов, способствующих достижению выдающегося качества неразъемных соединений [8–10]. В условиях высокоэнергетического воздействия электрической дуги, температура которой может достигать порядка шести тысяч градусов, в металле неразъемных соединений, а также в основе восстанавливаемой изношенной поверхности происходит

сложный комплекс взаимосвязанных физических, физико-химических и теплофизических процессов. Эти явления сопровождаются изменениями агрегатного состояния, микро- и макроструктуры, дислокационной субструктуры, а также химического и фазового состава, что имеет решающее значение для формирования необходимых эксплуатационных свойств [11–13].

В последние десять лет наблюдается стремительное развитие технологий электродуговой сварки и наплавки с использованием порошковых электродных проволок, а также создание широкого спектра новых сварочных материалов, с расширением сфер их применения [14–17]. В связи с этим актуальной научно-практической задачей становится выяснение физической природы и механизмов формирования необходимых эксплуатационных свойств металлов неразъемных соединений и электродуговых покрытий, функционирующих в специфических условиях, таких как экстремально низкие или высокие температуры, абразивный износ, интенсивные механические нагрузки и другие. Эти свойства формируются с применением новейших сварочных материалов [18–20].

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Co-Cr-Fe-Mn и Co-Cr-Fe-Mn-Ni, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ

Целью данной работы является определение физико-механических характеристик многокомпонентных покрытий, выполненных с использованием порошковой проволоки, а также уточнение их потенциального применения.

МЕТОДЫ

Изготовление заявленных составов порошковых электродных проволок осуществлялось на станке для изготовления порошковой электродной проволоки. Ширина присадочных проволок составляла четыре миллиметра. Для изготовления проволоки системы алюминий – кобальт – хром – железо – марганец использовалась оболочка из стали 08ПС. Для проволоки системы кобальт – хром – железо – марганец – никель оболочка из стали 12Х18Н9. Изготовление порошковых электродных проволок проводилось путем засыпания следующих легирующих компонентов: хромистого порошка с содержанием хрома не менее 98,5 %; металлического марганца с содержанием марганца не менее 99,7 %; алюминиевой крошки; кобальтового электролитического порошка с содержанием кобальта не менее 99 %; никелевого карбонильного порошка с содержанием никеля не менее 99,5 %. Компонентный состав используемых порошков брался в равных количествах. Наплавление изготовленных порошковых электродных проволок проводилось под высококремнистым марганцевым флюсом ОК FLUX 10.71 (ESAB). В качестве базового материала для проведения наплавления была использована сталь 9MnSi5.

Наплавление заявленных составов проволок осуществлялось с использованием ранее выбранного режима, I – 420А, U – 38В, V_{наплавки} – 15 см/мин.

Из поверхности наплавленных образцов методом электроэрозионной резки (станок ДК7732 М11) произведено изготовление серии образцов для испытания на растяжение, ударную вязкость, изучения микротвердости.

Распределение и усвоение химических элементов на поверхности исследуемого образца изучалось на оборудовании центра коллективного пользования «Материаловедение», АЭС способом (спектрометр ДФС -71) и РСФА (спектрометр XRF-1800).

ДюрOMETрический анализ изучаемых покрытий проводился на стационарном твердомере HVS-1000 согласно методике ГОСТ 9450-76, шаг измерения 2 миллиметра.

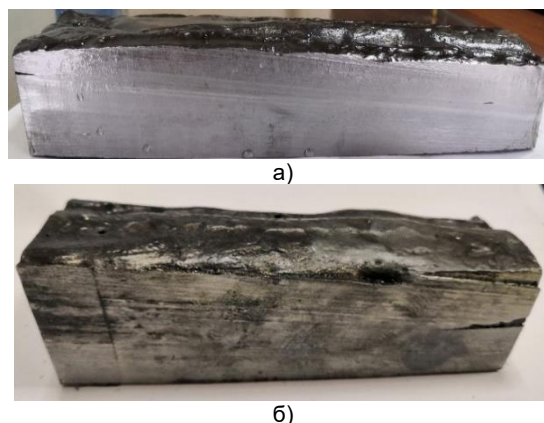
Определение механических характеристик материалов проводилось на испытательной машине Subramax PMBC-50 при следующих режимах испытаний: t – 23±1 °С, V_{нагружения} – 0,2 мм/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для проведения исследования физико-механических свойств наплавленных покрытий методом автоматической дуговой наплавки под слоем флюса были изготовлены исследовательские образцы системы алюминий – кобальт – хром – железо – марганец и кобальт – хром – железо – марганец – никель (рис. 1).

Полученные результаты распределения и усвоения химических элементов (табл. 1) свидетельствуют о том, что наплавленные электродными проволоками образцы имеют порядка 60–70 %Fe и 30–40 % вводимых легирующих компонентов.

Результаты дюрOMETрических исследований (табл. 2) свидетельствуют о том, что микротвёрдость сплава системы алюминий – кобальт – хром – железо – марганец увеличена в 2 раза по сравнению с базовой сталью 9MnSi5, высокая твердость этого сплава тесно связана с получаемыми механическими свойствами, например, такими как износостойкость, что позволит использовать данный материал при изготовлении износостойких изделий. Результаты измерения микротвердости сплава системы кобальт – хром – железо – марганец – никель свидетельствуют о получении сплава с твердостью немного выше, чем у используемой подложки, при этом стоит отметить, что в наплавленном слое присутствует зоны с повышенной в два раза твердостью.



а – сплав системы алюминий – кобальт – хром – железо – марганец, б – сплав системы кобальт – хром – железо – марганец – никель

Рисунок 1 – Характерный вид наплавленных образцов

a – an alloy of the aluminum – cobalt – chromium – iron – manganese system, b – an alloy of the cobalt – chromium – iron – manganese – nickel system

Figure 1 – Characteristic view of the deposited samples

Полученные протоколы испытаний предела прочности, относительного удлинения, ударной вязкости с U-образным надрезом изучаемых образцов приведены в таблицах 3, 4. Поверхности изломов испытываемых образцов представлены на рисунках 2, 3. При изучении механических свойств определено, что излом образцов системы алюминий – кобальт – хром – железо – марганец – хрупкий. Излом образцов системы кобальт – хром – железо – марганец – никель, наоборот, – пластичный.

Таблица 1 – Протокол химического состава исследуемых наплавленных сплавов

Table 1 – Protocol of the chemical composition of the studied deposited alloys

Исследуемый сплав системы:	Масс. доля компонентов, %								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Al	Co	S	P
Al-Co-Cr-Fe-Mn	0,16	2,32	6,47	6,25	0,09	3,27	5,48	0,007	0,013
Co-Cr-Fe-Mn-Ni	0,10	0,75	5,73	17,06	11,39	0,18	5,44	0,012	0,035

Таблица 2 – Результаты измерения микротвердости наплавленного слоя

Table 2 – Results of measuring the microhardness of the deposited layer

Исследуемый сплав системы:	Основной металл (подложка), HV	Среднее значение микротвердости, HV	Min значение, HV	Max значение, HV
Al-Co-Cr-Fe-Mn	120-140	289	282	360
Co-Cr-Fe-Mn-Ni	120-140	159	136	313

Таблица 3 – Результаты испытаний исследуемых образцов на растяжение

Table 3 – Results of tensile tests of the studied samples

Исследуемый сплав системы:	№ образца	Предел прочности, σ_b , Н/мм ²	Относительное удлинение, δ , %
Al-Co-Cr-Fe-Mn	1	136	2,8
	2	143	9,3
	3	140	19
Co-Cr-Fe-Mn-Ni	1	520	76
	2	580	94
	3	641	125

Исследование ударной вязкости КСВ (табл. 4) указывают на хрупкость полученного сплава системы алюминий – кобальт – хром – железо – марганец. Установлено, что полученные с поверхности наплавленного слоя образцы обладают увеличенной хрупкостью по сравнению с пробами, полученными с зоны сплавления. Результаты испытания образцов системы кобальт – хром – железо – марганец – никель – указывают на то, что данный сплав обладает достаточно высокими показателями ударной вязкости.



Рисунок 2 – Фото излома образца системы Al-Co-Cr-Fe-Mn после проведения испытания на ударную вязкость

Figure 2 – Photo of the fracture of the sample of the Al-Co-Cr-Fe-Mn system after the impact strength test

Таблица 4 – Ударная вязкость КСВ исследуемых образцов, Дж/см²

Table 4 – Impact strength КСВ of the studied samples, J/cm²

Исследуемый сплав системы:	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3
Al-Co-Cr-Fe-Mn	7,85	8,46	66,54
Co-Cr-Fe-Mn-Ni	189,4	157,5	165,7

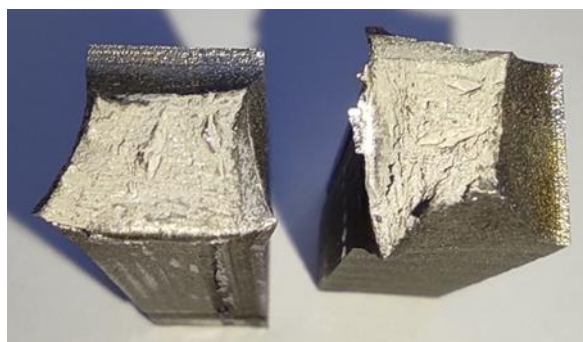


Рисунок 3 – Фото излома образца системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni после проведения испытания на ударную вязкость

Figure 3 – Photo of the fracture of the system sample Co-Cr-Fe-Mn-Ni after the impact strength test

ВЫВОДЫ

Результаты лабораторных исследований свидетельствуют о том, что сплав системы алюминий – кобальт – хром – железо – марганец, полученный в ходе исследования, демонстрирует улучшенные дюрометрические характеристики по сравнению с базовой сталью. Однако высокая твердость этого сплава тесно связана с его хрупкостью, что подтверждается итогами механических испытаний. Эти результаты актуальны не только для рассматриваемого сплава, но и для других сплавов и покрытий, применяемых в производстве и ремонте изделий, отличающихся повышенной износостойкостью, таких как крановые колеса, ролики подающих механизмов, валы и оси.

Сплав системы кобальт – хром – железо – марганец – никель демонстрирует по сравнению со сплавом системы алюминий – кобальт – хром – железо – марганец более низкую микротвердость и, следовательно, более высокую пластичность физических и механических свойств. Это позволяет сделать вывод о перспективах его применения в производстве компонентов криогенного и ёмкостного оборудования, трубопроводных систем и изделий с повышенной химической стойкостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. Burlaka, E. Lavrova. Improving energy characteristics of the welding power sources for TIG-AC welding // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 5, No. 5–101. P. 38–43. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.180925.
2. Z. Lei, X. Cui, G. Jin [et al.]. Analysis of welding solidification crack in narrow gap laser welding of high-strength steel // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Vol. 119, No. 7–8. P. 4177–4190. DOI: 10.1007/s00170-022-08659-6.
3. Z. Mikno, M. Stepień. Analysis of welding conditions at synchronous operation of resistance welding machines // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024. Vol. 133, No. 3–4. P. 1915–1927. DOI: 10.1007/s00170-024-13682-w.
4. A. Lopata, I. Smirnov, M. Holovashchuk, V. Lopata. Investigation of the properties of coatings obtained by electric arc spraying // Problems of Tribology. 2023. Vol. 28, No. 1/107. P. 73–80. DOI: 10.31891/2079-1372-2023-107-1-73-80.
5. A.B. Shynarbek. Investigation of the process of electric arc metalization of coatings from steel 30KhGSA // Eurasian Physical Technical Journal. 2023. Vol. 20, No. 4 (46). P. 67–73. DOI: 10.31489/2023no4/67-73.
6. Н.Ф. Дмитриченко, А.А. Тамаргазин, Е.П. Пуга-

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Co-Cr-Fe-Mn и Co-Cr-Fe-Mn-Ni, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ

чевская. Исследование свойств поверхностей, восстановленных электродуговыми покрытиями // Science Rise. 2016. Т. 12, № 2(29). С. 19–23. DOI: 10.15587/2313-8416.2016.85845.

7. Ф.И. Пантелеенко, М.А. Белоцерковский, М.Н. Карпец, А.В. Сосновский. Сравнительный анализ физико-механических свойств покрытий, нанесенных способами электродуговой и гиперзвуковой металлизации // Механика машин, механизмов и материалов. 2019. № 4(49). С. 48–54.

8. А.К. Кычкин, Г.Г. Винокуров, Н.Ф. Стручков. Исследование покрытий из порошковых проволок, модифицированных комплексным концентратом Томторского редкоземельного месторождения Республики Саха (Якутия) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20, № 6(86). С. 86–91.

9. В.А. Багров. Совершенствование сплавов системы Cr-Mn-Mo-Ti на основе железа // Машинобудовання: Збірник наукових праць. 2015. № 16. С. 94–99.

10. И.В. Осетковский, Н.А. Козырев, А.И. Гусев [и др.]. Свойства металла, наплавленного порошковыми проволоками систем Fe-C-Si-Mn-Ni-Mo-W-V и Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo-V // Вестник горнометаллургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2017. № 38. С. 155–162.

11. S.F. Tseng, T.Y. Hung, C.M. Chang. Mechanical and microstructural properties of additively manufactured Ti-6Al-4 V stents with CO₂ laser postannealing treatment // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Vol. 119, No. 9–10. P. 6571–6581. DOI: 10.1007/s00170-021-08381-9.

12. Г.М. Григоренко, В.Н. Коржик, Л.И. Адеева [и др.]. Особенности металлургических процессов при плазменно-дуговом напылении покрытий, полученных из порошковой проволоки со стальной оболочкой и наполнителями В4С и В4С+ZrO₂ // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия : Технические науки. 2016. № 32. С. 125–137.

13. S. Peleshenko, V. Korzhyk, O. Voitenko [et al.]. Analysis of the current state of additive welding technologies for manufacturing volume metallic products (review) // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 3, No. 1(87). P. 42–52. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.99666.

14. Е.В. Полевой, Н.А. Козырев, А.Р. Михно [и др.]. Анализ параметров микроструктуры наплавленного слоя порошковой проволокой системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-MoV // Металловедение и термическая обработка металлов. 2022. № 12(810). С. 15–18. DOI: 10.30906/mitom.2022.12.15-18.

15. N.A. Kozyrev, A.R. Mikhno, A.A. Usoltsev [et al.]. The Possibility of Using Silicomanganese Slag and Ladle Electric Steelmaking Slag in Manufacture of Welding Fluxes // Steel in Translation. 2021. Vol. 51, No. 10. P. 683–687. DOI: 10.3103/S0967091221100065.

16. С.В. Райков, В.Е. Громов, Р.Е. Крюков, А.С. Князев. Износостойкие наплавки: свойства, структура и фазовый состав. Новокузнецк : Полиграфист, 2024. 179 с. ISBN 978-5-91797-333-3.

17. С.В. Михайлицин, М.А. Шекшеев, С.И. Платов [и др.]. Исследование вязкости жидких сварочных шлаков

и расплавов электродных покрытий // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 61, № 4. С. 280–287. DOI: 10.17073/0368-0797-2018-4-280-287.

18. V. Korzhyk, O. Burlachenko, D. Strohonov [et al.]. Effect of the technological parameters of plasma-arc spraying of flux-cored wire on the structure and properties of intermetallide coatings based on Fe₃Al // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. Vol. 1, No. 12 (121). P. 6–15. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.274062.

19. G. Langelandsvik, M. Eriksson, O.M. Akselsen, H.J. Roven. Wire arc additive manufacturing of AA5183 with TiC nanoparticles // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. DOI: 10.1007/s00170-021-08287-6.

20. D. Begmatov, U. Khaydarov, Sh. Saidkhodjaeva, F. Odilov. Improving the technology of welding chromium–nickel steels // Theoretical & Applied Science. 2021. No. 8(100). P. 282–290. DOI: 10.15863/TAS.2021.08.100.51.

Информация об авторах

Р. Е. Крюков – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры механики и машиностроения Сибирского государственного индустриального университета.

А. Р. Михно – директор НПЦ «Сварочные процессы и технологии» Сибирского государственного индустриального университета.

И. А. Панченко – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник управления научных исследований Сибирского государственного индустриального университета.

С. В. Коновалов – доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности Сибирского государственного индустриального университета

С. С. Перов – лаборант управления научных исследований Сибирского государственного индустриального университета.

Information about the authors

R.E. Kryukov - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Mechanics and Mechanical Engineering of the Siberian State Industrial University.

A.R. Mikhno - post-graduate student, director of SPC “Welding processes and technologies” of the Siberian State Industrial University.

I.A. Panchenko - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of the Scientific Research Department of the Siberian State Industrial University.

S.V. Konovalov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Scientific and Innovation Activities of the Siberian State Industrial University.

S.S. Perov - Laboratory assistant at the Scientific Research Department of the Siberian State Industrial University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 18 декабря 2024; одобрена после рецензирования 24 июня 2025; принята к публикации 10 июля 2025.

The article was received by the editorial board on 18 Dec 2024; approved after editing on 24 June 2025; accepted for publication on 10 July 2025.