



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.793.79
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-106-113

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВА СИСТЕМЫ Co-Cr-Fe-Mn-Ni, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ПРОВОЛОЧНО-ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ

Михно А.Р., Крюков Р.Е., Панченко И.А., Коновалов С.В., Перов С.С.

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

Аннотация. В лабораторных условиях были изготовлены опытные образцы порошковых проволок системы кобальт-хром-железо-марганец-никель. Для изготовления порошковой проволоки системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni использовалась оболочка из стали 12X18H9. В качестве шихтовых материалов (наполнителя порошковой проволоки) использованы следующие металлические порошки: кобальтовый электролитический порошок (ГОСТ 9721-79), порошок никелевый карбонильный (ГОСТ 9722-97), порошок хрома восстановленный (ТУ 14-5-298-99), марганец металлический (ГОСТ 9722-97). Диаметр изготовленной порошковой проволоки составлял 4 мм. С использованием метода электродуговой наплавки сварочным трактором АСАВ-1250 проведена наплавка исследуемых составов порошковых проволок. В качестве защитного материала использовался сварочный флюс АН-348А. Изготовление полнопрофильного образца осуществлялось путем многопроходной наплавки до достижения высоты наплавленного слоя в 30 мм. С использованием имеющегося в ФГБОУ ВО «СибГИУ» оборудования проведено изучение химического состава наплавленного образца, проведены замеры твердости, микротвердости. Исследованы механические свойства при испытании на одноосное растяжение, трёхточечном изгибе, ударной вязкости при комнатной температуре. Дополнительно проведены испытания методом «дисколодка» износостойкости наплавленных образцов. В результате изучения элементного состава образцов определено, что данные образцы имеют в составе не более 35% используемых легирующих компонентов. Полученный путем наплавки сплав системы кобальт-хром-железо-марганец-никель позволяет получить наплавленный слой на 15% тверже, чем подложка. При этом полученный сплав обладает достаточно высокими показателями физико-механических свойств (ударной вязкости, трёхточечного изгиба и предела прочности при растяжении). Однако износостойкость наплавленного покрытия низкая, что позволяет сделать вывод о том, что данный сплав нецелесообразно использовать при изготовлении или ремонте изделий, подверженных ударно-абразивному износу.

Ключевые слова: порошковая проволока, электродуговая наплавка, ударная вязкость, твердость, микротвёрдость, механические характеристики

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00350, <https://rscf.ru/project/23-29-00350/>

© Михно А.Р., Крюков Р.Е., Панченко И.А., Коновалов С.В., Перов С.С., 2025

Для цитирования

Исследование механических свойств сплава системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni, полученного методом проволочно-дуговой наплавки / Михно А.Р., Крюков Р.Е., Панченко И.А., Коновалов С.В., Перов С.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 106-113. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-106-113>



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

RESEARCH OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE ALLOY OF THE Co-Cr-Fe-Mn-Ni SYSTEM PRODUCED BY THE METHOD OF WIRE-ARC SURFACING

Mikhno A.R., Kryukov R.E., Panchenko I.A., Konovalov S.V., Perov S.S.

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. In laboratory conditions, prototypes of flux-cored wires of the cobalt-chromium-iron-manganese-nickel system were manufactured. For the production of flux-cored wire of the Co-Cr-Fe-Mn-Ni system, a sheath of 12X18H9 steel was used. The following metal powders were used as charge materials (cored wire filler): cobalt electrolytic powder (GOST 9721-79), nickel carbonyl powder (GOST 9722-97), reduced chromium powder (TU 14-5-298-99), metal manganese (GOST 9722-97). The diameter of the manufactured flux-cored wire was 4mm. Using the electric arc surfacing method using an ASAV-1250 welding tractor, surfacing of the flux-cored wire compositions under study was carried out. AN-348A welding flux was used as a protective material. The production of a full-profile sample was carried out by multi-pass surfacing until the height of the deposited layer was reached at 30 mm. Using the equipment available at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education SibSIU, the chemical composition of the deposited sample was studied, hardness and microhardness measurements were carried out. The mechanical properties were studied during uniaxial tensile testing, three-point bending, and impact strength at room temperature. Additionally, tests of the wear resistance of deposited samples were carried out using the “disc-pad” method. As a result of studying the elemental composition of the samples, it was determined that these samples contain no more than 35% of the alloying components used. The alloy of the cobalt-chromium-iron-manganese-nickel system obtained by surfacing allows to obtain a deposited layer 15% harder than the substrate. At the same time, the resulting alloy has fairly high physical and mechanical properties (impact strength, three-point bending and tensile strength). However, the wear resistance of the deposited coating is low, which allows us to conclude that this alloy is not advisable to use in the manufacture or repair of products subject to impact and abrasive wear.

Keywords: flux-cored wire, electric arc surfacing, impact strength, hardness, microhardness, mechanical characteristics

The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 23-29-00350, <https://rscf.ru/project/23-29-00350/>

For citation

Mikhno A.R., Kryukov R.E., Panchenko I.A., Konovalov S.V., Perov S.S. Research of the Mechanical Properties of the Alloy of the Co-Cr-Fe-Mn-Ni System Produced by the Method of Wire-Arc Surfacing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 106-113. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-106-113>

Введение

Порошковые проволоки представляют собой конструкцию, состоящую из двух основных элементов. Во-первых, это оболочка, изготовленная из гибкой ленты, которая может быть выполнена из различных материалов, таких как сталь, никель или кобальт. Во-вторых, внутри этой оболочки находится сердечник — порошковый компонент, содержащий легирующие элементы, шлакообразующие вещества и специальные добавки. Эти добавки играют важную роль в процессе рафинирования, а также обеспечивают защиту от воздействия газа [1, 2].

Наиболее распространёнными материалами для наплавки являются сплавы на основе железоуглеродистой системы. При добавлении легирующих элементов происходит значительное влияние на структурное состояние сталей. Это, в свою очередь, затрагивает такие характеристики, как прочность, твердость, пластичность и износостойкость. Эти свойства

делают данные материалы особенно ценными в различных промышленных и строительных сферах [3, 6].

Использование высоколегированных материалов в сварочном производстве способствует обеспечению высокой твердости изготавливаемой продукции и улучшает износостойкость деталей, подверженных абразивному и контактному изнашиванию [7, 8].

Хромистые стали, содержащие более 12% хрома, отличаются высокой коррозионной стойкостью и жаропрочностью [9, 10]. Они способны сохранять свои свойства при температурах до 600°C. В зависимости от содержания углерода и хрома эти стали могут иметь разные структурные состояния, такие как феррит, мартенсит или феррито-мартенсит. Благодаря своим уникальным характеристикам, хромистые стали часто используются для наплавки различных деталей. К ним относятся плунжеры гидропрессов, прокатные валки, штампы и пускорегулирующая арматура. Эти стали становятся все более востребованными в отраслях, где необходимы высокая прочность и

стойкость к воздействию высоких температур и коррозионным веществам [11, 12].

Аустенитные стали предлагают широкий спектр применения благодаря различному содержанию легирующих элементов. Эти стали, помимо прочего, влияют на прочностные характеристики при ударных нагрузках. Аустенитные стали выделяются своей универсальностью и находят широкое применение в самых различных производственных процессах. Их примечательные характеристики делают их незаменимыми там, где важны надежность и высокая прочность материалов. Эти стали используются в условиях, где требуется устойчивость к нагрузкам и внешней среде, обеспечивая долговечность и эффективность работы компонентов. Таким образом, аустенитные стали продолжают оставаться предпочтительным выбором в промышленности, отвечая современным требованиям к качеству и надежности [13-15].

Высокоэнтропийные оксиды (ВЭО) стали одной из самых перспективных тем в последние годы. Интеграция нескольких катионов – пяти и более – в структуру одного материала открывает новые возможности для разработки оксидных соединений. Эти материалы привлекают внимание благодаря множеству уникальных свойств, включая диэлектрические, магнитные, термические и каталитические характеристики. Основное преимущество ВЭО заключается в способности стабилизировать структуру благодаря разнообразию элементов, что позволяет создавать материалы с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Это делает их незаменимыми для применения в различных областях, таких как машиностроение, полупроводниковая техника и мн. др. Совмещение экспериментальных исследований с теоретическими расчетами играет решающую роль в понимании свойств высокоэнтропийных оксидов. Такой подход позволяет точно определить состав и условия синтеза, что, в свою очередь, ведет к созданию материалов с заданными функциональными свойствами. ВЭО представляют собой важный шаг в разработке передовых материалов для будущих технологий [16-18].

Метод высокоэнергетического механического сплавления применяется для разработки многокомпонентных сплавов, таких как сплавы системы железо-хром-кобальт-никель-марганец. Этот процесс приводит к образованию однофазного твердого раствора на основе γ -Fe с гранцентрированной кристаллической решеткой. Далее с помощью искрового плазменного спекания полученная смесь преобразуется в компактный материал с идеальной кристаллической структурой и равномерным составом. В результате фаза γ -Fe, представляющая собой твердый раствор, равномерно распределяется по всему объему материала. Экспериментальные исследования показали, что такие сплавы, как железо-хром-кобальт-никель-марганец, обладают исключительными свойствами. Они демонстрируют стабильность химического состава и фазового состояния, а также высокую износостойкость, низкое электросопротивление и отличную механическую прочность при различных температурах [19, 20].

Целью данной работы является определение физико-механических свойств сплава системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni, полученного путем наплавки порошковой проволоки электродуговым способом под слоем флюса.

Материалы и методы исследования

Для изготовления экспериментальных порошковых проволок использовался лабораторный стан, имеющийся в научно-производственном центре «Сварочные процессы и технологии». В качестве сопутствующих материалов для изготовления использовалась стальная лента 12X18H9, металлические порошки: кобальтовый электролитический порошок (ГОСТ 9721-79), порошок никелевый карбонильный (ГОСТ 9722-97), порошок хрома восстановленный (ТУ 14-5-298-99), марганец металлический (ГОСТ 9722-97). Диаметр изготовленной экспериментальной порошковой проволоки составлял 4 мм.

Электродуговая наплавка изготовленных в НПП материалов производилась самоходной установкой ASAW-1250 на низкоуглеродистую подложку.

Наплавочные работы проведены при следующих, ранее подобранных режимах: сила тока 420 А, напряжение дуги 38 В, скорость наплавки 15 см/мин.

Методом проволоочной электроэрозионной резки из поверхности объемной заготовки изготовлены образцы для проведения механических испытаний (на одноосное растяжение, трехточечный изгиб, ударную вязкость), изучения дюрометрических свойств и износостойкости.

Изучение химического анализа наплавленных покрытий осуществлялось на спектрометре ДФС -71 и спектрометре XRF-1800.

Изучение твердости (HRA) изготовленных образцов осуществлялось с использованием твердомера ТК-2М с нагрузкой 60 кгс.

Изучение микротвердости изготовленных образцов осуществлялось с использованием микротвердомера HVS-1000 по ГОСТ 9450-76 с нагрузкой 1 кг в течение 10 с.

Механические испытания (растяжение и трехточечный изгиб) изготовленных образцов проводились на универсальной испытательной машине Subramax PMBC-50 при нагружении 0,2 мм/мин до полного разрушения испытуемого образца. Испытания изготовленных образцов на ударную вязкость КСУ проводились с использованием маятникового копра при комнатной температуре ($22 \pm 1^\circ\text{C}$).

Проведение испытания на износостойкость осуществлялось на установке 2070 СМТ-1 методом потери массы образца по схеме колодка-диск. Режим испытания на износостойкость: нагрузка – 30 мА (78,4Н), частота 20 – об/мин.

Полученные результаты и их обсуждение

Для определения физико-механических свойств наплавленного покрытия методом автоматической дуговой наплавки под слоем флюса была изготовлена серия образцов с различным компонентным составом порошковой проволоки. По результатам проведенного химического анализа наплавленных образцов определено, что оптимальным химическим составом (максимальная концентрация используемых компонентов) обладает полученный сплав с химическим составом, представленным в **табл. 1**. В результате анализа химического состава определено, что полученные наплавленные образцы имеют не более 35% вводимых легирующих компонентов.

Таблица 1. Химический состав исследуемого сплава системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni, мас. %
Table 1. Chemical composition of the studied alloy of the Co-Cr-Fe-Mn-Ni system, wt. %

Массовая доля элементов, %												
C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Ti	V	Mo	Al	Co	S	P
0,10	0,75	5,73	17,06	11,39	0,03	0,05	0,072	0,019	0,18	5,44	0,012	0,035

Для проведения дальнейших исследований был изготовлен опытный образец (**рис. 1**) размером 200×50×40 мм (д×ш×в).

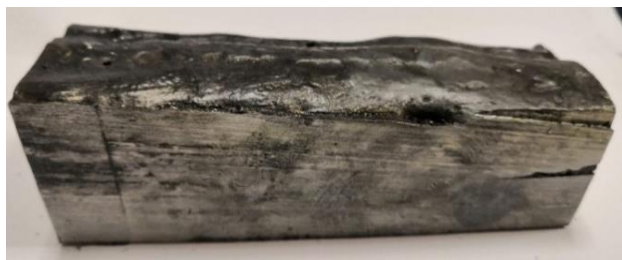


Рис. 1. Характерный вид наплавленного сплава системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni
Fig. 1. Characteristic view of the deposited alloy of the Co-Cr-Fe-Mn-Ni system

С использованием электроэрозионного проволочно-вырезного станка были изготовлены образцы для проведения дальнейших исследований.

Результаты исследования дюрометрических свойств (**рис. 2, табл. 2**) наплавленных образцов указывают на то, что твердость наплавленного сплава системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni немного выше, чем у используемой подложки, при этом стоит отметить, что в наплавленном слое присутствуют зоны с повышенной в два раза твердостью.

Результаты механических испытаний (испытания на растяжение, трехточечный изгиб и ударную вязкость) исследуемых сплавов представлены в **табл. 3–5**. Фотографии характерных изломов образцов представлены на **рис. 3, 4**.



Рис. 2. Результаты замера твердости исследуемого образца
Fig. 2. Results of measuring the hardness of the test sample

Таблица 2. Результаты измерения микротвердости наплавленного слоя
Table 2. Results of measuring the microhardness of the deposited layer

Основной металл (подложка), HV	Среднее значение микротвердости, HV	Минимальное значение, HV	Максимальное значение, HV
120-140	159	136	313

Таблица 3. Результаты испытаний исследуемых образцов на растяжение
Table 3. Results of tensile tests of the studied samples

Номер образца	Предел прочности σ_B , Н/мм ²	Относительное удлинение δ , %
1	520	76
2	580	94
3	641	125

Таблица 4. Механические свойства исследуемых образцов при испытании на трехточечный изгиб
Table 4. Mechanical properties of the test samples when tested for three-point bending

Номер образца	Предел прочности σ_B , Н/мм ²	Максимальная нагрузка, Н
1	785	16350
2	943	17026
3	867	16687

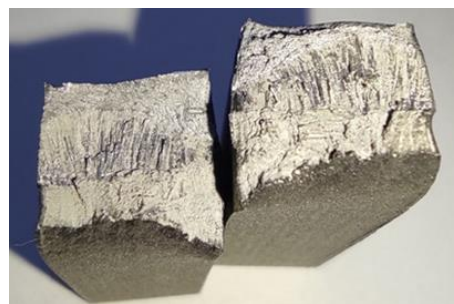


Рис. 3. Фото излома образца системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni после проведения испытания на трехточечный изгиб
Fig. 3. Photo of the fracture of a sample of the Co-Cr-Fe-Mn-Ni system after a three-point bending test

Таблица 5. Ударная вязкость KCU исследуемых образцов, Дж/см²

Table 5. Impact strength KCU of the studied samples, J/cm²

Образец №1	Образец №2	Образец №3
189,4	157,5	165,7

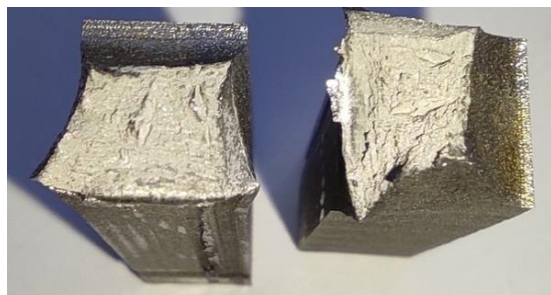


Рис. 4. Фото излома образца системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni после проведения испытания на ударную вязкость

Fig. 4. Photo of the fractured sample of the Co-Cr-Fe-Mn-Ni system after impact strength testing

В ходе исследования механических свойств при испытании на растяжение и трехточечный изгиб определено, что исследуемые образцы имеют достаточно высокие прочностные показатели. Характер излома исследуемых образцов – вязкий.

Результаты испытаний на ударную вязкость также указывают на то, что данный сплав обладает достаточно физико-механическими показателями при комнатной температуре.

При проведении испытания на износостойкость наблюдаются неудовлетворительные результаты. Износ наплавленного сплава (Δ/n) равен $1,0-1,7^{-4}$ г/об. Вид образца после проведения испытания на износостойкость представлен на рис. 5.



Рис. 5. Фото образца системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni после проведения испытания на износостойкость

Fig. 5. Photo of the sample of the Co-Cr-Fe-Mn-Ni system after wear resistance testing

Закключение

По полученным результатам лабораторных исследований установлено, что полученный в ходе исследования сплав, наплавленный порошковой проволокой системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni, состоит в основном из 65% железа и 35% легирующих элементов. Полученный материал обладает незначительно повышенной твердостью и микротвердостью по отношению к подложке – стали 09Г2С.

Результаты проведенных физико-механических испытаний указывают на то, что исследуемый материал пластичный и обладает хорошими физико-механическими свойствами. Однако износостойкость полученного сплава низкая, что позволяет сделать вывод о том, что данный сплав нецелесообразно использовать при изготовлении или ремонте изделий, подверженных ударно-абразивному износу.

Список источников

1. Порошковые проволоки на мировом и региональных рынках сварочных материалов / А.А. Мазур, О.К. Маковецкая, С.В. Пустовойт, Н.С. Бровченко // Автоматическая сварка. 2015. № 5-6(742). С. 68-74.
2. Золотухин В.И. Современные автоматические линии и технологические комплексы для производства инъекционных порошковых проволок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 3. С. 3-7. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-3-3-7.
3. Кычкин А.К., Винокуров Г.Г., Стручков Н.Ф. 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.
4. The technology of plasma-arc atomization of current-carrying solid wires for titanium powder production / D. Strohonov, O. Tereshchenko, O. Burlachenko [et al.] // Sciences of Europe. 2024, no. 147(147), pp. 116-119. DOI: 10.5281/zenodo.13382721.
5. Effect of Tempering on Structure and Properties of Plasma Surfacing of R2M9U High-Speed Tool Steel / V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, A.I. Potekaev [et al.] // Russian Physics Journal. 2024, vol. 67, no. 3, pp. 259-266. DOI: 10.1007/s11182-024-03117-0.
6. Bagrov V. Fusion of dies with economy-layed secondaryhard-ducted steel // Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University. 2023, vol. 1, no. 103, pp. 163. DOI: 10.30977/bul.2219-5548.2023.103.1.163.
7. Каспарова О.В. Повышение коррозионной стойкости углеродистой стали 45 с помощью химико-термической обработки // Технология легких сплавов. 2015. № 1. С. 81-86.
8. Asadov Sh.A. Formation of a diffusion layer on the working surface of a reactive bushing operating under conditions of thermo-erosion wear // Universum: технические науки. 2022, no. 3-6(96), pp. 43-46. DOI: 10.32743/UniTech.2022.96.3.13269.

9. Использование остаточного аустенита для повышения абразивной износостойкости высокохромистых сталей / М. А. Филиппов, М. А. Гервасьев, С. М. Никифорова [и др.] // Актуальные проблемы в машиностроении. 2016. № 3. С. 434-439.
10. Bagrov V., Hlushkova D. Properties of wear resistance nickel-free steel with secondary curing for building up stamps of metal hot processing // Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University. 2022, no. 97, pp. 34. DOI: 10.30977/bul.2219-5548.2022.97.0.34.
11. Rotary friction welded C45 to 16NiCr6 steel rods: statistical optimization coupled to mechanical and microstructure approaches / Y. Belkahla, A. Mazouzi, S. El. I. Lebouachera [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021, vol. 116, no. 7, pp. 2285-2298. DOI: 10.1007/s00170-021-07597-z.
12. Enhancement of corrosion protection performance of SUS304/Q235B dissimilar metals lap joint through fiber laser / J. Z. Liu, L. J. Zhang, J. X. Zhang [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018, vol. 96, no. 1-4, pp. 789-802. DOI: 10.1007/s00170-018-1634-5.
13. Optimization of the pulsed arc welding parameters for wire arc additive manufacturing in austenitic steel applications / A. Zavdoveev, V. Pozniakov, I. Klochkov [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022, vol. 119, no. 7-8, pp. 5175-5193. DOI: 10.1007/s00170-022-08704-4.
14. Influence of self-protective atmosphere in fiber laser welding of austenitic stainless steel / N. Yadaiah, S. Bag, C.P. Paul, L.M. Kukreja // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016, vol. 86, no. 1-4, pp. 853-870. DOI: 10.1007/s00170-015-8194-8.
15. Influence of AC magnetic field on the cladding layer during the micro beam plasma welding of austenitic stainless steel / H. H. Liu, L. B. Wang, W. J. Liu [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018, vol. 97, no. 9, pp. 3459-3468. DOI: 10.1007/s00170-018-2182-8.
16. Microstructure and mechanical properties of non-equiatomic Co₂₅Cr₁₅Fe₃₇Mn_{3.5}Ni₁₆Si_{1.4} high-entropy alloy produced by wire-arc additive manufacturing / Osintsev K.A., Konovalov S.V., Gromov V.E., Ivanov Y.F., Panchenko I.A. // Materials Letters & - 2022, vol. 312, no. 131675. DOI: 10.1016/j.matlet.2022.131675
17. Обзор исследований сплавов, разработанных на основе энтропийного подхода / Батаева З. Б., Руктуев А. А., Иванов И. В. [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2021. Т. 23, № 2. С. 116-146. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-116-146.
18. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // Acta Materialia. 2017, vol. 122, pp. 448-511. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.08.081.
19. Механическое сплавление с частичной аморфизацией многокомпонентной порошковой смеси Fe-Cr-Co-Ni-Mn и ее электроискровое плазменное спекание для получения компактного высокоэнтропийного материала / Кочетов Н.А., Рогачев А.С., Щукин А.С., Вадченко С.Г., Ковалев И.Д. // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2018. № 2. С. 35-42. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-2-35-42
20. Получение высокоэнтропийного сплава Fe-Cr-Co-Ni-Ti механическим сплавлением и электроискровым плазменным спеканием порошковой смеси / Н. А. Кочетов, А. С. Рогачев, Д. Ю. Ковалев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2021. Т. 15, № 2. С. 4-12. DOI: 10.17073/1997-308X-2021-2-4-12.

References

1. Mazur A.A., Makovetskaya O.K., Pustovoit S.V., Brovchenko N.S. Flux-cored wires on the world and regional markets of welding materials. *Avtomaticeskaya svarka* [Automatic welding], 2015;(5-6(742)):68-74. (In Russ.)
2. Zolotukhin V. I. Modern automatic lines and technological complexes for the production of injection cored wires. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical Sciences], 2022;(3):3-7. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-3-3-7. (In Russ.)
3. Kychkin A.K., Vinokurov G.G., Struchkov N.F. Study of coatings made of flux-cored wires modified with a complex concentrate of the Tomtor rare earth deposit of the Republic of Sakha (Yakutia). *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2018;20(6(86)):86-91. (In Russ.)
4. Strohonov D., Tereshchenko O., Burlachenko O. et al. The technology of plasma-arc atomization of current-carrying solid wires for titanium powder production. *Sciences of Europe*. 2024;(147(147)):116-119. DOI: 10.5281/zenodo.13382721.
5. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Potekaev A.I. et al. Effect of Tempering on Structure and Properties of Plasma Surfacing of R2M9U High-Speed Tool Steel. *Russian Physics Journal*. 2024;67(3):259-266. DOI: 10.1007/s11182-024-03117-0.
6. Bagrov V. Fusion of dies with economy-layed secondaryhard-ducted steel. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2023;1(103):163. DOI: 10.30977/bul.2219-5548.2023.103.1.163.
7. Kasparova O.V. Increasing the corrosion resistance of carbon steel 45 using chemical-thermal treatment *Tekhnologiya legkih splavov* [Technology of light alloys]. 2015;(1):81-86. (In Russ.)
8. Asadov Sh. A. Formation of a diffusion layer on the working surface of a reactive bushing operating under conditions of thermo-erosion wear. *Universum: technical sciences*. 2022;(3-6(96)):43-46. DOI: 10.32743/UniTech.2022.96.3.13269.
9. Filippov M.A., Gervasyev M.A., Nikiforova S.M. et al. The use of retained austenite to increase the abrasive wear resistance of high-chromium steels. *Aktualnye problemy v mashinostroenii* [Current problems in mechanical engineering]. 2016;(3):434-439. (In Russ.)
10. Bagrov V., Hlushkova D. Properties of wear resistance nickel-free steel with secondary curing for building up

- stamps of metal hot processing. Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University. 2022;(97):34. DOI: 10.30977/bul.2219-5548.2022.97.0.34.
11. Belkahla Y., Mazouzi A., Lebouachera S. El. I. et al. Rotary friction welded C45 to 16NiCr6 steel rods: statistical optimization coupled to mechanical and microstructure approaches. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021;116(7):2285-2298. DOI: 10.1007/s00170-021-07597-z.
 12. Liu J.Z., Zhang L.J., Zhang J.X. et al. Enhancement of corrosion protection performance of SUS304/Q235B dissimilar metals lap joint through fiber laser. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018;96(1-4):789-802. DOI: 10.1007/s00170-018-1634-5.
 13. Zhdovetov A., Pozniakov V., Klochkov I. et al. Optimization of the pulsed arc welding parameters for wire arc additive manufacturing in austenitic steel applications. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022;119(7-8):5175-5193. DOI: 10.1007/s00170-022-08704-4.
 14. Yadaiah N., Bag S., Paul C.P., Kukreja L.M. Influence of self-protective atmosphere in fiber laser welding of austenitic stainless steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016;86(1-4):853-870. DOI: 10.1007/s00170-015-8194-8.
 15. Liu H.H., Wang L.B., Liu W.J. et al. Influence of AC magnetic field on the cladding layer during the micro beam plasma welding of austenitic stainless steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018;97(9):3459-3468. DOI: 10.1007/s00170-018-2182-8.
 16. Osintsev K.A., Kononov S.V., Gromov V.E., Ivanov Y.F., Panchenko I.A. Microstructure and mechanical properties of non-equiaxial Co_{25.4}Cr₁₅Fe_{37.9}Mn_{3.5}Ni_{16.8}Si_{1.4} high-entropy alloy produced by wire-arc additive manufacturing. Materials Letters. 2022;312(131675). DOI: 10.1016/j.matlet.2022.131675.
 17. Bataeva Z.B., Ruktuev A.A., Ivanov I.V. et al. Review of studies of alloys developed on the basis of the entropy approach. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Metal processing (technology, equipment, tools)], 2021;23(2):116-146. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-116-146. (In Russ.)
 18. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*. 2017;122:448-511. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.08.081.
 19. Kochetov N.A., Rogachev A.S., Shchukin A.S., Vadchenko S.G., Kovalev I.D. Mechanical alloying with partial amorphization of a multicomponent powder mixture Fe–Cr–Co–Ni–Mn and its electric spark plasma sintering to obtain a compact high-entropy material. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya* [Powder Metallurgy and Functional Coverings], 2018;(2):35-42. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-2-35-42. (In Russ.)
 20. Kochetov N.A., Rogachev A.S., Kovalev D.Yu. et al. Preparation of a high-entropy Fe–Cr–Co–Ni–Ti alloy by mechanical alloying and electric spark plasma sintering of a powder mixture. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya* [Powder Metallurgy and Functional Coverings], 2021;15(2):4-12. DOI: 10.17073/1997-308X-2021-2-4-12. (In Russ.)

Поступила 06.12.2024; принята к публикации 23.01.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 06/12/2024; revised 23/01/2025; published 30/09/2025

Михно Алексей Романович – директор научно-производственного центра

«Сварочные процессы и технологии»,

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнец, Россия.

Email: mikno-mm131@mail.ru. ORCID 0000-0002-7305-6692

Крюков Роман Евгеньевич – доктор технических наук, профессор кафедры механики и машиностроения,

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнец, Россия.

Email: rek_nzrmk@mail.ru. ORCID 0000-0002-3394-7941

Панченко Ирина Алексеевна – кандидат технических наук,

старший научный сотрудник управления научных исследований,

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнец, Россия.

Email: i.g.i.ss@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1631-9644

Кононов Сергей Валерьевич – доктор технических наук,

проректор по научной и инновационной деятельности,

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнец, Россия.

Email: kononov@sibsui.ru. ORCID 0000-0003-4809-8660

Перов Станислав Сергеевич – обучающийся, лаборант управления научных исследований,

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнец, Россия.

Email: stas.perov.2005@inbox.ru

Alexey R. Mikhno – Director of the Research and Production Center “Welding Processes and Technologies”, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: mikno-mm131@mail.ru. ORCID 0000-0002-7305-6692

Roman E. Kryukov – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Mechanics and Engineering, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: rek_nzrmk@mail.ru. ORCID 0000-0002-3394-7941

Irina A. Panchenko – PhD (Eng.), Senior Researcher at the Department of Scientific Research, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: i.r.i.ss@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1631-9644

Sergey V. Konovalov – DrSc (Eng.), Vice-Rector for Scientific and Innovation Activities, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: konovalov@sibsiu.ru. ORCID 0000-0003-4809-8660

Stanislav S. Perov – Student, Laboratory Assistant at the Department of Scientific Research, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: stas.perov.2005@inbox.ru