

Обзорная статья

УДК 621

DOI: 10.57070/2304-4497-2026-3(57)-17-28

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАПЛАВКИ ИЗ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ Fe – Cr – Mo – W В АТМОСФЕРЕ ЗАЩИТНОГО ГАЗА

© 2026 г. Н. П. Ломиворотов, А. Р. Михно, Г. И. Махневой, И. А. Панченко,
С. В. Коновалова

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

Аннотация. Приведены результаты исследования структуры, нанотвердости и модуль упругости наплавленного металла с помощью порошковой проволоки EnDOtec DO*15 с элементным составом Fe – Cr – Mo – W. Покрытие наносили с помощью сварочного трактора ASAW-1250 на стальные пластины марки 09Г2С в три слоя для предотвращения смешивания наплавляемого металла с подложкой. В структуре наплавленного слоя выявлен игольчатый мартенсит. Энергодисперсионный анализ (ЭДС) проводился с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), при анализе в наблюдаемых включениях выражено повышенное содержание серы, марганца, углерода и кислорода. По границам зерен наблюдали повышенную концентрацию карбидообразующих элементов хрома, ванадия, молибдена и вольфрама. Анализ переходного слоя в области границы между подложкой и наплавкой показывает более выраженную концентрацию карбидообразующих элементов в области наплавки. В этом же слое наблюдаются крупные включения (до 25 мкм) с высоким содержанием углерода. Нанотвердость и модуль упругости измеряли методом инструментального индентирования на приборе НаноСкан-4D, оснащенный индентором Берковича. По измеренным данным нанотвердости при нагрузках 100, 150 и 200 мН можно сделать вывод, что средняя нанотвердость и модуль упругости наплавки растут по мере смещения к верхнему слою наплавленного материала. Средняя нанотвердость исследуемого материала при режиме нагружения от 5 до 1500 мН составляет $4,82 \pm 1,44$ ГПа, а модуль упругости – $59,62 \pm 9,19$ ГПа.

Ключевые слова: наплавленный слой, порошковая проволока, микроструктура, нанотвердость, химический состав, модуль упругости, энергодисперсионный анализ

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00087-2401.

Для цитирования: Ломиворотов Н.П., Михно А.Р., Махнева Г.И., Панченко И.А., Коновалов С.В. Получение и исследование наплавки из порошковой проволоки Fe – Cr – Mo – W в атмосфере защитного газа. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2026;3(57):17–28. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-3\(57\)-17-28](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-3(57)-17-28)

*Review article***PRODUCTION AND STUDY OF SURFACING FROM Fe – Cr – Mo – W CORED WIRE IN A PROTECTIVE GAS ATMOSPHERE**

© 2026 N. P. Lomivorotov, A. R. Mikhno, G. I. Makhneva, I. A. Panchenko,
S. V. Konovalov

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

Abstract. The results of a study of the structure, nano-hardness, and elastic modulus of the deposited metal using EnDOTec DO*15 flux-cored wire with an elemental composition of Fe – Cr – Mo – W are presented. The coating was applied using an ASAW-1250 welding tractor onto steel plates of 09G2S grade in three layers to prevent mixing of the deposited metal with the substrate. Needle-shaped martensite was identified in the structure of the deposited layer. Energy dispersion analysis (EDS) was performed using scanning electron microscopy (SEM). During the analysis, the observed inclusions showed an increased content of sulfur, manganese, carbon and oxygen. Increased concentrations of the carbide-forming elements chromium, vanadium, molybdenum, and tungsten were observed along the grain boundaries. Analysis of the transition layer in the area of the boundary between the substrate and the surfacing shows a more pronounced concentration of carbide-forming elements in the surfacing area. In this same layer, large inclusions (up to 25 μm) with a high carbon content are observed. The nanohardness and elastic modulus were measured using the instrumental indentation method with a NanoScan-4D instrument equipped with a Berkovich indenter. Based on the measured nanohardness data at loads of 100, 150, and 200 mN, it can be concluded that the average nanohardness and elastic modulus of the surfacing increase as one moves towards the upper layer of the surfaced material. The average nanohardness of the material under study, under a loading mode ranging from 5 to 1500 mN, is 4.82 ± 1.44 GPa, and the elastic modulus is 59.62 ± 9.19 GPa.

Keywords: deposited layer, flux-cored wire, EnDOTec DO*15 Castolin 1.2 mm, microstructure, nanohardness, chemical composition, modulus of elasticity, energy dispersive analysis

For citation: Lomivorotov N.P., Mikhno A.R., Makhneva G.I., Panchenko I.A., Konovalov S.V. Production and study of surfacing from Fe – Cr – Mo – W cored wire in a protective gas atmosphere. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2026;3(57):17–28. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-3\(57\)-17-28](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-3(57)-17-28)

Введение

Современные технологии аддитивного производства активно развиваются, предлагая методы создания материалов с улучшенными и заданными свойствами [1 – 4]. Использование композитных порошковых частиц [5 – 9] повышает абразивную износостойкость за счет карбидного упрочнения, добавка молибдена и ванадия измельчает зерно и карбидные частицы в наплавленном слое, улучшает твердость, износостойкость и компенсирует влияние углерода на коррозионную стойкость (КС) [10]. Содержание хрома в покрытии также способствует увеличению КС [11]. На рассматриваемую величину могут влиять карбиды вольфрама WC за счет снижения образования карбидов Me_3C [12].

Использование технологий [13] прямого энергетического осаждения проволоочной дугой (WA-DED) повышает производительность, а лазерное осаждение порошка в слое позволяет значительно снизить массу инструмента. Метод

направленного осаждения энергии с помощью проволоки и порошка [14] приводит к упрочнению за счет измельчения зерна в сочетании с низкой стоимостью сырья.

Восстановленные лазерной наплавкой слои [15] демонстрируют хорошую КС и износостойкость по сравнению с электродуговой наплавкой. Электронно-пучковая обработка поверхности наплавки проволоки системы Fe – C – Cr – Nb – W [16] приводит к измельчению структуры и изменению морфологии карбидной фазы слоя, а также существенному повышению износостойкости и снижению коэффициента трения. Наплавленные слои из никелевого сплава Inconel 625 на сталь марки 16Mo3, полученные методом порошковой лазерной наплавки, обладают более высокой твердостью, чем полученные методом порошковой плазменной наплавкой [17].

Микроструктура покрытия сплава Stellite 6 при плазменной наплавке [18] в основном состоит из фаз $\alpha\text{-Co}$ и $(\text{Cr, Fe})_7\text{C}_3$, а коэффициент тре-

ния незначительно колеблется с увеличением нагрузки при температуре 300 °С. Поверхностный слой наплавки EnDOtec DO*33 [19] превышает микротвердость подложки в 2,4 раза, износостойкость в 3,0 раза, а коэффициент трения в 2,0 раза ниже. Использование карбоборидов [20; 21] позволяет получить износостойкие покрытия, а хромистая проволока, легированная карбоборидами, имеет высокую коррозионную стойкость.

Использование оксидов редкоземельных металлов [22] при увеличенном содержании углерода приводит к повышению твердости и снижению коэффициента трения. Частицы SiC [23] увеличивают пористость, прочность на разрыв и снижают пластичность образцов.

Твердость композиционных покрытий из титановых сплавов возрастает с увеличением скорости подачи порошка кремния, что можно объяснить упрочняющим эффектом второй фазы, образующейся из соединения Ti_5Si_3 [24]. Микротвердость сплавов, полученных методом наплавки порошковой проволокой, значительно увеличивается после лазерной наплавки, особенно для сплавов с низким содержанием меди [25]. Увеличение сварочного тока улучшило диффузию соединения TiC, формируя износостойкие титановые композиты [26], упрочнение происходит за счет измельчения зерна [27].

Рост прочности сплавов с магниевой матрицей [28; 29] происходит в первую очередь за счет измельчения зерна. Наплавка сплавов с помощью алюминиевой проволоки и порошков WC и Ti [30] снижает образование хрупкого карбида Al_4C_3 в металлической матрице благодаря титану. Для алюминиевых композитов SiC_p/Al размер зерен α -Al [31] был значительно меньше у образцов с одновременным введением порошка и проволоки, а временное сопротивление разрыву изготовленных композитов (246,0 МПа) было выше, чем у образца из алюминия, изготовленного методом лазерного осаждения с подачей проволоки (230,8 МПа).

Твердость поверхности, скорость износа и коэффициент трения заэвтектических силуминов улучшились после лазерной наплавки композитных покрытий металлической матрицы на основе графита [32].

Моделирование совмещенной коаксиальной порошково-проволочной направленной энергетической наплавки Inco625 и порошковых материалов GRCor-42 для аддитивного производства позволяет получать различные сплавы [33].

Качество поверхности фрикционной наплавки [34 – 36] ухудшается с увеличением скорости подачи и перемещения расходного стержня, однако, прочность связи повышается с увеличением скорости подачи, вращения и перемещения

расходного стержня. Покрытия демонстрируют повышение твердости за счет образования мартенсита, высокой плотности дислокаций и выделения оксидов, а также увеличения временного сопротивления и деформации разрушения. Для доэвтектических силуминовых сплавов фрикционная наплавка приводит к измельчению зерна и сфероидизации частиц кремния, что напрямую повышает износостойкость [37; 38].

Лигатура, полученная путем утилизации отходов заточного производства, с успехом может использоваться в качестве шихты в наплавочных порошковых проволоках [39]. Метод, описанный в работе [40], позволяет получить бездефектные сварные соединения, которые при дополнительной горячей присадке проволокой ПП-ГСН упрочняются в области шва за счет образования мартенсита деформации.

Целью настоящей работы является исследование наплавленного покрытия, полученного с помощью порошковой проволоки EnDOtec DO*15 Castolin 1.2 мм.

Материалы и методы исследования

В настоящей работе исследовали образцы, полученные с помощью наплавки порошковой проволоки марки EnDOtec DO*15 Castolin диаметром 1,2 мм, которая была изготовлена из сплава Fe – Cr – Mo – W. Для нанесения электродуговых покрытий был задействован сварочный трактор ASAW-1250 (рис. 1). Наплавку выполняли на стальные пластины марки 09Г2С в три слоя для предотвращения смешивания наплавляемого металла и подложки с использованием защитного газа аргона. Режим наплавки проводили при силе сварного тока 420 А, напряжении дуги 38,0 В и скорости подачи проволоки примерно 18 см/мин, скорость перемещения трактора 10 – 12 см/мин.

Для исследований были изготовлены макрошлифы размеров 20 × 10 × 10 мм для измерения нанотвердости и изучения микроструктуры на сканирующем электронном микроскопе KYKY-EM6900 с программным обеспечением AZtecOne.

Измерение нанотвердости и модуля упругости осуществляли с помощью нанотвердомера НаноСкан-4D методом Берковича с последующим расчетом нанотвердости и модуля упругости. Параметры измерения нанотвердости следующие: индентор – трехгранная пирамида типа Берковича; время нагружения – 10 с; время разгружения – 10 с; время поддержания максимальной нагрузки – 10 с; прикладываемая нагрузка для трех зон измерения – 100; 150 и 200 мН (10 индентирований); прикладываемая нагрузка вдоль всего наплавленного металла – от 5 до 1500 мН (30 индентирований с шагом в 50 мН).

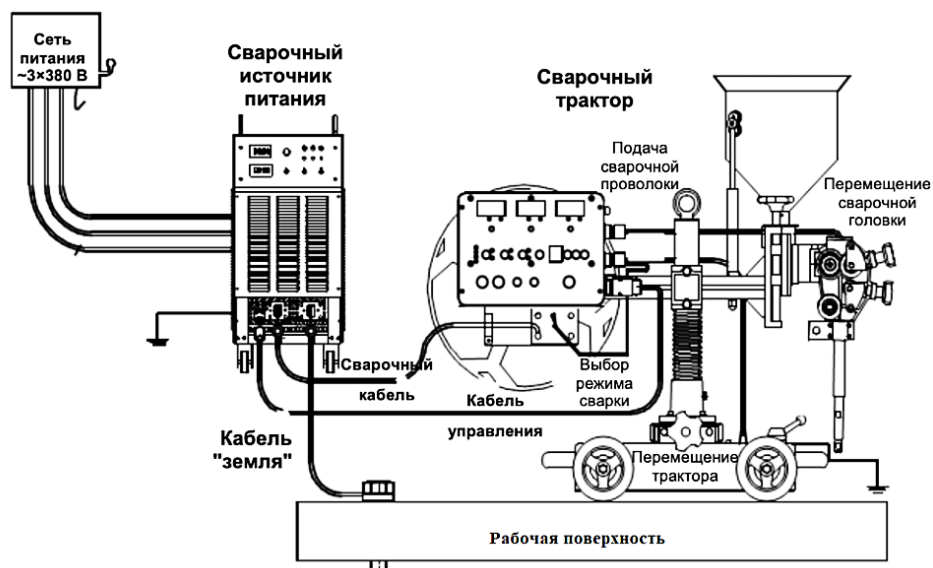


Рис. 1. Схематичное изображение сварочного трактора ASAW-1250
Fig. 1. Schematic diagram of the ASAW-1250 welding tractor

Результаты и их обсуждение

Структура наплавленного слоя (рис. 2) имеет вид игольчатого мартенсита. С помощью ЭДС анализа был получен следующий химический состав наплавленного покрытия: 4,70 % C; 0,10 % Al; 0,53 % Si; 0,37 % V; 3,60 % Cr; 0,91 % Mn; 1,21 % Mo; 1,15 % W и 87,42 % Fe. По границам зерен видны повышенные концентрации элементов хрома и молибдена (рис. 2, б).

Наибольшее содержание химических элементов зафиксировано в областях 1 – 3 (рис. 2, табл. 1). В области 1 высокое содержание серы и марганца, также в этой области присутствует незначительное количество алюминия. Область 2 обогащена алюминием и кислородом, обеднена хромом и ванадием, а также содержит элементы Na, Ca и K. В области 3 повышена концентрация алюминия и кислорода. Области 4 – 8 имеют

идентичный элементный состав с разной концентрацией элементов, по границам зерен в областях 4 и 5 повышенное содержание вольфрама и молибдена; содержание хрома выше в 4, 5 и 7.

В области границы раздела подложки и наплавки металл имеет структуру игольчатого мартенсита (рис. 3, а). Получили следующий элементарный состав: 7,56 % C; 1,89 % O; 0,39 % Si; 1,86 % Cr; 0,68 % Mn; 0,25 % Cu; 0,44 % W; 0,18% V; 0,71 % Mo и 86,03 % Fe.

Области (1 и 9) подложки содержат наименьшие концентрации хрома, кремния и марганца (рис. 3, а, табл. 2), в этих же областях присутствует медь. Область 1 имеет повышенное содержание углерода и кислорода. Область 9 имеет наибольшую концентрацию железа. Области 2 и 3 содержат повышенное количество хрома в сравнении с подложкой.

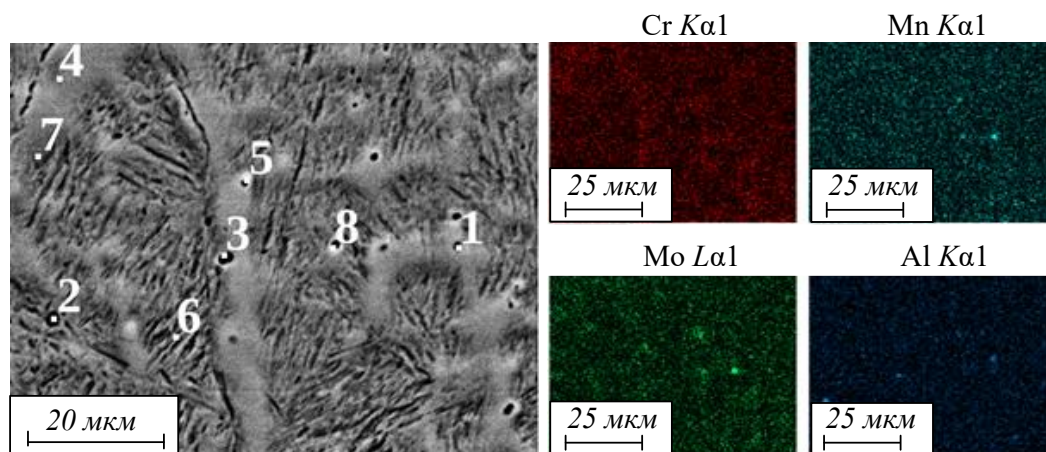


Рис. 2. Микроструктура, полученная с помощью СЭМ в области наплавки; и картирование элементов:
1 – 8 – точки определения элементного анализа

Fig. 2. Microstructure obtained using SEM in the surfacing area:
1 – 8 – points for elemental analysis

Элементный состав наплавки

Table 1. Elemental composition of the surfacing

Элемент	Содержание, мас. %, элемента в точках							
	1	2	3	4	5	6	7	8
C	5,01	2,99	1,71	4,59	6,94	7,14	5,42	6,76
Si	0,52	0,78	0,32	0,63	0,64	0,60	0,46	0,49
Fe	64,68	63,99	73,70	85,40	83,98	85,88	87,34	86,60
V	0,49	0,20	0,40	0,51	0,44	0,37	0,36	0,33
Cr	4,33	2,65	3,37	4,38	3,87	3,31	3,72	3,33
Mn	15,02	0,85	0,76	0,94	0,82	0,81	0,88	0,69
Mo	2,00	–	0,95	1,99	1,83	1,07	0,89	0,91
W	–	–	0,96	1,57	1,47	0,82	0,94	0,88
Al	0,34	12,02	8,90	–	–	–	–	–
S	7,61	0,76	–	–	–	–	–	–
O	–	11,70	8,63	–	–	–	–	–
Na	–	1,78	–	–	–	–	–	–
Ca	–	0,53	0,31	–	–	–	–	–
K	–	1,75	–	–	–	–	–	–

Области 4, 6 – 8 содержат наибольшее количество хрома, вольфрама и ванадия. В точках 4 и 6 присутствует молибден; в 4 – алюминий; в 6 – кислород; в 7 и 8 – сера. На рис. 3 (область 5) представлено одно из неметаллических включений размерами до 25 мкм с высоким содержанием углерода, концентрация хрома, ванадия и вольфрама заметно меньше, чем по всей наплавке.

Средняя нанотвердость наплавки (табл. 3, рис. 4) при нагрузках 100, 150 и 200 мН растет по мере смещения к верхнему слою наплавленного материала. В зонах а и б при нагрузках 150 и 200 мН различия средней нанотвердости наименьшее, что говорит о получении твердого

покрытия вдоль большей части наплавленных слоев. Большие значения нанотвердости получены при более низких нагрузках (100 мН) в верхнем слое наплавленного металла.

Средний слой наплавленного металла имеют более высокие значения модуля упругости, за исключением нагрузки в 200 мН, где наибольший модуль упругости в верхнем слое наплавки, но разница незначительная. Наименьший модуль упругости в зоне в.

Измерение нанотвердости при возрастающих нагрузках от 5 до 1500 мН проводили по всем наплавленным слоям, начиная с переходного и заканчивая верхнем слое. Средние значения

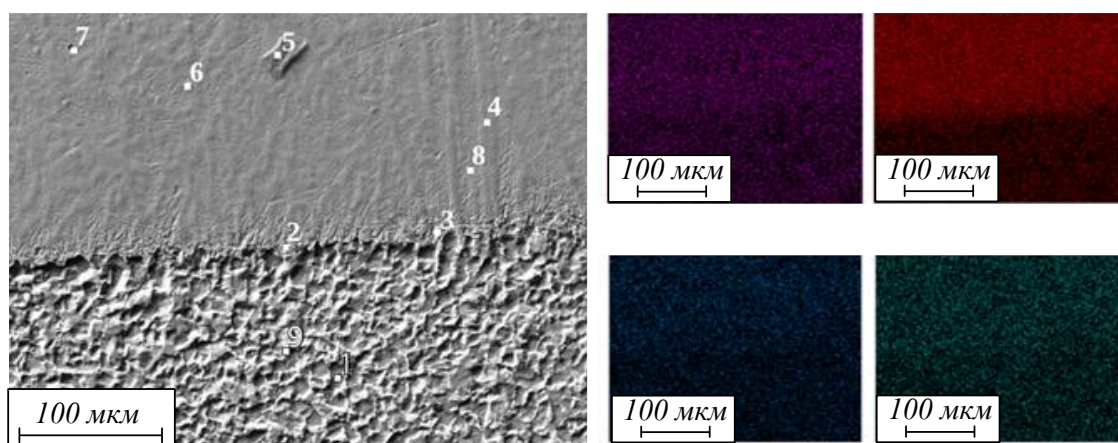


Рис. 3. Микроструктуры, полученное с помощью СЭМ, на границы раздела подложки и наплавки:

а – область сплавления наплавки и подложки; б – картирование элементов;

1 – 9 – точки для определения химического состава материала

Fig. 3. Microstructure image obtained using SEM:

а – the fusion zone of the overlay and the substrate; б – element mapping;

1 – 9 – points for determining the chemical composition of the material

Элементный состав на границе раздела подложки и наплавки

Table 2. The elemental composition at the interface between the substrate and the surfacing layer

Элемент	Содержание, мас. %, элемента в точках								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
C	14,41	7,30	8,27	5,76	28,86	6,51	4,28	5,56	4,54
Si	0,27	0,28	0,38	0,44	0,33	0,50	0,56	0,57	0,29
Fe	76,91	88,42	85,78	86,85	62,10	84,83	88,28	87,44	93,91
Mn	0,43	0,52	0,56	0,80	0,59	0,83	0,96	0,93	0,54
Cr	0,60	1,21	1,37	3,28	2,57	3,34	3,85	3,54	0,33
V	–	–	–	0,35	0,23	0,31	0,34	0,39	–
O	6,37	1,90	3,64	–	4,57	1,69	–	–	–
W	–	–	–	1,30	0,53	1,00	1,30	1,12	–
Mo	0,44	0,37	–	0,98	–	0,98	–	–	–
S	–	–	–	–	0,23	–	0,43	0,45	–
Cu	0,58	–	–	–	–	–	–	–	0,38
Al	–	–	–	0,24	–	–	–	–	–

нанотвердости и модуля упругости при режиме возрастающей нагрузки измерения составляют $4,82 \pm 1,44$ и $59,62 \pm 9,19$ ГПа.

Выводы

Микроструктура наплавленных слоев представлена в виде игольчатого мартенсита и редких включений (до 25 мкм) с высоким содержанием углерода.

С применением ЭДС анализа наплавленного слоя выявили повышенные концентрации карбидообразующих элементов по границам зерен. Анализ картирования показывает наименьшее количество хрома в области подложки, содержание которого возрастает с переходом в наплавку и достигает высокие значений в наплавленной области.

Средняя нанотвердость наплавки растет при фиксированных нагрузках 100, 150 и 200 мН по мере смещения к верхнему слою наплавленного материала, наименьшая разница средней нанотвердости наблюдаются в верхнем и сред-

нем слоях наплавки при нагрузках 150 и 200 мН. При нагрузке 100 мН верхние слои наплавленного металла имеют большую нанотвердость. Модуль упругости имеет более высокие значения в среднем слое наплавленного металла за исключением нагрузки в 200 мН, где больший модуль упругости в верхних слоях. Наименьший модуль упругости в переходной зоне.

При возрастающих нагрузках от 5 до 1500 мН средняя нанотвердость при этом режиме измерения составляет $4,82 \pm 1,44$ ГПа, а модуль упругости – $59,62 \pm 9,19$ ГПа. При рассмотрении трех групп измерений этого режима можно выделить следующее:

- при нагрузке 5 мН получили нанотвердость 10,67 ГПа, а модуль упругости – 85,61 ГПа;
- измерения при нагрузках 100, 150 и 200 мН схожи со средними значениям при измерении с фиксированным режимом нагружения;
- при нагрузках от 300 мН до 1500 мН средняя нанотвердость составляет $4,31 \pm 0,23$ ГПа, а модуль упругости $55,81 \pm 1,40$ ГПа.

Нанотвердость и модуль упругости исследуемых образцов

Table 3. Nanohardness and elastic modulus of the studied samples

Зона	Нанотвердость, ГПа			Модуль упругости, ГПа		
	при нагрузке, мН					
	100	150	200	100	150	200
<i>a</i>	6,90 ± 0,54	6,46 ± 0,22	5,90 ± 0,31	108,51 ± 18,69	97,42 ± 5,26	84,10 ± 4,33
<i>б</i>	6,42 ± 0,31	6,45 ± 0,15	5,88 ± 0,21	113,93 ± 7,38	111,63 ± 4,23	83,20 ± 1,68
<i>в</i>	5,86 ± 0,39	5,50 ± 0,37	4,92 ± 0,46	102,78 ± 11,18	92,93 ± 7,13	78,13 ± 6,84

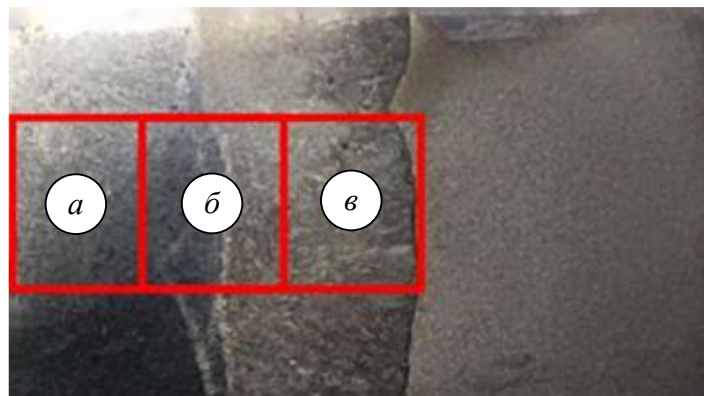


Рис. 4. Область испытания на нанотвердость:

а – верхний слой, *б* – средние слои, *в* – на границе раздела с подложкой (первый слой)

Fig. 4. The area of the nano-hardness test:

a – the top layer, *b* – the middle layers, *c* – at the interface with the substrate (the first layer)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Menon N., Sawyer B.A., Jamieson, C.D., Reutzel E.W., Basak A. A Comparison of microstructure and microhardness properties of IN718 fabricated via powder- and wire-fed laser-directed energy deposition. *Materials*. 2023;16:1129. <https://doi.org/10.3390/ma16031129>
2. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P., Perovskay M.V., Bolgaru K.A., Braverman B.S. Enhancing coating properties by application of pulsed arc surfacing method when modifying the molten metal by composite powder materials. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;1115:42035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1115/4/042035>
3. Zykova A., Chumaevskii A., Vorontsov A., Shamarin N., Panfilov A., Knyazhev E., Moskvichev E., Gurianov D., Savchenko N., Kolubaev E., Tarasov S. V. Microstructural evolution of AA5154 layers intermixed with Mo powder during electron beam wire-feed additive manufacturing (EBAM). *Metals*. 2022;12(1):109. <https://doi.org/10.3390/met12010109>
4. Zhang T., Wang L., Wang Z., Yang H., Tan H., Lin X., Huang W. Effect of powder-feeding process on metal transfer mode and microstructural evolution of wire-powder-arc directed energy deposition-manufactured aluminum alloys. *Virtual and Physical Prototyping*. 2025;20(1):e2499930. <https://doi.org/10.1080/17452759.2025.2499930>
5. Yao H., Gong J., Cheng S., Liu C., Huang H. Effects of travel speed on the microstructure and abrasion resistance of hardfacing alloys deposited with composite powder particles and solid wire. *Metals*. 2020;10(6):740. <https://doi.org/10.3390/met10060740>
6. Zhang X., Liu Y., Cheng H., Li K., Qian C., Li W. Composite Fe – Cr – V – C coatings prepared by plasma transferred-arc powder surfacing. *Materials*. 2023;16(14):5059. <https://doi.org/10.3390/ma16145059>
7. Zhou S., Wu K., Yang G., Deng F., Hou N., Qin L., Guo J. Grain-refining of wire arc additive manufactured aluminum alloy with Nb powder addition. *Materials Research Express*. 2021;8(2):26520. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/abe6d5>
8. Лосев А.С., Еремин Е.Н., Маталасова А.Е. и др. Исследование теплостойкости штамповой стали, наплавленной порошковой проволокой Н13М5Х4ФСТЮР. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия*. 2015;15(1):77–80.
9. Xiong J., Zhang H., Nie F., He F., Yang J., Zhan H., Wen Z., Zhao H., Yuan X. Formation mechanisms for (Cr,Co)7C3/(Cr,Co)23C6 heterogeneous precipitates and stacking faults around carbides in surfacing welding of stellite alloy on stainless steel. *Metals and Materials International*. 2021;28(7):1639–1649. <https://doi.org/10.1007/s12540-021-01049-9>
10. Xu T., Wei C., Han X., Liu J., He Z., Lu N. Effect of carbon content and elements Mo and V on the microstructure and properties of stainless steel powder surfacing layer. *Coatings*. 2020;10(4):371. <https://doi.org/10.3390/coatings10040371>
11. Jia C., Li M., Su C., Han B. Microstructure and properties of particle-reinforced Inconel 625 coatings by wire-powder synergistic high-speed laser cladding. *Journal of Physics: Conference Series*. 2025;2981(1):12003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2981/1/012003>
12. Vorontsov A., Zykova A., Gurianov D., Shamarin N., Panfilov A., Chumaevskii A.V., Kalashnikov K., Kolubaev E., Savchenko N.

- Mechanical Properties of dispersion-strengthened iron-based W + WC(Ni) composite produced by combined wire electron-beam manufacturing with powder addition. *Journal of Composites Science*. 2025;9(4):144. <https://doi.org/10.3390/jcs9040144>
13. Alimov A., Sviridov A., Sydow B., Jensch F., Härtel S. Additive manufacturing of hot-forming dies using laser powder bed fusion and wire arc direct energy deposition technologies. *Metals*. 2023;13(11):1842. <https://doi.org/10.3390/met13111842>
 14. Bozeman S.C., Isgor O.B., Tucker J. Area-based composition predictions of materials fabricated using simultaneous wire-powder-directed energy deposition. *Additive Manufacturing Letters*. 2024;11:100254. <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2024.100254>
 15. Li Z., Chai L., Tang Y., Zhang C., Qi L., Huang C. 316L stainless steel repaired layers by weld surfacing and laser cladding on a 27SiMn steel: A comparative study of microstructures, corrosion, hardness and wear performances. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;23:2043–2053. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.162>
 16. Громов В.Е., Кормышев В.Е., Глезер А.М., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф. Градиентная структура слоя, наплавленного на сталь Hardox 450 порошковой проволокой системы Fe – C – Cr – Nb – W и модифицированного электронно-пучковой обработкой. *Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия*. 2018;61(4):313–318. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-4-313-318>
 17. Czupryński A., Wyględacz B. Comparative analysis of laser and plasma surfacing by nickel-based superalloy of heat resistant steel. *Materials*. 2020;13(10):2367. <https://doi.org/10.3390/ma13102367>
 18. Zhu Z., Ouyang C., Qiao Y., Zhou X. Wear Characteristic of Stellite 6 alloy hardfacing layer by plasma arc surfacing processes. *Scanning*. 2017;2017:1–7. <https://doi.org/10.1155/2017/6097486>
 19. Григоренко Г.М., Коржик В.Н., Адеева Л.И. 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):125–137.
 20. Еремин Е.Н., Лосев А.С., Бородихин С.А. и др. Структура и свойства покрытий из хромистой стали, легированной карбидом бора. *Динамика систем, механизмов и машин*. 2017;5(2):180–185. <https://doi.org/10.25206/2310-9793-2017-5-2-180-185>
 21. Капралов Е.В., Будовских Е.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. Наноструктурные состояния и свойства наплавки, сформированной на стали порошковой проволокой. *Известия вузов. Физика*. 2015;58(4):39–45.
 22. Malinowski P., Kasińska J., Rutkowski S., Madej M. J. Exploratory data analysis for the evaluation of tribological properties of wear-resistant surface layers modified with rare-earth metals. *Materials*. 2022;15(6):2032. <https://doi.org/10.3390/ma15062032>
 23. Zhou Y., Shakibi A., Grandhi M., Liu Z., Ning F. Wire-influenced particle dynamics and fluid flow behaviors of melt pool in coaxial wire-powder fed directed energy deposition of metal matrix composites. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025;36:2909–2924. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.04.015>
 24. Men B., Sun S., Hu C., Zhang Q., Han B. Microstructure and wear resistance of Si – TC4 composite coatings by high-speed wire-powder laser cladding. *Materials*. 2024;17(5):1126. <https://doi.org/10.3390/ma17051126>
 25. Zhang X., Wu W., Zhang X., Wang Y. Effect of laser quenching on wire-powder collaborative arc additive manufacturing of Ti6Al4V – Cu Alloys with 2.4 % and 7.9 % Copper Content. *Materials*. 2024;17(24):6176. <https://doi.org/10.3390/ma17246176>
 26. Guo X., Ma M., Zhang S., Wei Z. Wear-resistant Ti/TiCp composite coatings via synchronous powder supplied wire arc additive manufacturing. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025;34:761–775. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.12.087>
 27. Wang C., Xing F., Liu X., Bian H., Liu W. Microstructure and mechanical property improvement of concurrent wire-powder feeding laser melting deposition Ti – 6Al – 4V via TiC addition. *Materials Research Express*. 2024;11(8):86510. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad6d36>
 28. Zhang C., Li Z., Tu Y., Wang J., Weng F., Zhang J., Tang H., Tang H. Regulation on microstructure and mechanical properties of SiC particles reinforced AZ31 magnesium matrix composites fabricated by synchronous feeding of powder and wire in wire-arc directed energy deposition. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024;30:7789–7802. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.070>

29. Zhang C., Li Z., Tu Y., Wang J., Zhang J., Tang H. In-situ strengthening of AZ31 magnesium alloy by introducing TC4 particles during wire-arc directed energy deposition with simultaneous feeding of powder and wire. *Virtual and Physical Prototyping*. 2024;19(1):17. <https://doi.org/10.1080/17452759.2024.2387294>
30. Li F., Gao Z., Zhang Y., Chen Y. Alloying effect of titanium on WCp/Al composite fabricated by coincident wire-powder laser deposition. *Materials and Design*. 2016;93:370–378. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.171>
31. Mi G., Xiang Y., Wang C., Xiong L., Ouyang Q. Microstructure and mechanical properties of SiCp/Al composite fabricated by concurrent wire-powder feeding laser deposition. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;22:66–79. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.112>
32. Quazi M., Ishak M., Arslan A.N., Fazal M., Yusof F., Sazzad B.S., Nasir Bashir M., Jamshaid M. Mechanical and tribological performance of a hybrid MMC coating deposited on Al – 17Si piston alloy by laser composite surfacing technique. *RSC Advances*. 2018;8(13):6858–6869. <https://doi.org/10.1039/c7ra08191j>
33. Lawson S.B., Yan D., Tabei A., Paul B.K., Paul B.K., Pasebani S. Numerical Modeling of Coaxial Wire-Powder Laser Directed Energy Deposition Process for Dissimilar Metal Additive Manufacturing. *Results in Materials*. 2025;26:100701. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2025.100701>
34. Li H., Qin W., Galloway A., Toumpis A. Friction surfacing of aluminium alloy 5083 on DH36 steel plate. *Metals*. 2019;9(4):479. <https://doi.org/10.3390/met9040479>
35. Fitseva V., Hanke S., Santos J. F. D., Stemmer P., Gleising B. The role of process temperature and rotational speed in the microstructure evolution of Ti – 6Al – 4V friction surfacing coatings. *Materials and Design*. 2016;110:112–123. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.132>
36. Silvério S., Krohn H., Fitseva V., Alcântara N.G.D., Santos J.F.D. Deposition of AA5083-H112 Over AA2024-T3 by friction surfacing. *Soldagem e Inspecao*. 2018;2:225–234. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/si2302.09>
37. Schütte M.R., Ehrich J., Linsler D., Hanke S. Effects of microstructure modification by friction surfacing on wear behavior of Al alloys with different Si contents. *Materials*. 2022;15(5):1641. <https://doi.org/10.3390/ma15051641>
38. Bararpour S. M., Jamshidi Aval H., Jamaati R. Combined experimental-numerical analysis of A356 aluminum alloy friction surfacing on AA2024 aluminum alloy substrate. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;25:4860–4875. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.265>
39. Лентюгов И.П., Рябцев И.А. Структура и свойства металла, наплавленного порошковой проволокой с шихтой из переработанных металлоабразивных отходов. *Автоматическая сварка*. 2015;5-6(742):94–96.
40. Смоленцев М.С., Смоленцев А.С., Коробов Ю.С., Шолохов М.А. Влияние дополнительной горячей присадки при дуговой сварке порошковой проволокой высокопрочных сталей. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2023;25(3):87–94. <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2023.3.09>

REFERENCES

1. Menon N., Sawyer B.A., Jamieson, C.D., Reutzel E.W., Basak A. A Comparison of microstructure and microhardness properties of IN718 fabricated via powder- and wire-fed laser-directed energy deposition. *Materials*. 2023;16:1129. <https://doi.org/10.3390/ma16031129>
2. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P., Perovskay M.V., Bolgaru K.A., Braverman B.S. Enhancing coating properties by application of pulsed arc surfacing method when modifying the molten metal by composite powder materials. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;1115:42035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1115/4/042035>
3. Zykova A., Chumaevskii A., Vorontsov A., Shamarin N., Panfilov A., Knyazhev E., Moskvichev E., Gurianov D., Savchenko N., Kolubaev E., Tarasov S. V. Microstructural evolution of AA5154 layers intermixed with Mo powder during electron beam wire-feed additive manufacturing (EBAM). *Metals*. 2022;12(1):109. <https://doi.org/10.3390/met12010109>
4. Zhang T., Wang L., Wang Z., Yang H., Tan H., Lin X., Huang W. Effect of powder-feeding process on metal transfer mode and microstructural evolution of wire-powder-arc directed energy deposition-manufactured aluminum alloys. *Virtual and Physical Prototyping*. 2025;20(1):e2499930. <https://doi.org/10.1080/17452759.2025.2499930>
5. Yao H., Gong J., Cheng S., Liu C., Huang H. Effects of travel speed on the microstructure and abrasion resistance of hardfacing alloys deposited with composite powder particles and

- solid wire. *Metals*. 2020;10(6):740. <https://doi.org/10.3390/met10060740>
6. Zhang X., Liu Y., Cheng H., Li K., Qian C., Li W. Composite Fe – Cr – V – C coatings prepared by plasma transferred-arc powder surfacing. *Materials*. 2023;16(14):5059. <https://doi.org/10.3390/ma16145059>
 7. Zhou S., Wu K., Yang G., Deng F., Hou N., Qin L., Guo J. Grain-refining of wire arc additive manufactured aluminum alloy with Nb powder addition. *Materials Research Express*. 2021;8(2):26520. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/abe6d5>
 8. Losev A.S., Eremin E.N., Matalasova A.E., et al. Study of the heat resistance of die steel welded with H13M5Kh4FSTYUR flux-cored wire. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya*. 2015;15(1):77–80. (In Russ.).
 9. Xiong J., Zhang H., Nie F., He F., Yang J., Zhan H., Wen Z., Zhao H., Yuan X. Formation mechanisms for (Cr,Co)7C3/(Cr,Co)23C6 heterogeneous precipitates and stacking faults around carbides in surfacing welding of stellite alloy on stainless steel. *Metals and Materials International*. 2021;28(7):1639–1649. <https://doi.org/10.1007/s12540-021-01049-9>
 10. Xu T., Wei C., Han X., Liu J., He Z., Lu N. Effect of carbon content and elements Mo and V on the microstructure and properties of stainless steel powder surfacing layer. *Coatings*. 2020;10(4):371. <https://doi.org/10.3390/coatings10040371>
 11. Jia C., Li M., Su C., Han B. Microstructure and properties of particle-reinforced Inconel 625 coatings by wire-powder synergistic high-speed laser cladding. *Journal of Physics: Conference Series*. 2025;2981(1):12003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2981/1/012003>
 12. Vorontsov A., Zyкова A., Gurianov D., Shamarin N., Panfilov A., Chumaevskii A.V., Kalashnikov K., Kolubaev E., Savchenko N. Mechanical Properties of dispersion-strengthened iron-based W + WC(Ni) composite produced by combined wire electron-beam manufacturing with powder addition. *Journal of Composites Science*. 2025;9(4):144. <https://doi.org/10.3390/jcs9040144>
 13. Alimov A., Sviridov A., Sydow B., Jensch F., Härtel S. Additive manufacturing of hot-forming dies using laser powder bed fusion and wire arc direct energy deposition technologies. *Metals*. 2023;13(11):1842. <https://doi.org/10.3390/met13111842>
 14. Bozeman S.C., Isgor O.B., Tucker J. Area-based composition predictions of materials fabricated using simultaneous wire-powder-directed energy deposition. *Additive Manufacturing Letters*. 2024;11:100254. <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2024.100254>
 15. Li Z., Chai L., Tang Y., Zhang C., Qi L., Huang C. 316L stainless steel repaired layers by weld surfacing and laser cladding on a 27SiMn steel: A comparative study of microstructures, corrosion, hardness and wear performances. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;23:2043–2053. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.162>
 16. Gromov V.E., Kormyshev V.E., Glezer A.M., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F. Gradient structure of the layer deposited on Hardox 450 steel using Fe–C–Cr–Nb–W system flux-cored wire and modified by electron-beam treatment. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018;61(4):31–318. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-4-313-318>
 17. Czupryński A., Wyględacz B. Comparative analysis of laser and plasma surfacing by nickel-based superalloy of heat resistant steel. *Materials*. 2020;13(10):2367. <https://doi.org/10.3390/ma13102367>
 18. Zhu Z., Ouyang C., Qiao Y., Zhou X. Wear Characteristic of Stellite 6 alloy hardfacing layer by plasma arc surfacing processes. *Scanning*. 2017;2017:1–7. <https://doi.org/10.1155/2017/6097486>
 19. Grigorenko G.M., Korzhik V.N., Adeeva L.I. et al. Features of metallurgical processes during plasma-arc spraying of coatings obtained from powdered wire with a steel sheath and fillers B4C and B4C + ZrO2. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2016;(32):125–137. (In Russ.).
 20. Eremin E.N., Losev A.S., Borodikhin S.A., et al. Structure and properties of coatings made of chromium steel alloyed with boron carbide. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin*. 2017;5(2):180–185. <https://doi.org/10.25206/2310-9793-2017-5-2-180-185>
 21. Kapralov E.V., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F. Nanostructural states and properties of surfacing formed on steel using cored wire. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2015;58(4):39–45. (In Russ.).
 22. Malinowski P., Kasińska J., Rutkowski S., Madej M. J. Exploratory data analysis for the evaluation of tribological properties of wear-resistant surface layers modified with rare-earth metals. *Materials*. 2022;15(6):2032. <https://doi.org/10.3390/ma15062032>

23. Zhou Y., Shakibi A., Grandhi M., Liu Z., Ning F. Wire-influenced particle dynamics and fluid flow behaviors of melt pool in coaxial wire-powder fed directed energy deposition of metal matrix composites. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025;36:2909–2924. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.04.015>
24. Men B., Sun S., Hu C., Zhang Q., Han B. Microstructure and wear resistance of Si – TC4 composite coatings by high-speed wire-powder laser cladding. *Materials*. 2024;17(5):1126. <https://doi.org/10.3390/ma17051126>
25. Zhang X., Wu W., Zhang X., Wang Y. Effect of laser quenching on wire-powder collaborative arc additive manufacturing of Ti6Al4V – Cu Alloys with 2.4 % and 7.9 % Copper Content. *Materials*. 2024;17(24):6176. <https://doi.org/10.3390/ma17246176>
26. Guo X., Ma M., Zhang S., Wei Z. Wear-resistant Ti/TiCp composite coatings via synchronous powder supplied wire arc additive manufacturing. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025;34:761–775. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.12.087>
27. Wang C., Xing F., Liu X., Bian H., Liu W. Microstructure and mechanical property improvement of concurrent wire-powder feeding laser melting deposition Ti – 6Al – 4V via TiC addition. *Materials Research Express*. 2024;11(8):86510. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad6d36>
28. Zhang C., Li Z., Tu Y., Wang J., Weng F., Zhang J., Tang H., Tang H. Regulation on microstructure and mechanical properties of SiC particles reinforced AZ31 magnesium matrix composites fabricated by synchronous feeding of powder and wire in wire-arc directed energy deposition. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024;30:7789–7802. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.070>
29. Zhang C., Li Z., Tu Y., Wang J., Zhang J., Tang H. In-situ strengthening of AZ31 magnesium alloy by introducing TC4 particles during wire-arc directed energy deposition with simultaneous feeding of powder and wire. *Virtual and Physical Prototyping*. 2024;19(1):17. <https://doi.org/10.1080/17452759.2024.2387294>
30. Li F., Gao Z., Zhang Y., Chen Y. Alloying effect of titanium on WCp/Al composite fabricated by coincident wire-powder laser deposition. *Materials and Design*. 2016;93:370–378. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.171>
31. Mi G., Xiang Y., Wang C., Xiong L., Ouyang Q. Microstructure and mechanical properties of SiCp/Al composite fabricated by concurrent wire-powder feeding laser deposition. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;22:66–79. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.112>
32. Quazi M., Ishak M., Arslan A.N., Fazal M., Yusof F., Sazzad B.S., Nasir Bashir M., Jamshaid M. Mechanical and tribological performance of a hybrid MMC coating deposited on Al – 17Si piston alloy by laser composite surfacing technique. *RSC Advances*. 2018;8(13):6858–6869. <https://doi.org/10.1039/c7ra08191j>
33. Lawson S.B., Yan D., Tabei A., Paul B.K., Paul B.K., Pasebani S. Numerical Modeling of Coaxial Wire-Powder Laser Directed Energy Deposition Process for Dissimilar Metal Additive Manufacturing. *Results in Materials*. 2025;26:100701. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2025.100701>
34. Li H., Qin W., Galloway A., Toumpis A. Friction surfacing of aluminium alloy 5083 on DH36 steel plate. *Metals*. 2019;9(4):479. <https://doi.org/10.3390/met9040479>
35. Fitseva V., Hanke S., Santos J. F. D., Stemmer P., Gleising B. The role of process temperature and rotational speed in the microstructure evolution of Ti – 6Al – 4V friction surfacing coatings. *Materials and Design*. 2016;110:112–123. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.132>
36. Silvério S., Krohn H., Fitseva V., Alcântara N.G.D., Santos J.F.D. Deposition of AA5083-H112 Over AA2024-T3 by friction surfacing. *Soldagem e Inspecao*. 2018;2:225–234. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/si2302.09>
37. Schütte M.R., Ehrich J., Linsler D., Hanke S. Effects of microstructure modification by friction surfacing on wear behavior of al alloys with different si contents. *Materials*. 2022;15(5):1641. <https://doi.org/10.3390/ma15051641>
38. Bararpour S. M., Jamshidi Aval H., Jamaati R. Combined experimental-numerical analysis of A356 aluminum alloy friction surfacing on AA2024 aluminum alloy substrate. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;25:4860–4875. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.265>
39. Lentugov I.P., Ryabtsev I.A. Structure and properties of metal deposited with flux-cored wire containing a charge made from recycled metal-abrasive waste. *Avtomaticheskaya svarka*. 2015;5-6(742):94–96. (In Russ.).
40. Smolentsev M.S., Smolentsev A.S., Korobov Yu.S., Sholokhov M.A. The effect of an additional hot additive during arc welding with flux-cored wire of high-strength steels. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroyeniye, materialovedeniye*. 2023;25(3):87–94. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2023.3.09>

Сведения об авторах:

Николай Павлович Ломиворотов, инженер-исследователь лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: lomivorotov_np@sibsiu.ru

ORCID: 0009-0000-7953-2920

SPIN-код: 9276-4985

Алексей Романович Михно, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, младший научный сотрудник Управления научных исследований, директор Научно-производственного центра «Сварочные процессы и технологии», Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: mihno_ar@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-7305-6692

SPIN-код: 5553-1164

Галина Игоревна Махнева, инженер-исследователь лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: glcherepanova25@mail.com

ORCID: 0009-0003-2592-6539

SPIN-код: 3610-9340

Ирина Алексеевна Панченко, к.т.н., заведующий лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: panchenko_ia@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-1631-9644

SPIN-код: 4253-6679

Сергей Валерьевич Коновалов, д.т.н., профессор, проректор по НИИД, главный научный сотрудник Управления научных исследований, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: konovalov@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0003-4809-8660

SPIN-код: 4391-7210

Information about the authors:

Nikolai P. Lomivorotov, Research Engineer at the Electron Microscopy and Image Processing Laboratory, Siberian State Industrial University

E-mail: lomivorotov_np@sibsiu.ru

ORCID: 0009-0000-7953-2920

SPIN-код: 9276-4985

Aleksei R. Mikhno, Researcher at the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Junior Researcher at the Scientific Research Department, Director of the Scientific and Production Center «Welding Processes and Technologies», Siberian State Industrial University

E-mail: mihno_ar@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-7305-6692

SPIN-код: 5553-1164

Galina I. Makhneva, research engineer at the Electron Microscopy and Image Processing Laboratory, Siberian State Industrial University

E-mail: glcherepanova25@mail.com

ORCID: 0009-0003-2592-6539

SPIN-код: 3610-9340

Irina A. Panchenko, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Senior Researcher of the Scientific Research Department, Siberian State Industrial University

E-mail: panchenko_ia@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-1631-9644

SPIN-код: 4253-6679

Sergey V. Konovalov Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-Rector for Research and Innovation Activities, Chief Researcher of the Scientific Research Directorate, Siberian State Industrial University

E-mail: konovalov@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0003-4809-8660

SPIN-код: 4391-7210

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 17.02.2026

После доработки 24.04.2026

Принята к публикации 27.04.2026

Received 17.02.2026

Revised 24.04.2026

Accepted 27.04.2026