

Научная статья

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

2.6.17 – Материаловедение (технические науки)

УДК 669

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.025

EDN: ICIJUA

ЭВОЛЮЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СИСТЕМЫ Al-15%Si – Y₂O₃ ПОСЛЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Юлия Андреевна Шлярова ¹, Виталий Владиславович Шляров ²,
Ирина Алексеевна Панченко ³, Иванов Юрий Федорович ⁴,
Дмитрий Валерьевич Загуляев ⁵, Александр Николаевич Прудников ⁶

^{1, 2, 3, 5, 6} Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

⁴ Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

¹ rubannikova962@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>

² shlyarov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8130-648X>

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

⁴ yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

⁵ zagulyaev_dv@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9859-8949>

⁶ a.prudnikov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4150-7428>

Аннотация. Сплавы Al–Si незаменимы в различных отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая и автомобильная, благодаря высокому соотношению прочности и веса, отличной теплопроводности и коррозионной стойкости. Эти сплавы часто содержат такие элементы, как Si, Cu, Mg и Zr, улучшающие их свойства, а специальные составы позволяют повысить прочность, износостойкость и улучшить зернистую структуру. В работе описано комплексное модифицирование поверхностного слоя заэвтектического сплава Al-15%Si, сочетающее электровзрывное легирование системой Al-Y₂O₃ с последующим облучением импульсным электронным пучком. Установлено, что комплексная обработка приводит к кратному увеличению износостойкости модифицированного слоя силумина ~ в 7.6 раз. Выявлено формирование многослойной многоэлементной многофазной структуры модифицированного объема образца толщиной до 35 мкм, упрочненного наноразмерными частицами оксидов. Установлено, что облучение импульсным электронным пучком поверхности образца силумина, подвергнутого электровзрывному легированию, не приводит к растворению порошка оксида иттрия; на поверхности образца присутствуют области, обогащенные атомами иттрия. Высказано предположение, что комбинированная обработка силумина приводит к многократному увеличению его износостойкости. Это происходит благодаря образованию наноразмерных частиц оксидной фазы в поверхностном слое материала.

Ключевые слова: силумин заэвтектического состава, электровзрывное легирование, облучение, импульсный электронный пучок, элементный состав, структура, трибология.

Благодарности: Получение образцов сплава, комбинированная обработка и работы по изучению тонкой структуры материала (ПЭМ-анализ) выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00665, <https://rscf.ru/project/24-29-00665/>. Исследования методами сканирующей электронной микроскопии выполнены при поддержке Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ №075-00087-2401.

Для цитирования: Эволюция поверхностного слоя системы Al-15%Si – Y₂O₃ после комбинированной обработки / Ю. А. Шлярова [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 203–211. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.025. EDN: <https://elibrary.ru/ICIJUA>.

Original article

EVOLUTION OF THE SURFACE LAYER OF THE Al-15%Si – Y₂O₃ SYSTEM AFTER COMBINED TREATMENT

Yulia A. Shliarova ¹, Vitaly V. Shlyarov ², Irina A. Panchenko ³,
Ivanov Y. Fedorovich ⁴, Dmitry V. Zaguliaev ⁵, Alexander N. Prudnikov ⁶

^{1, 2, 3, 5, 6} Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

⁴ Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

¹ rubannikova962@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>

© Шлярова Ю. А., Шляров В. В., Панченко И. А., Иванов Ю. Ф., Загуляев Д. В., Прудников А. Н., 2025

² shlyarov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8130-648X>

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

⁴ yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

⁵ zagulyaev_dv@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9859-8949>

⁶ a.prudnikov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4150-7428>

Abstract. Al-Si alloys are indispensable in various industries such as aerospace and automotive due to their high strength-to-weight ratio, excellent thermal conductivity and corrosion resistance. These alloys often contain elements such as Si, Cu, Mg and Zr, which improve their properties, and special compositions can increase strength, wear resistance and improve the grain structure. The paper describes a complex modification of the surface layer of the hypereutectic Al-15% Si alloy, combining electroexplosive alloying with the Al-Y₂O₃ system followed by irradiation with a pulsed electron beam. It was found that the complex treatment leads to a multiple increase in the wear resistance of the modified silumin layer by ~ 7.6 times. The formation of a multilayer multi-element multiphase structure of the modified sample volume up to 35 μm thick, strengthened by nanosized oxide particles, was revealed. It has been established that irradiation of the surface of a silumin sample subjected to electroexplosive alloying with a pulsed electron beam does not lead to dissolution of yttrium oxide powder; the surface of the sample contains areas enriched with yttrium atoms. It is suggested that the combined treatment of silumin leads to a multiple increase in its wear resistance. This is due to the formation of nanoscale particles of the oxide phase in the surface layer of the material.

Keywords: hypereutectic silumin, electroexplosive alloying, irradiation, pulsed electron beam, elemental composition, structure, tribology.

Acknowledgements: Obtaining alloy samples, combined processing and studying the fine structure of the material (TEM analysis) were carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 24-29-00665, <https://rscf.ru/project/24-29-00665/>. Studies using scanning electron microscopy methods were carried out with the support of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 075-00087-2401.

For citation: Shliarova, Yu. A., Shlyarov, V. V., Panchenko, I. A., Ivanov, Yu. F., Zagulyaev, D. V. & Prudnikov, A. N. (2025). Evolution of the surface layer of the Al-15%Si - Y₂O₃ system after combined treatment. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 203-211. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.025. EDN: <https://elibrary.ru/ICIJUA>.

ВВЕДЕНИЕ

Конструкционные материалы, характеризующиеся отличительными функциональными, физическими и механическими характеристиками (включая легкость, пластичность, электропроводность, коррозионную стойкость, теплопроводность и т. д.), находят широкое применение в промышленности, особенно в следующих отраслях: автомобилестроении, авиации и аэрокосмической промышленности. К таким материалам относятся сплавы Al-Si [1–5]. Сплавы Al-Si уже длительное время завоевывают признание в качестве высокоэффективных материалов в области машиностроения, особенно для таких применений, как производство поршней ДВС, где эксплуатационная эффективность имеет решающее значение. Классификация этих сплавов зависит от содержания в них Si: сплавы с долей Si менее 12 мас.% классифицируются как доэвтектические, эвтектические сплавы, содержащие Si в диапазоне от 12 до 13 мас.%, и заэвтектические сплавы с содержанием кремния более 13 мас.%; примечательно, что спрос и популярность последней категории в последние годы значительно возросли. Тем не менее, важно признать, что растворимость Si в алюминиевой решетке ограничена, что приводит к появлению значительных частиц Si в микроструктуре заэвтектических силуминов. Эти частицы могут служить очагами повышенных внутренних напряжений на межфазных границах, что в конечном итоге приводит к разрушению материала и значительному снижению износостойкости изготовленных компонентов. Следовательно, существует неотложная необходимость в изучении и разра-

ботке инновационных стратегий, направленных на улучшение микроструктурных характеристик заэвтектических сплавов с уделением особого внимания к обработке как структурных компонентов смеси, так и первичных кристаллов Si.

В процессе измельчения кристаллов кремния используется множество методологий, при этом значительное внимание уделяется использованию специализированных легирующих элементов, которые играют решающую роль в изменении свойств материала и повышении общих характеристик [6–8].

Изучение методов обработки поверхности алюминия и его различных сплавов неизменно являлось важной областью научных исследований, характеризующихся изучением многочисленных методологий, направленных на улучшение их свойств. Например, в одном известном исследовании Qianlian Bao [9] удалось добиться нанесения покрытий на подложки из чистого алюминия с помощью процесса электроосаждения Ni-Mo, что подчеркивает инновационные подходы, применяемые в этой области. Кроме того, Tjokorda Gde Tirta Nindhia et al. [10] провели комплексное исследование гальванического нанесения никеля на алюминий, что способствовало расширению знаний о методах отделки металлов. Кроме того, Zarka M. [11] добился значительных успехов в области технологии твердого анодирования, которая оказалась основным методом улучшения поверхностных характеристик алюминиевых сплавов. Если говорить более современно, то Yiming Chi [12] исследовал применение легирования поверхности лазерным лучом. Это современный и слож-

ЭВОЛЮЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СИСТЕМЫ Al-15%Si – Y₂O₃ ПОСЛЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

ный метод, представляющий собой значительный шаг вперед в области материаловедения. Кроме того, Tao Liu [13] провел обширное исследование процесса лазерного легирования поверхности, уделив особое внимание интеграции различных элементов в поверхности поршней дизельных двигателей, тем самым рассмотрев практическое применение этих методов обработки поверхности в реальных инженерных сценариях. В совокупности эти исследования подчеркивают динамичный и развивающийся характер исследований, направленных на улучшение поверхностных свойств алюминия и его сплавов с помощью разнообразных инновационных методов обработки.

Сегодня в области обработки поверхностей металлов и сплавов наиболее прогрессивным подходом считается комбинированная технология, объединяющая различные технологии обработки, включая электровзрывное легирование с последующей обработкой электронным лучом. Выдвинуто предположение, что измельчение первичных кристаллов Si можно эффективно проводить в заэвтектическом силумине с помощью высокоэнергетических импульсных плазменных потоков, которые вызывают плавление в приповерхностном слое и затем способствуют направленной высокоскоростной кристаллизации. Таким образом, результаты этих исследований могут способствовать прогрессу в материаловедении, особенно в том, что касается разработки высококачественных металлических сплавов, обладающих улучшенными эксплуатационными характеристиками благодаря тщательному управлению их микроструктурными особенностями с помощью этой технологии обработки.

Цель данной работы – изучить структуру и трибологические характеристики поверхностного слоя силумина после комбинированной обработки (электровзрывное легирование с последующим облучением импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала исследования были использованы образцы силумина Al-15%Si. Элементный состав силумина (прибор Shimadzu XRF-1800): Si – 15,9; Fe – 0,24; Cu – 0,07, Mn – 0,005; Ni – 0,005; Ti – 0,006; Cr – 0,001; V – 0,013; Mg < 0,001; S – 0,032; Pb < 0,001; Zn – 0,021, ост. Al в мас. %. Образцы силумина имели размеры 15x15x10 мм. Электровзрывное легирование поверхности образцов осуществляли порошком Y₂O₃ на установке ЭВУ 60/10 (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк) [14] при следующих параметрах: m(Al) = 0.0589 г; m(Y₂O₃) = 0.0589; U = 2,8 кВ.

Облучение модифицированных электровзрывным методом образцов осуществляли на установке «СОЛО» [15]. Параметры облучения: энергия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов 25 Дж/см² при длительности импульсов воздействия 150 мкс (количество импульсов 3, частота следования импульсов 0,3 с⁻¹), давление рабочего газа (аргон) в рабочей камере 0,02 Па.

Тонкую структуру модифицированного слоя силумина изучали с помощью двух методов: сканирующей электронной микроскопии (использовался прибор Philips SEM-515 с микроанализатором EDAX ECON IV) и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии (прибор JEOL JEM-2100F) [16–19]. Подготовку образцов (фольги толщиной 0,2–0,3 мкм) для просвечивающей электронной микроскопии осуществляли в два этапа. На первом этапе вырезали из объемного образца пластинки с помощью Isomet Low Sped Saw, после чего утоняли за счет бомбардировки поверхности пластинок ионами и нейтральными атомами аргона на установке Ion Slicer (EM-091001S). Пластинки вырезали в сечении, перпендикулярном модифицированной поверхности образца. Это позволяло на одной фольге исследовать изменение структуры материала при контролируемом удалении от модифицированной поверхности в объем образца на расстояние 200–300 мкм. Состояние кристаллической решетки и фазовый состав модифицированного слоя изучали методами рентгенофазового анализа (рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD 6000). Трибологические свойства исследуемого материала характеризовали параметром износа и коэффициентом трения (трибометр Pin on Disc and Oscillating TRIBO tester). Испытания проводили при следующих условиях: шарик – из Al₂O₃ диаметром 6 мм, радиус дорожки трения – 2 мм, скорость вращения образца – 25 мм/с, нагрузка на индентор – 10 Н, время испытаний – 4000 сек.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Трибологические испытания, которые проводились при комнатной температуре в условиях сухого трения, продемонстрировали, что параметр износа k уменьшается (увеличением износостойкости) после электровзрывного легирования и последующего облучения легированного слоя импульсным электронным пучком. Установлено, что параметр износа силумина в литом состоянии $k = 14 \cdot 10^{-4}$ мм³/Н·м; после электровзрывного легирования $k = 6,5 \cdot 10^{-4}$ мм³/Н·м; дополнительное облучение импульсным электронным пучком приводит к снижению параметра износа до $k = 1,85 \cdot 10^{-4}$ мм³/Н·м. Одновременно с этим использованная обработка сопровождается постепенным незначительным увеличением коэффициента трения от $\mu = 0,51$ для литого силумина до $\mu = 0,60$ после электровзрывного легирования и $\mu = 0,66$ для силумина после дополнительного облучения импульсным электронным пучком.

Очевидно, что многократное увеличение износостойкости силумина, подвергнутого комплексной обработке, обусловлено состоянием структуры и фазового состава модифицированного слоя. На рис. 1 и 2 представлены характерные изображения структуры шлифа силумина в литом состоянии. На рис. 1 (б–в) видно, что главные химические элементы этого материала – алюминий и кремний. Атомы Fe (примесного элемента) содержатся в незначительном количестве (рис. 1, а).

Структурное состояние данного материала характеризуется зернами эвтектики Al-Si (рис. 2,

обл. 1), кристаллами первичного кремния (рис. 2, область 2), включениями пластинчатой (ленточной) формы, обогащенными атомами железа (рис. 2, область 3) и зернами твердого раствора на основе алюминия (рис. 2, область 4). Соотношение химических элементов в данных структурных составляющих силумина приведено в табл. 1. Методами рентгенофазового анализа установлено, что относительное содержание фаз Al и Si в литом состоянии силумина составляет 51 мас.% и 49 мас.%.

Структурное состояние данного материала характеризуется зернами эвтектики Al-Si (рис. 2, обл. 1), кристаллами первичного кремния (рис. 2, обл. 2), включениями пластинчатой (ленточной) формы, обогащенными атомами железа (рис. 2, обл. 3) и зернами твердого раствора на основе алюминия (рис. 2, обл. 4). Соотношение химических элементов в данных структурных составляющих силумина приведено в табл. 1. Методами рентгенофазового анализа установлено, что относительное содержание фаз Al и Si в литом состоянии силумина составляет 51 мас.% и 49 мас.%.

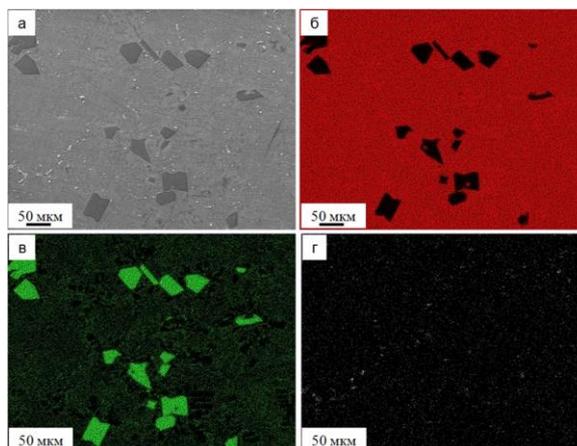


Рисунок 1 – Электронно-микроскопическое изображение структуры силумина в литом состоянии (а); б–г – изображения, полученные в характеристическом рентгеновском излучении атомов алюминия (б), кремния (в) и железа (г)

Figure 1 – Electron microscopic image of the structure of silumin in the cast state (a); b-g - images obtained in the characteristic X-ray radiation of aluminum atoms (b), silicon (c) and iron (d)

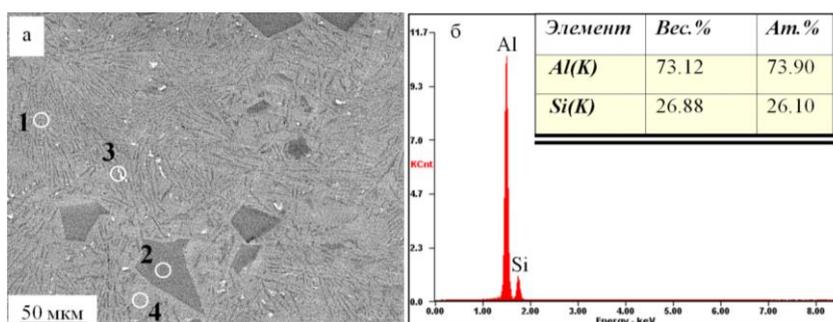


Рисунок 2 – Электронно-микроскопическое изображение структуры силумина Al-15%Si в литом состоянии (а); б – энергетические спектры, полученные с площади образца, изображение которой представлено на (а)

Figure 2 – Electron microscopic image of the structure of Al-15%Si silumin in the cast state (a); b - energy spectra obtained from the area of the sample, the image of which is shown in (a)

Таблица 1 – Результаты микрорентгеноспектрального анализа участка образца силумина в литом состоянии, представленного на рис. 2, а.

Table 1 – Results of micro-X-ray spectral analysis of a section of a silumin sample in the cast state, shown in Fig. 2, a.

Элемент, вес. %	Область анализа			
	1	2	3	4
Al(K)	74,8	1,4	83,6	95,2
Si(K)	25,2	98,6	7,6	4,3
Fe(K)	0,0	0,0	8,8	0,5

Комбинированная обработка образцов силумина, сочетающая электровзрывное легирование с последующим импульсным электронным излучением, приводит к значительным изменениям элементного и фазового состава, а также состояния дефектной субструктуры в поверхностном слое материала.

Эта комбинированная обработка характеризуется развитием рельефной структуры, отличительная морфология которой изображена на рисунках 3, а, б.

При относительно большом увеличении раскрывается субструктура поверхностного слоя, характеризующаяся зернами с размерами в пределах (0,4–0,7) мкм (рис. 3, в). Примечательной особенностью поверхностного слоя являются сферические частицы размером от (0,6–9) мкм (рис. 3, б, в). Можно предположить, что данные образования являются частицами порошка Y_2O_3 .

ЭВОЛЮЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СИСТЕМЫ Al-15%Si – Y₂O₃ ПОСЛЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

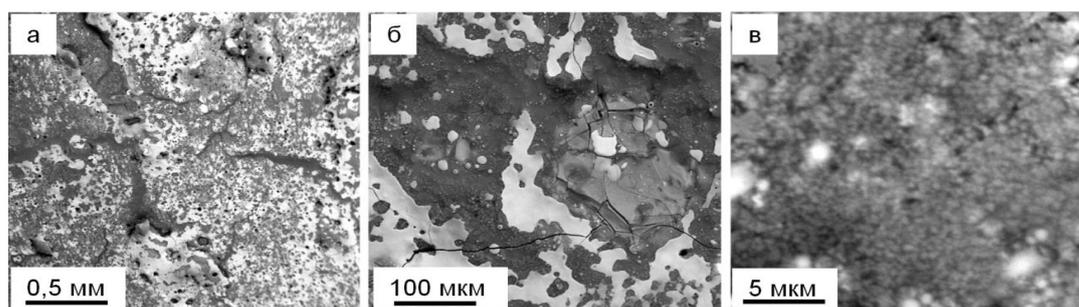


Рисунок 3 – Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности образца силумина, подвергнутого комбинированной обработке

Figure 3 – Electron microscopic image of the surface structure of a silumin sample subjected to combined treatment

Методом «картирования» осуществлена визуализация распределения химических элементов в поверхностном слое силумина (рис. 4). Отчетли-

во видно, что основную площадь анализируемой поверхности занимает область, обогащенная атомами алюминия (рис. 4, б) и иттрия (рис. 4, з).

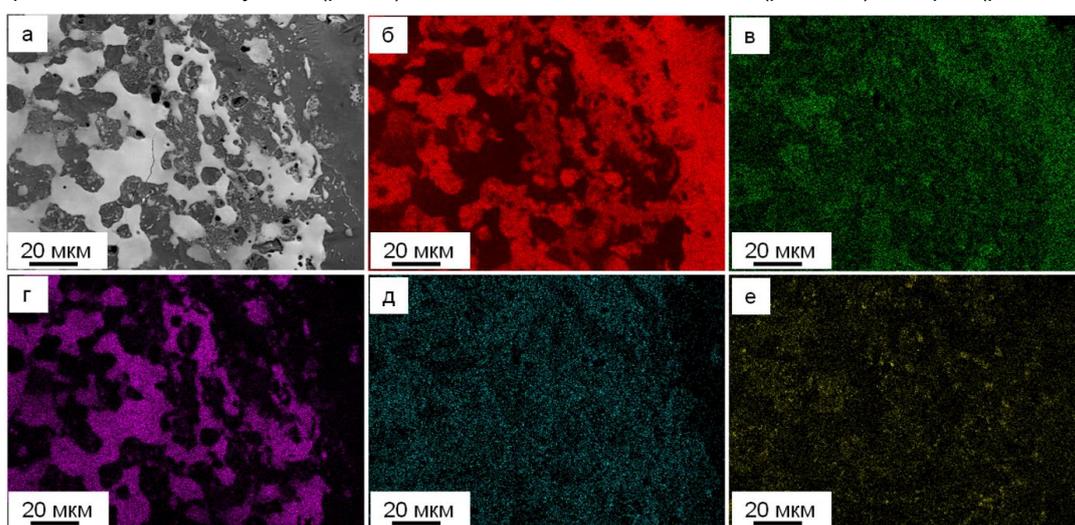


Рисунок 4 – Электронная микрофотография структуры поверхностного слоя образца силумина после комбинированной обработки (а): б–е – изображение участка (а) в характеристическом рентгеновском излучении атомов Al (б), Si (в), Y (г), O (д), Ti (е)

Figure 4 – Electronic micrography of the structure of the surface layer of a silumin sample after combined treatment (a): b-e is an image of the site (a) in the characteristic X-ray radiation of Al (b), Si (c), Y (d), O (e), Ti (e) atoms

Относительное содержание выявленных химических элементов в поверхностном слое модифицированного силумина определяли методами микрорентгеновского анализа (методы «по точкам» и «по площадям»). Исследования, результаты которых отражены на рис. 5 и в табл. 2, показывают, что в поверхностном слое присутствуют области с высокой концентрацией атомов Y (обл. 1 на рис. 5), атомов Ti (обл. 2 на рис. 5) и атомов Ti и Al (обл. 3 на рис. 5).

Данные исследования подтверждают результаты распределения химических элементов в поверхностном слое силумина, полученные методами «картирования» (рис. 4). Следует отметить, что наиболее избирательным химическим элементом является иттрий, который располагается преимущественно в областях различной формы, имеющих сравнительно светлый контраст (рис. 5).

Таблица 2 – Результаты микрорентгеновского анализа образца силумина, электронно-микроскопическое изображение структуры которого приведено на рис. 5

Table 2 – The results of the micro-X-ray spectral analysis of the silumin sample, the electron microscopic image of the structure of which is shown in Fig. 5

Элемент	Область анализа							
	1		2		3		С площади	
	вес. %	ат. %	вес. %	ат. %	вес. %	ат. %	вес. %	ат. %
O K	28,69	68,59	47,73	67,28	17,54	32,35	23,77	51,12
Al K	0,55	0,78	22,21	18,57	40,2	43,95	16,0	20,4
Si K	0	0	0	0	7,86	8,25	3,0	3,68
Ti K	0,51	0,41	30,06	14,15	14,17	8,73	8,0	5,74
Y L	70,25	30,22	0	0	20,23	6,71	49,24	19,06

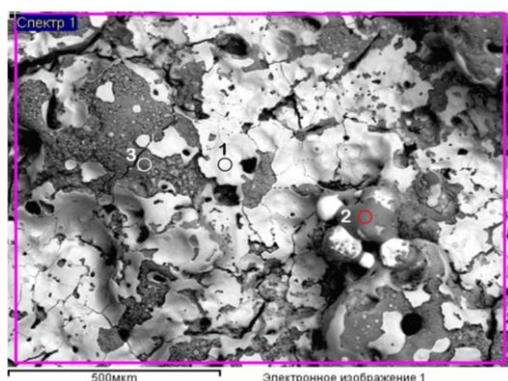


Рисунок 5 – Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности образца силумина, подвергнутого комбинированной обработке

Figure 5 – Electron microscopic image of the surface structure of a silumin sample subjected to combined treatment

С помощью микрорентгеноспектрального анализа было установлено (рис. 5, табл. 2), что после комбинированной обработки на поверхности образцов силумина имеются области (далее – области 1), насыщенные преимущественно атомами Y и O (рис. 5, область 1). В меньшем количестве присутствуют области, обогащённые преимущественно атомами Ti и O (рис. 5, область 2) и области с высокой концентрацией атомов Al и Si (рис. 5, область 3).

Методами рентгенофазового анализа установлено, что комбинированная обработка приводит к формированию в поверхностном слое многофазной структуры, а именно: Al (тв. р-р на осн. Al, 34 масс. %), TiAl (31 масс. %), Y_2O_3 (26 масс. %), $YAlO_3$ (9 масс. %).

Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии с использованием фольги проведены исследования структуры силумина в зависимости от расстояния от поверхности модифицирования. На рис. 6 приведено STEM

Таблица 3 – Результаты микрорентгеноспектрального анализа образца силумина, электронно-микроскопическое изображение структуры которого приведено на рис. 6, а.

Table 3 – The results of micro-X-ray spectral analysis of a silumin sample, the electron microscopic image of the structure of which is shown in Fig. 6, a.

	Элемент					
	O	Al	Si	Ti	Fe	Y
вес. %	4,72	42,43	7,6	26,67	4,48	14,09
ат. %	10,06	53,6	9,22	18,98	2,74	5,4

Фазовый состав участка фольги, структура которого приведена на рис. 6, изучали методами дифракционной электронной микроскопии. Анализ микроэлектроннограммы (рис. 8, б), полученной с участка, обозначенного на рис. 8, а окружностью, дает основание заключить, что, во-первых, слой 1 (рис. 6) находится в аморфном состоянии. Во-вторых, слой содержит наноразмерные (20–60 нм) включения округлой формы (рис. 8, а, в). Индексирование микроэлектроннограммы (рис. 8, б) позволяет заключить, что данные включения являются оксидом иттрия. К аморфному слою примыкает слой 2 (рис. 6), выделенный на рис. 8, а фигурной скобкой. Анализ микроэлектроннограммы показыва-

изображение структуры поперечного сечения области 1, указанной на рис. 5. Результаты микрорентгеноспектрального анализа данного участка фольги представлены на рис. 7.

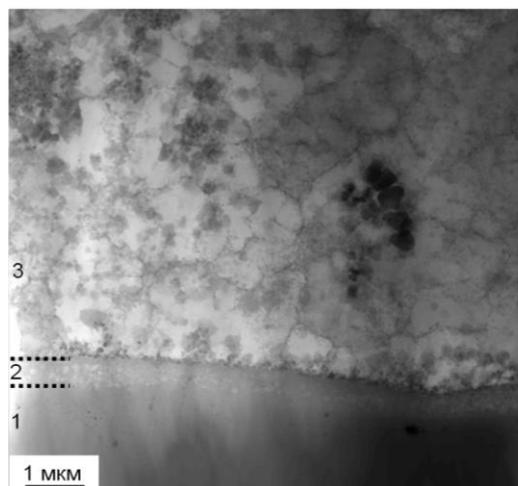


Рисунок 6 – STEM изображение структуры поперечного сечения области 1

Figure 6 – STEM image of cross-sectional structure of region 1

Анализируя результаты, представленные на рис. 6 и 7, можно отметить формирование многослойной структуры, представленной слоем, обогащенным атомами иттрия (рис. 6, слой 1, рис. 7, б). Данный слой обогащен атомами кислорода (рис. 7, в). Далее следует слой 2 (рис. 6), содержащий включения, обогащенные атомами титана (рис. 7, в) и атомами алюминия (рис. 7, а). Слой 3 (рис. 6) сформирован атомами алюминия (рис. 7, а) и содержат включения, обогащенные атомами титана, кремния и железа (рис. 7, в–е). В количественном соотношении элементный состав представленного на рис. 6 участка фольги приведен в табл. 3.

ет, что данный слой сформирован наноразмерными (80–100 нм) оксидами состава Al_2SiO_5 , $YTiO_3$, TiO .

Электронно-микроскопическое изображение слоя 3, непосредственно примыкающего к слою 2 (рис. 6), представлено на рис. 9. Этот слой обладает поликристаллической структурой, состоящей из субзёрен (или зёрен) твёрдого раствора на основе алюминия (рис. 9, в). Размеры субзёрен варьируются в диапазоне от 0,3 до 0,5 мкм. В объеме субзёрен располагаются наноразмерные (10–15 нм) частицы оксида алюминия Al_2O_3 (рис. 9, в, частицы указаны стрелками). Данный слой содержит включения оксидов субмикронных (0,3–0,4 мкм) размеров состава SiO_2 , $Y_2Si_2O_7$ и YTi_2O_6 .

ЭВОЛЮЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СИСТЕМЫ Al-15%Si – Y2O3 ПОСЛЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

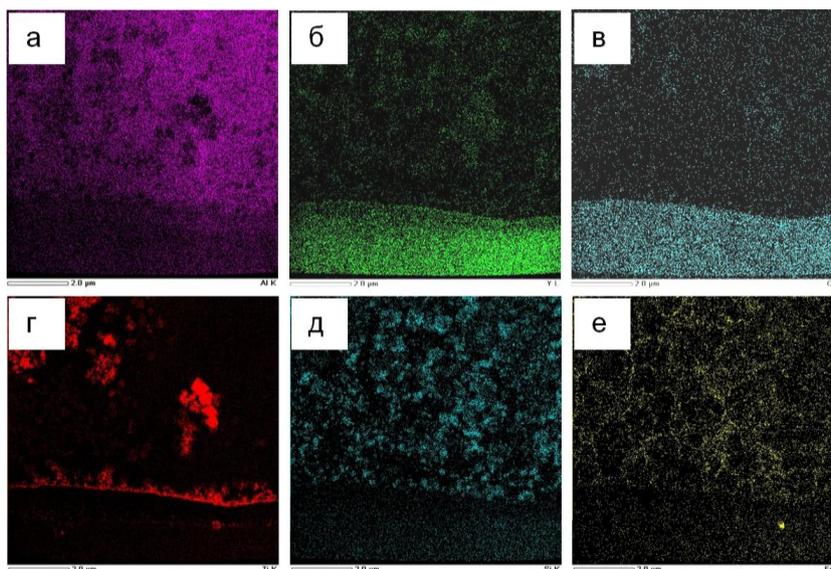


Рисунок 7 – Изображение участка фольги, электронно-микроскопическое изображение которого приведено на рис. 6, полученное в характеристическом рентгеновском излучении атомов Al (а), Y (б), O (в), Ti (г), Si (д), Fe (е)

Figure 7 – An image of a section of foil, the electron microscopic image of which is shown in Fig. 6, obtained in the characteristic X-ray radiation of atoms of Al (a), Y (b), O (c), Ti (d), Si (d), Fe (e)

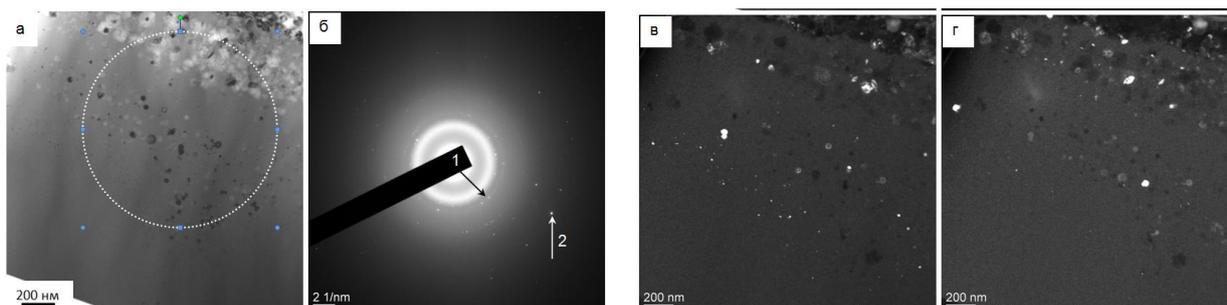


Рисунок 8 – Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя силумина, модифицированного комбинированным методом: а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма; в, г – темные поля, полученные в рефлексах $[511]Y_2O_3$ (в) и $[442]Al_2SiO_5 + [043]YTiO_3 + [224]TiO$ (г); на (б) стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля: 1 – для (в), 2 – для (г)

Figure 8 – Electron microscopic image of the structure of the surface layer of silumin modified by the combined method: a - bright field; b - microelectron diffraction pattern; c, d - dark fields obtained in the reflections $[511]Y_2O_3$ (c) and $[442]Al_2SiO_5 + [043]YTiO_3 + [224]TiO$ (d); in (b) the arrows indicate the reflections in which the dark fields were obtained: 1 - for (c), 2 - for (d)

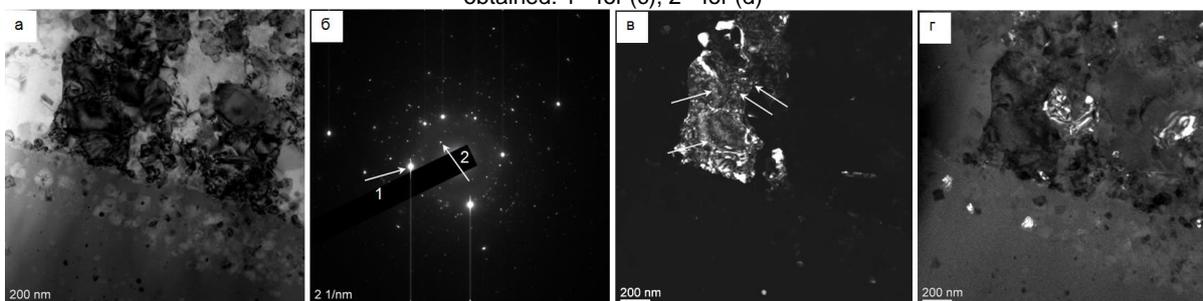


Рисунок 9 – Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя силумина, модифицированного комбинированным методом: а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма; в, г – темные поля, полученные в рефлексах $[111]Al$ (в) и $[120]YTi_2O_6 + [220]SiO_2 + [012]Y_2Si_2O_7$ (г); на (б) стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля: для (в) – 1, для (г) – 2

Figure 9 – Electron microscopic image of the structure of the surface layer of silumin modified by the combined method: a - bright field; b - microelectron diffraction pattern; c, d - dark fields obtained in reflections $[111]Al$ (c) and $[120]YTi_2O_6 + [220]SiO_2 + [012]Y_2Si_2O_7$ (d); in (b) the arrows indicate the reflections in which dark fields were obtained: for (c) - 1, for (d) - 2

При удалении от поверхности модифицирования размеры субзерен увеличиваются до

0,7 мкм и на глубине ≈ 40 мкм субзеренная структура не выявляется (рис. 10).

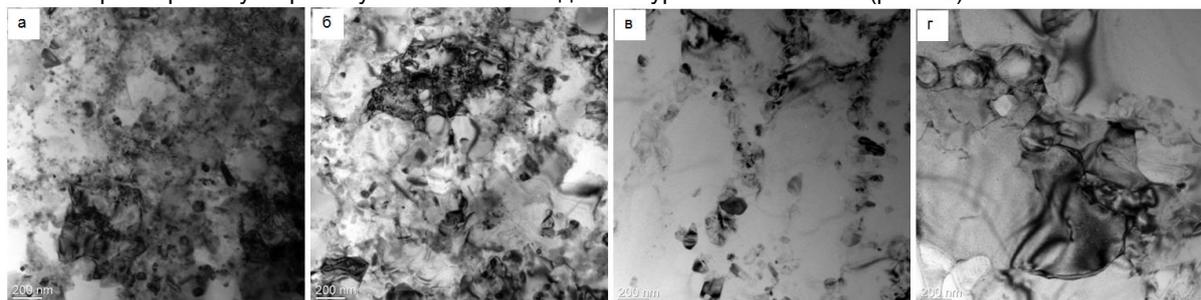


Рисунок 10 – Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя силумина, модифицированного комбинированным методом на расстоянии 15 (а), 25 (б), 45 (в) и 60 мкм от поверхности обработки

Figure 10 – Electron microscopic image of the structure of the surface layer of silumin modified by a combined method at a distance of 15 (a), 25 (b), 45 (c) and 60 μm from the treatment surface

Одновременно с преобразованием субзеренно-зеренной структуры с увеличением расстояния от поверхности модифицирования изменяется и фазовый состав частиц. Если в слое толщиной до

20 мкм преобладали частицы оксидов, то на большем расстоянии преобладающей фазой являются частицы кремния (рис. 11).

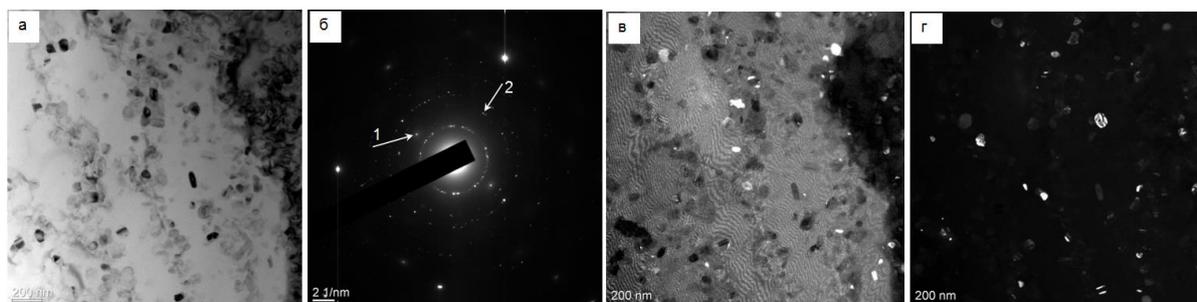


Рисунок 11 – Электронно-микроскопическое изображение структуры слоя силумина, модифицированного комбинированным методом, расположенного на глубине 35 мкм: а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма; в, г – темные поля, полученные в рефлексах $[111]\text{Al} + [102]\text{TiSi}$ (в) и $[002]\text{Ti}$ (г) и $[220]\text{Si}$ (д); в (б) стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля: для (в) – 1, для (г) – 2

Figure 11 – Electron microscopic image of the structure of the silumin layer modified by the combined method, located at a depth of 35 μm : a - bright field; b - microelectron diffraction pattern; c, d - dark fields obtained in reflections $[111]\text{Al} + [102]\text{TiSi}$ (c) and $[002]\text{Ti}$ (d) and $[220]\text{Si}$ (d); in (b) the arrows indicate the reflections in which dark fields were obtained: for (c) - 1, for (d) - 2

Таким образом, основываясь на эмпирических данных, полученных с помощью просвечивающей электронной дифракционной микроскопии, можно обоснованно предположить, что значительное улучшение износостойких свойств силумина, подвергнутого сложному комбинированному процессу обработки, который объединяет электровзрывное легирование с последующим процессом облучения импульсным электронным пучком, в основном связано с образованием наноразмерных частиц оксидной фазы в поверхностном слое материала, толщина до 35 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что комплексная обработка приводит к кратному (в 7,6 раз) увеличению износостойкости модифицированного слоя силумина. С помощью рентгенофазового анализа установлено, что в результате комбинированной обработки образуется многофазный поверхностный слой, основными фазами которого являются тв. р-р на основе Al, TiAl, Y_2O_3 и YAlO_3 . Установлено, что облучение импульсным электронным пучком поверхности образца силумина, подвергнутого элек-

тровзрывному легированию, не приводит к растворению порошка оксида иттрия; на поверхности образца присутствуют области, обогащенные атомами иттрия. Выявлено формирование многослойной структуры модифицированного объема образца. Показано, что поверхностный слой, обогащенный атомами иттрия и кислорода, находится в аморфном состоянии. Слой, примыкающий к аморфному слою, сформирован наноразмерными (80–100 нм) оксидами состава Al_2SiO_5 , YTiO_3 и TiO. Следующий за ним слой толщиной (30–35) мкм, имеет субзеренно-зеренную структуру и содержит включения оксидов субмикронных (0,3–0,4 мкм) размеров состава SiO_2 , $\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ и YTi_2O_6 . На большем удалении от поверхности модифицирования субзеренная структура не выявляется, преобладающей упрочняющей фазой являются частицы кремния. Высказано предположение о том, что выявленное кратное увеличение износостойкости силумина, подвергнутого комбинированной обработке, сочетающей электровзрывное легирование и последующее облучение импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности,

ЭВОЛЮЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СИСТЕМЫ Al-15%Si – Y₂O₃ ПОСЛЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

обусловлено формированием в поверхностном слое толщиной до 35 мкм наноразмерных частиц оксидной фазы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Choudhary, C., Sahoo, K.L. & Mandal, D. (2018). Microstructure and mechanical properties of AlSi alloys processed by strain induced melt activation. *Materials Today: Proceedings*. Vol. 5. P. 27107-27111. doi: 10.1016/j.matpr.2018.09.017.
2. Jeon, J.H., Shin, J.H. & Bae, D.H. (2019). Si phase modification on the elevated temperature mechanical properties of Al-Si hypereutectic alloys / *Materials Science and Engineering A*. Vol. 748. P. 367-370. doi: 10.1016/j.msea.2019.01.119.
3. Yan, W., Chen, W., Zhang, S., Li, B. & Li, J. (2019). Evolution of solidification structures and mechanical properties of high-Si Al alloys under permanent magnetic stirring. *Materials Characterization*. Vol. 157. P. 109894. doi: 10.1016/j.matchar.2019.109894.
4. Sigworth, G.K., Campbell, J. & Jorstad, J. (2009). The modification of Al-Si casting alloys: important practical and theoretical aspects. *International Journal of Metalcasting*. Vol. 3. № 1. P. 65-78. doi: 10.1007/BF03355442.
5. Kaufman, J.G. & Rooy, E.L. (2004). *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications*. 340 p.
6. Mao, G., Yan, H., Zhu, C., Wu, Z. & Gao, W. (2019). The varied mechanisms of yttrium (Y) modifying a hypoeutectic Al-Si alloy under conditions of different cooling rate. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 806. P. 906-916. doi: 10.1016/j.jallcom.2019.07.107.
7. Shi, W.X., Gao, B., Tu, G. & Li, S. (2010). Effect of Nd on microstructure and wear resistance of hypereutectic Al-20%Si alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 508. P. 480-485. doi: 10.1016/j.jallcom.2010.08.098.
8. Jiang, B., Ji, Z., Hu, M., Xu, H. & Xu, S. (2019). A novel modifier on eutectic Si and mechanical properties of Al-Si alloy. *Materials Letters*. Vol. 239. P. 13-16.
9. Bao, Q., Zheng, W., Chen, L., Xu, Z., Han, J. & Zhu, C. Optimization of plating process and corrosion behavior of nanocrystalline Ni-Mo coatings on pure aluminum. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2022. Vol. 636. P. 128128. doi: 10.1016/j.matlet.2018.12.045.
10. Nindhia, T.G.T., Negara, D.K.P., Saputra, I.W.A. & Sharma, P.Kr. (2020). Development Method for Nickel Electroplating on Aluminium. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1007. P. 012105.
11. Zarka, M., Dikici, B., Niinomi, M., Ezirmik, K.V., Nakai, M. & Kaseem, M. (2021). The Ti₃6Nb1.0Ta0.2Zr0.2 coating on anodized aluminum by PVD: A potential candidate for short-time biomedical applications. *Vacuum*. Vol. 192. P. 110450. doi: 10.1016/j.vacuum.2021.110450.
12. Chi, Y., Gu, G., Yu, H. & Chen, C. Laser surface alloying on aluminum and its alloys: A review. *Optics and Lasers in Engineering*. 2018. Vol. 100. P. 23-37. doi: 10.1016/j.optlaseng.2017.07.006.
13. Liu, T., Li, A., Zhu, C. & Yuan, W. Effect of alloying elements on surface temperature field of aluminum piston in diesel engine. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 134. P. 106020. doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.106020.
14. Romanov, D.A., Budovskikh, E.A., Zhmakin, Y.D. & Gromov, V.E. (2011). Surface modification by the EVU 60/10 electroexplosive system. *Steel in Translation*. Vol. 41. No. 6. P. 464-468. doi: 10.17073/0368-0797-2016-10-679-687.
15. Akhmadeev, Yu.Kh., Denisov, V.V., Ivanov, Yu.F. & etc. (2016). Electron-ion-plasma modification of the surface of

non-ferrous metals and alloys / edited by N.N. Koval and Yu.F. Ivanov. Tomsk : NTL Publishing House. 312 p.

16. Egerton, F.R. (2016). *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing. 196 p.
17. Kumar, C.S.S.R. (2014). *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York: Springer. 717 p.
18. Carter, C.B. & Williams, D.B. (2016). *Transmission Electron Microscopy*. Berlin: Springer International Publishing. 518 p.
19. Hirsch, P., Howie, A., Nicholson, P., Pashley, D. & Whelan, M. (1968). *Electron Microscopy of Thin Crystals*. Moscow : Mir. 574 p.

Информация об авторах

Ю. А. Шлярова – аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений (ЭМОИ) Сибирского государственного индустриального университета.

В. В. Шляров – аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений (ЭМОИ) Сибирского государственного индустриального университета.

И. А. Панченко – кандидат технических наук, доцент кафедры менеджмента качества и инноваций, заведующий лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений Сибирского государственного индустриального университета.

Ю. Ф. Иванов – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института Сильноточной электроники СО РАН.

Д. В. Загуляев – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

А. Н. Прудников – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры обработки металлов давлением и материаловедения. EVPAЗ ЗСМК Сибирского государственного индустриального университета.

Information about the authors

Yu.A. Shliarova - post-graduate student of the Department of Natural Sciences named prof. V.M. Finkelya, Researcher of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing of the Siberian State Industrial University.

V.V. Shlyarov - post-graduate student of the Department of Natural Sciences named prof. V.M. Finkelya, Researcher of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing of the Siberian State Industrial University.

I.A. Panchenko - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Quality Management and Innovation, Head of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing of the Siberian State Industrial University.

Y.F. Ivanov - Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Chief Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

D.V. Zaguliaev - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel of the Siberian State Industrial University.

A.N. Prudnikov - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Metal Forming and Materials Science. EVRAZ ZSMK 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 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.