

РАЗДЕЛ 1. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 669.112:539.4

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.02.001

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СИЛУМИНА, ПОДВЕРГНУТОГО ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОМУ ЛЕГИРОВАНИЮ ПОРОШКОМ Y_2O_3

Юлия Андреевна Шлярова^{1†}, Юрий Федорович Иванов²,
Виталий Владиславович Шляров³, Дмитрий Валерьевич Загуляев⁴,
Виктор Евгеньевич Громов⁵

^{1, 3, 4, 5}Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, 654007, Новокузнецк, Россия

²Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический, 2/3, 634055, Томск, Россия

¹rubannikova96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>

²yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

³shlyarov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8130-648X>

⁴zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9859-8949>

⁵gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

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. Целью настоящей работы являлось исследование структуры и трибологических свойств силумина заэвтектического состава в литом состоянии и после электровзрывного легирования порошком Y_2O_3 . Методами микрорентгеноспектрального анализа выявлен многоэлементный состав поверхностного слоя силумина, подвергнутого электровзрывному легированию, также установлено, что легирование приводит к формированию в поверхностном слое морфологически сложной многоуровневой многофазной структуры, основными химическими элементами которой являются алюминий, титан, иттрий и кислород. Трибологические испытания силумина, выполненные в условиях сухого трения при комнатной температуре, показали, что электровзрывное легирование приводит к снижению параметра износа (увеличению износостойкости) силумина в 2,2 раза; среднее значение коэффициента трения материала увеличивается от 0,51 в литом состоянии до 0,6 – после электровзрывного легирования. Коэффициент трения силумина в литом состоянии после 80 сек испытаний выходит на стационарный уровень и практически далее не изменяется. После электровзрывного легирования стационарное состояние коэффициента трения фиксируется лишь после 2000 сек испытаний. Первые 2000 сек времени испытаний коэффициент трения постепенно увеличивается от 0,16 до 0,55.

Ключевые слова: силумин, электровзрывное легирование, фазовый и элементный состав, структура, трибологические свойства.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00665, <https://rscf.ru/project/24-29-00665/>.

Для цитирования: Шлярова Ю.А., Иванов Ю.Ф., Шляров В.В., Загуляев Д.В., Громов В.Е. Структура и свойства силумина, подвергнутого электровзрывному легированию порошком Y_2O_3 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22, № 2. С. 130–141. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.02.001.

STRUCTURE AND PROPERTIES OF SILUMIN SUBJECTED TO ELECTROEXPLOSIVE ALLOYING WITH Y_2O_3 POWDERYulia A. Shliarova^{1†}, Yurii F. Ivanov², Vitaliy V. Shlyarov³, Dmitrii V. Zaguliaev⁴, Victor E. Gromov⁵^{1, 3, 4, 5}Siberian State Industrial University, Kirov Str., 42, Novokuznetsk, 654007, Russia²Institute of High Current Electronics SB RAS, Akademicheskiy Pr., 2/3, Tomsk, 634055, Russia[†]rubannikova96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>²yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>³shlyarov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8130-648X>⁴zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9859-8949>⁵gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

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 to improve their properties, and special formulations can increase strength, wear resistance and improve the grain structure. The aim of this work was to study the structure and tribological properties of hypereutectic silumin in the cast state and after electroexplosive alloying with Y_2O_3 powder. Using micro-X-ray spectral analysis, the multi-element composition of the surface layer of silumin subjected to electroexplosive alloying was revealed, and it was also found that alloying leads to the formation of a morphologically complex multi-level multiphase structure in the surface layer, the main chemical elements of which are aluminum, titanium, yttrium and oxygen. Tribological tests of silumin, performed under dry friction conditions at room temperature, showed that electroexplosive alloying leads to a decrease in the wear parameter (increase in wear resistance) of silumin by 2.2 times; the average value of the material friction coefficient increases from 0.51 in the cast state to 0.6 after electroexplosive alloying. The friction coefficient of silumin in the cast state after 80 seconds of testing reaches a stationary level and practically does not change further. After electroexplosive alloying, the stationary state of the friction coefficient is recorded only after 2000 seconds of testing. The first 2000 seconds of testing, the friction coefficient gradually increases from 0.16 to 0.55.

Keywords: silumin, electroexplosive alloying, phase and elemental composition, structure, tribological properties.

Acknowledgements: The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 24-29-00665, <https://rscf.ru/project/24-29-00665/>.

For citation: Shliarova, Yu. A., Ivanov, Yu. F., Shlyarov, V. V., Zaguliaev, D. V. & Gromov, V. E. (2025). Structure and properties of silumin subjected to electroexplosive alloying with Y_2O_3 powder. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 22(2), 130–141. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.02.001.

Введение

В связи с растущей потребностью в легких материалах в автомобильном и аэрокосмическом секторах возникла необходимость в существенном повышении их производительности. Добиться повышения производительности этих отраслей возможно за счет повышения эксплуатационных свойств существующих материалов, либо за счет разработки новых сплавов и компонентов на их основе. На сегодняшний день, внимание научной общественности сосредоточено на улучшении физико-механических свойств существующих материалов с помощью инновационных процессов и

технологий. В качестве упрочняющих методов достаточно часто используют, в том числе методы неравновесной поверхностной модификации, к которым можно отнести: лазерную обработку [1], электронно-пучковую обработку (ЭПО) [2–4], электровзрывное легирование (ЭВЛ) [5] и т.д.

В частности, алюминиевые (Al) сплавы широко используются в автомобильной промышленности из-за их высокой удельной прочности, хороших литейных свойств и коррозионной стойкости, что помогает снизить вес транспортного. Снижение веса автомобиля – важнейшая стратегия снижения расхода топлива в автомобильной промышленности. Иссле-

дования показывают, что при снижении массы автомобиля на каждые 10% расход топлива может быть снижен примерно на 4-7% [6]. Использование алюминиевых сплавов, композитов из углеродного волокна и композитов из стекловолокна, может значительно способствовать снижению веса транспортных средств и повышению топливной экономичности [7]. Исследования боевых машин показывают, что снижение массы машины на 15% за счет замены обычных материалов алюминием может привести к существенной экономии топлива на 13,36% [8]. Кремний (Si) является наиболее часто добавляемым элементом в сплавы Al. Когда эти сплавы затвердевают, Si соединяется с Al, образуя либо первичные, либо эвтектические фазы Si. Кроме того, Si в сплавах Al образует осадки во время старения. Согласно литературным данным, в различных сплавах Al-Si с концентрацией Si 0,5%-1,5%, помимо образования первичных/эвтектических осадков, только несколько атомов Si растворяются в матрице в виде растворенных веществ. Сообщалось, что увеличение концентрации Si в решетке Al улучшает прочность на разрыв. [9-11].

Также отметим, что сплавы Al, в упомянутых выше секторах промышленности, подвержены разрушению в следствии коррозии, усталости и износа. Одним из потенциальных решений для улучшения их поверхностных характеристик является нанесение покрытий. Так, проведенные нашим коллективом исследования, показали, что ЭВЛ сплавов Al-Si способствует увеличению эксплуатационных характеристик. В результате этого процесса образуется многослойная структура с поверхностным слоем и промежуточным слоем независимо от режима модификации. Поверхностный слой представляет собой многофазный материал толщиной около 1 мкм, а промежуточный слой состоит из ячеек быстрого затвердевания, разделенных тонкими прослойками, состоящими в основном из наночастиц кремния. Модификация приводит к созданию высокопористого покрытия, жидкофазного легирующего слоя и термически подверженного термическому воздействию слоя в сплавах Al-Si с различной толщиной модифицированного слоя в зависимости от состава сплава [12].

Таким образом, целью настоящей работы являлось исследование структуры и трибологических свойств силумина заэвтектического со-

става в литом состоянии и после электровзрывного легирования порошком Y_2O_3 .

Материал и методики 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 Y_2O_3 на установке ЭВУ 60/10 (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк) [13], при следующих параметрах: $m(Al) = 0.0589$ г; $m(Y_2O_3) = 0.0589$; $U = 2,8$ кВ.

Исследование структуры модифицированного слоя силумина осуществляли методами оптической (прибор μ Vizo-MET-221), сканирующей (прибор Philips SEM-515 с микроанализатором EDAX ECON IV) и просвечивающей дифракционной (прибор JEOL JEM-2100 F) электронной микроскопии [14-17]. Состояние кристаллической решетки и фазовый состав модифицированного слоя изучали методами рентгеноструктурного и рентгенофазового анализа (рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD 6000). Трибологические свойства исследуемого материала характеризовали параметром износа и коэффициентом трения (трибометр Pin on Disc and Oscillating TRIBOtester). Испытания проводили при следующих условиях: шарик из Al_2O_3 диаметром 6 мм, радиус дорожки трения 2 мм, скорость вращения образца 25 мм/с, нагрузка на индентор 10 Н, время испытаний составляла 800 сек для литого силумина и 4000 сек для силумина после электровзрывного легирования.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования структуры травленого шлифа образцов силумина Al-15%Si в литом состоянии выявили зерна эвтектики (рис. 1, а, обозначено «1»), кристаллиты первичного кремния (рис. 1, а, обозначено «2») и включения игольчатой (пластинчатой) формы, имеющие сравнительно более светлый контраст (рис. 1, а, обозначено «3» и указано стрелками). Методами микрорентгеноспектрального анализа «по точкам», результаты которого представлены в таб-

лице 1, установлено, что включения пластинчатой формы обогащены атомами железа, относительное содержание которого в сплаве незначительно (табл. 1, столбик «с площади»).

Электровзрывное легирование кардинальным образом изменило состояние образца силумина Al-15%Si. Представленные на рис. 2 электронно-микроскопические изображения свидетельствуют о формировании морфологически сложной многоуровневой структуры. На макромасштабном уровне на поверхности обработки выявляются области, имеющие сглаженный рельеф (рис. 2, а, б; области указаны стрелками). Можно предположить, что данные области являются металлическими каплями, растекшимися по модифицируемой поверхно-

сти. Размеры таких областей изменяются в весьма широких пределах (от 200 мкм до 730 мкм). При больших увеличениях выявляется пористая структура поверхностного слоя силумина, подвергнутого электровзрывному легированию, формирующая микромасштабный уровень (рис. 2, в). Размеры пор изменяются в пределах от 5 мкм до 65 мкм. К микромасштабному уровню следует также отнести образования сферической (глобулярной) формы, указанные на рис. 2, г стрелками. Размеры таких образований изменяются в пределах от 6,5 до 17,5 мкм. К субмикромасштабному уровню модифицированного слоя следует отнести сферические образования, размеры которых изменяются в пределах от 1 мкм до 2,3 мкм (рис. 2, г).

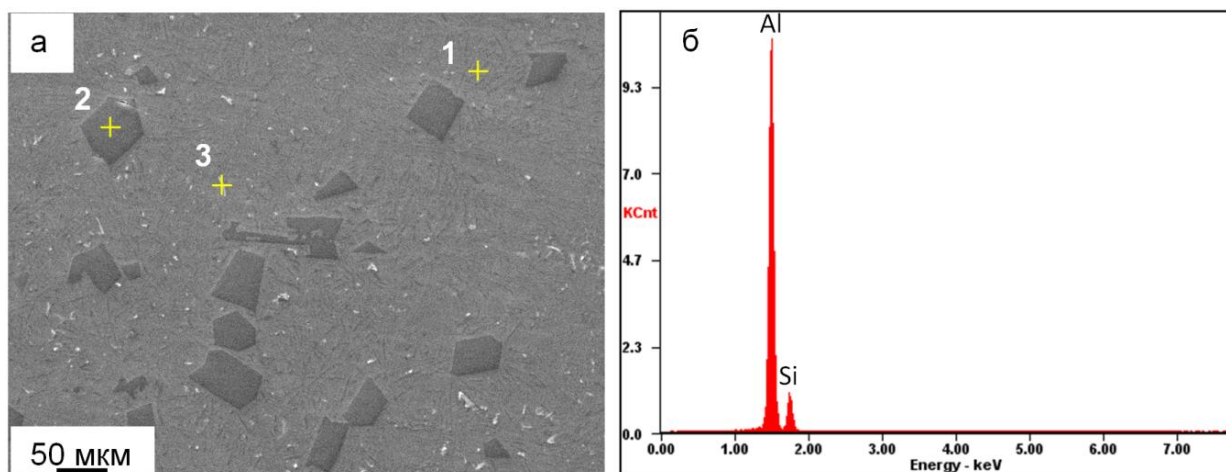


Рисунок 1. Электронно-микроскопическое изображение структуры силумина Al-15%Si в литом состоянии (а); б – энергетические спектры, полученные с площади образца, изображение которой представлено на (а).

Figure 1. 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. 1, а.

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

Элемент	Область анализа							
	1		2		3		С площади	
	вес. %	ат. %	вес. %	ат. %	вес. %	ат. %	вес. %	ат. %
Al	74.74	75.49	1,4	1,5	72,1	76,2	73,0	73,9
Si	25.26	24.51	98,1	98,3	19,0	19,2	26,6	25,9
Fe	0,5	0,2	0,0	0,0	8,9	4,6	0,4	0,2

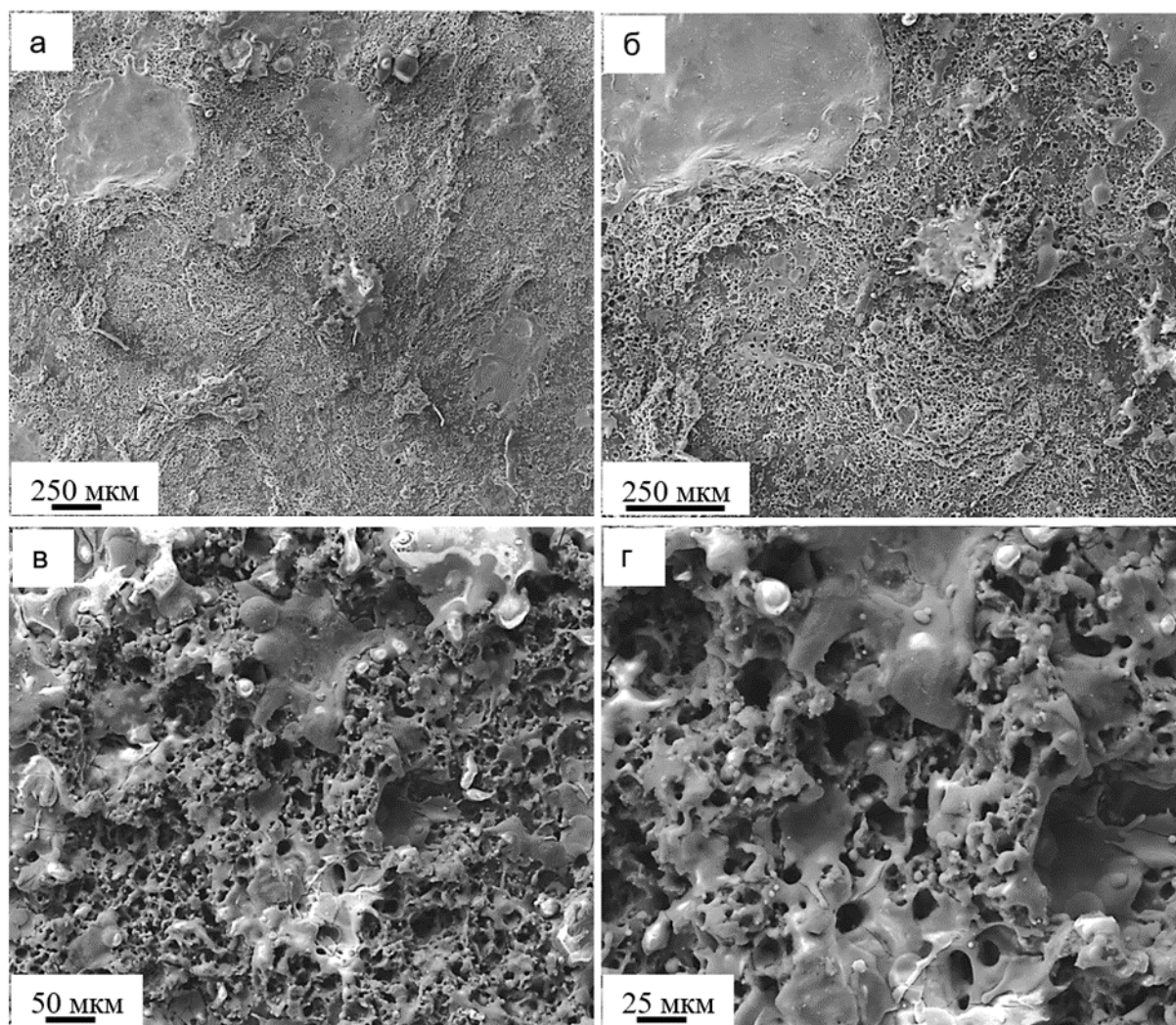


Рисунок 2. Структура поверхности силумина после ЭВЛ. Изображения получены при различном увеличении.

Figure 2. Structure of the silumin surface after EEA. Images were obtained at different magnifications.

Методами микрорентгеноспектрального анализа выявлен многоэлементный состав поверхностного слоя силумина, подвергнутого электровзрывному легированию. Результаты, представленные на рис. 3, показывают, что основным элементом анализируемого слоя образца является алюминий. В несколько меньшем количестве присутствуют иттрий, титан, кремний и кислород. В относительно малом количестве обнаруживаются атомы железа, являющегося примесью. Микрорентгеноспектральный анализ модифицированного слоя, выполненный методом «по точкам» (рис. 4), показывает, что области, имеющие сглаженный рельеф (рис. 4, обл. 1) обогащены преимущественно атомами титана. Включения глобулярной формы обогащены атомами иттрия, углерода и кислорода (рис. 4, обл. 2 и 3). Области поверхностного

слоя, имеющие пористую структуру, содержат в примерно равном соотношении атомы всех обнаруженных в материале элементов (рис. 4, обл. 4).

Метод «картирования» позволяет визуализировать распределение химических элементов в поверхностном слое материала. Результаты такого анализа модифицированного слоя силумина представлены на рис. 5. Отчетливо видно, что основную площадь анализируемой поверхности, имеющей пористую структуру, занимает область, обогащенная атомами алюминия, иттрия и кремния (рис. 5, б, в, е). Области, имеющие гладкий рельеф, обогащены атомами титана (рис. 5, д) или иттрия (рис. 5, в). Атомами железа обогащены включения субмикронных размеров (рис. 5, ж).

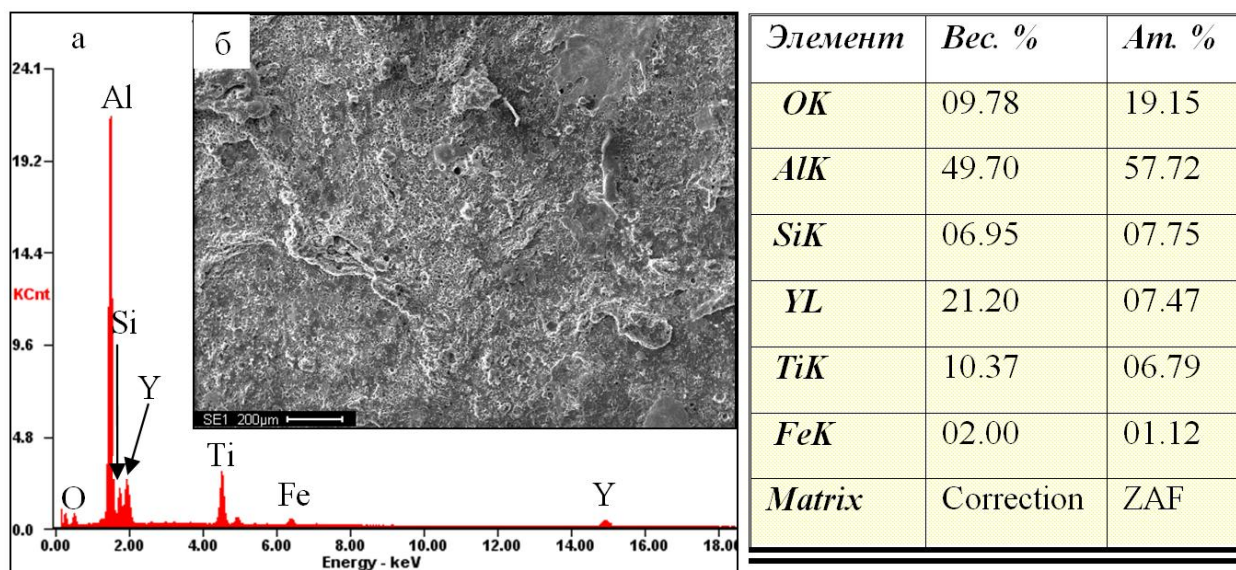


Рисунок 3. Энергетические спектры (а), полученные с участка образца силумина, подвергнутого электровзрывному легированию (б). В таблице представлены результаты анализа элементного состава данного участка образца.

Figure 3. Energy spectra (a) obtained from a section of a silumin sample subjected to electro-explosive alloying (b). The table presents the results of the analysis of the elemental composition of this section of the sample.

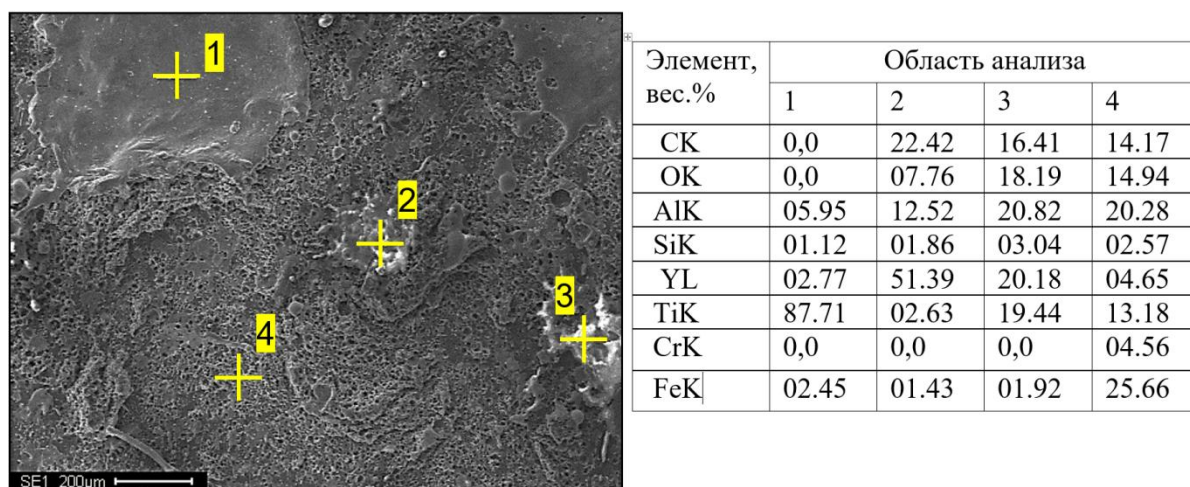


Рисунок 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры силумина Al-15%Si после электровзрывного легирования; обозначены области определения элементного состава материала; в таблице приведены результаты микрорентгеноспектрального анализа элементного состава областей, указанных на микрофотографии.

Figure 4. Electron microscopic image of the structure of Al-15%Si silumin after electroexplosive alloying; areas of determination of the elemental composition of the material are indicated; the table shows the results of the micro-X-ray spectral analysis of the elemental composition of the areas indicated in the micrograph.

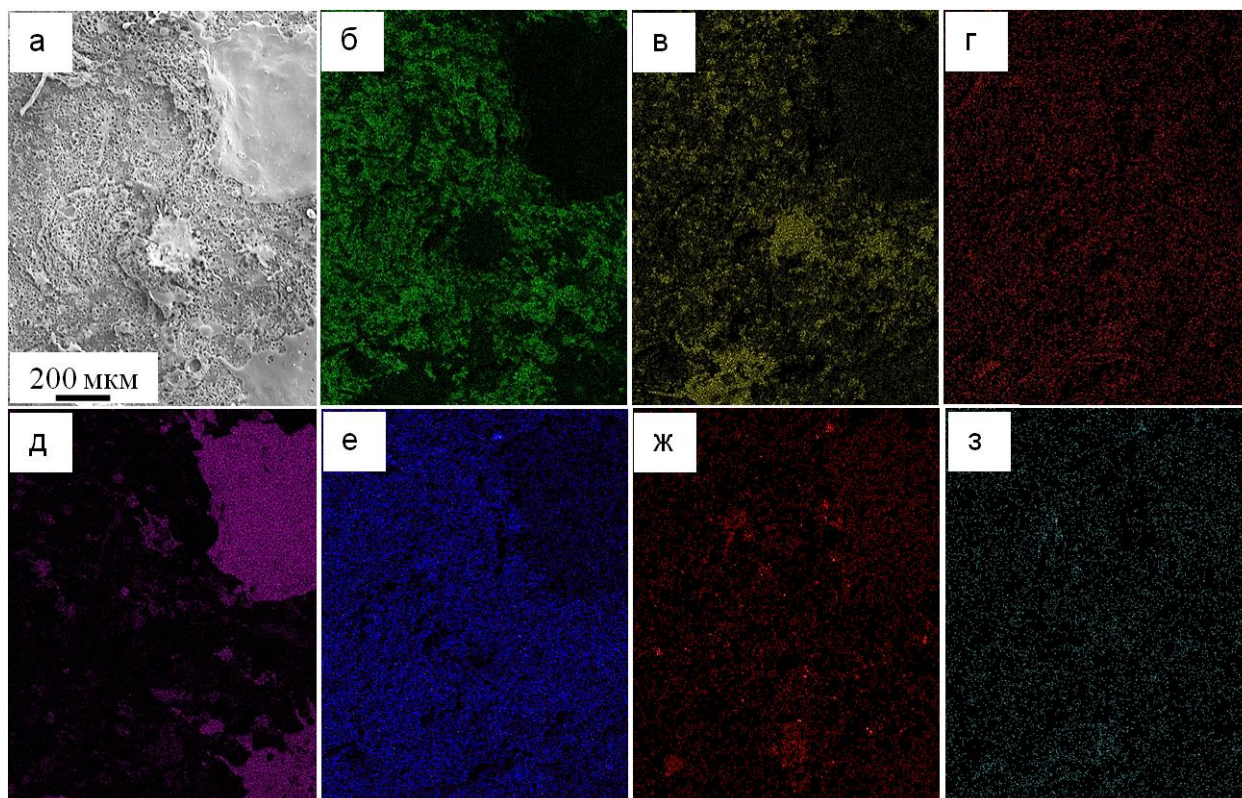


Рисунок 5. Электронно-микроскопическое изображение структуры образца силумина, модифицированного методами электровзрывного легирования (а); б-з – изображения участка (а), полученное в характеристическом рентгеновском излучении атомов Al (б), Y (в), O (г), Ti (д), Si (е), Fe (ж), Cr (з).

Figure 5. Electron microscopic image of the structure of a silumin sample modified by electroexplosive alloying methods (a); b-z – image of section (a) obtained in the characteristic X-ray radiation of atoms of Al (b), Y (c), O (d), Ti (d), Si (f), Fe (g), Cr (h).

Фазовый состав силумина в литом и модифицированном состояниях изучали методами рентгенофазового анализа. Полученные рентгенограммы приведены на рис. 6. Результаты анализа фазового состава и состояния кристаллической решетки исследуемых материалов представлены в табл. 2.

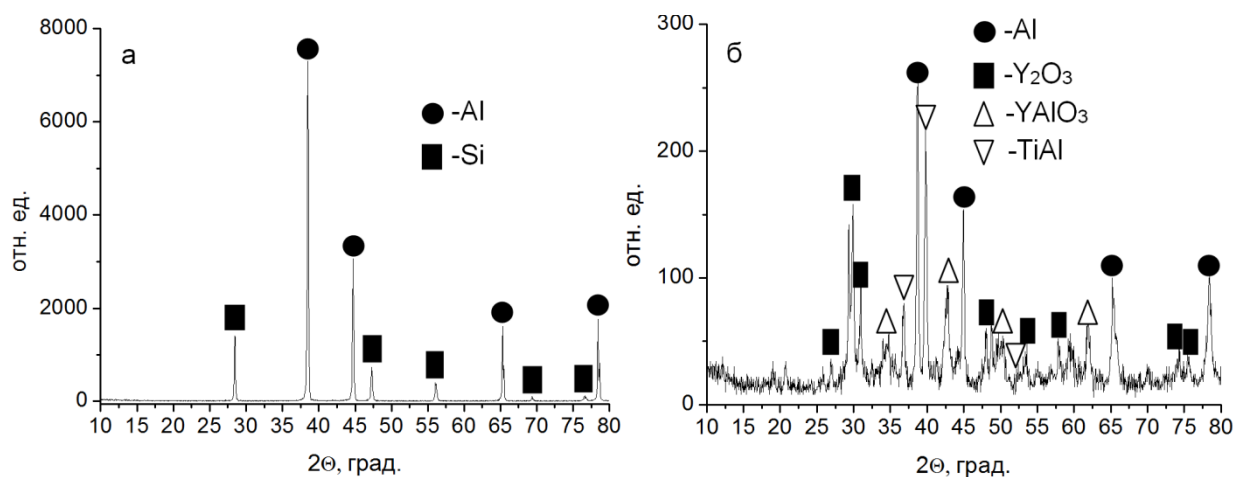
Отчетливо видно, что в поверхностном слое силумина в результате электровзрывного легирования формируется многофазная структура. Основными фазами исследуемого материала являются твердый раствор на основе алюминия и оксид иттрия Y_2O_3 . В меньшем количестве присутствуют оксиалюминид иттрия и алюминид титана.

Детализацию распределения фаз, их морфологию и размеры изучали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии тонких фольг. Фольги изготавливали

методами ионного утонения пластинок, вырезанных в поперечном сечении объемного образца. Это позволяло проследить изменение структуры материала в зависимости от расстояния до поверхности обработки. Представленное на рис. 7,а электронно-микроскопическое изображение свидетельствует о том, что поверхностный слой модифицированного силумина имеет столбчатое строение. Чередующиеся столбики обогащены атомами титана (рис. 7, б) и атомами твердого раствора на основе алюминия (судя по результатам рентгенофазового анализа), обогащенные атомами меди, железа и хрома (рис. 7, д-з). Поверхностный слой содержит включения округлой (глобулярной) формы, обогащенные атомами иттрия и кремния (рис. 7, в, г).

Таблица 2. Результаты рентгенофазового анализ слоя силумина, подвергнутого электровзрывному легированию.**Table 2.** Results of X-ray phase analysis of a silumin layer subjected to electroexplosive alloying.

Состояние образца	Обнаруженные фазы	Содержание фаз, мас. %	Параметры решетки, Å	Размер ОКР, нм	$\Delta d/d$, 10^{-3}
литой	Al	51	$a = 4.0355$	81	1.1
	Si	49	$a = 5.4115$	89	0.5
После модификации	Al				
	Преимущественная ориентация (200) ~69%	39	$a = 4.0400$	55	0.7
	Y_2O_3	37	$a = 3.8009$ $c = 6.0357$	14	1.6
	$YAlO_3$				
	Преимущественная ориентация (111) ~46%	10	$a = 3.6726$	16	2.1
	TiAl	14	$a = 2.9539$ $c = 4.8905$	38	1.0

**Рисунок 6.** Фрагменты рентгенограмм, полученных с силумина в литом состоянии (а) и силумина после электровзрывного легирования (б).**Figure 6.** Fragments of X-ray patterns obtained from silumin in the cast state (a) and silumin after electroexplosive alloying (b).

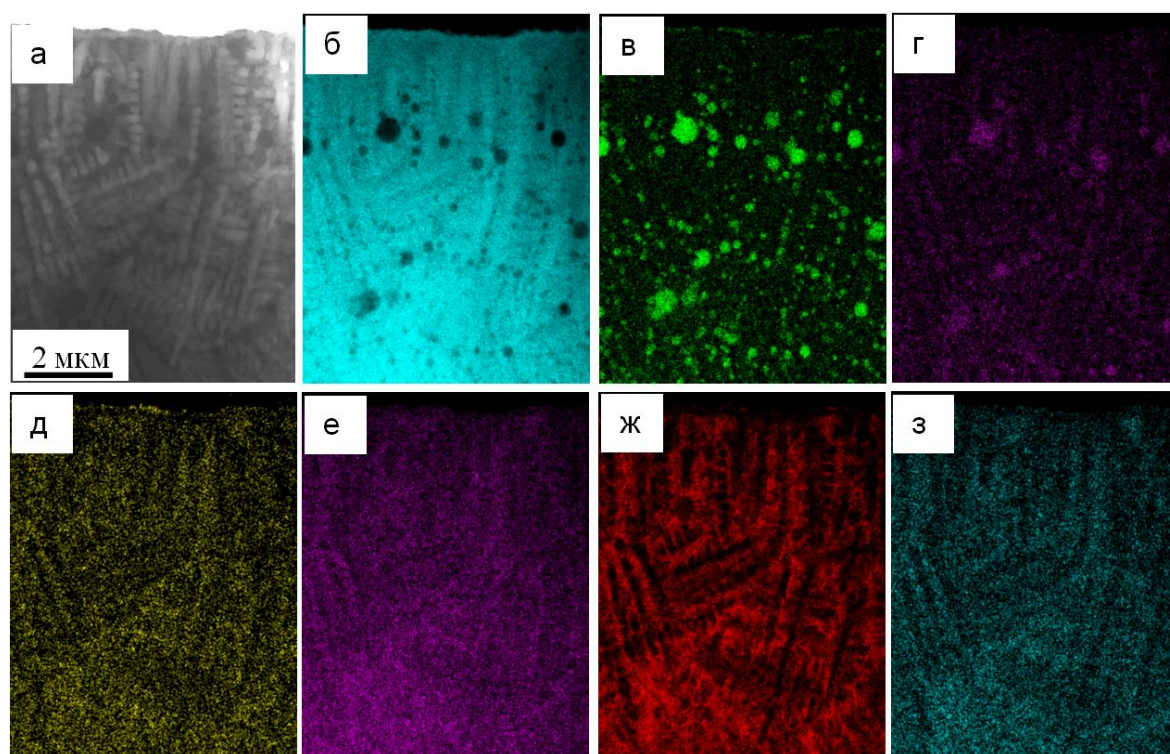


Рисунок 7. Электронно-микроскопическое изображение структуры поперечного сечения образца силумина, модифицированного методами электровзрывного легирования (а); б-з – изображение участка (а), полученное в характеристическом рентгеновском излучении атомов Ti (б), Y (в), Si (г), Al (д), Cu (е), Fe (ж), Cr (з).

Figure 7. Electron microscopic image of the cross-sectional structure of a silumin sample modified by electroexplosive alloying methods (а); b-z – image of section (а) obtained in the characteristic X-ray radiation of Ti (б), Y (в), Si (д), Al (д), Cu (ф), Fe (г), Cr (h) atoms.

Трибологические испытания силумина, выполненные в условиях сухого трения при комнатной температуре, показали, что электровзрывное легирование приводит к снижению параметра износа (увеличению износостойкости) силумина в 2,2 раза; среднее значение коэффициента трения материала увеличивается от 0,51 в литом состоянии до 0,6 – после электровзрывного легирования.

Коэффициент трения силумина в литом состоянии после 80 сек испытаний выходит на стационарный уровень и практически далее не изменяется. После электровзрывного легирования стационарное состояние коэффициента трения фиксируется лишь после 2000 сек испытаний. Первые 2000 сек времени испытаний коэффициент трения постепенно увеличивается от $\mu = 0,16$ до $\mu = 0,55$. Можно предположить, что увеличение коэффициента трения обусловлено постепенным истиранием модифициро-

ванного слоя силумина с последующим достижением структуры литого состояния силумина.

Заключение

Выполнены исследования структуры и трибологических свойств силумина заэвтектического состава в литом состоянии и после электровзрывного легирования порошком Y_2O_3 . Показано, что в литом состоянии структура силумина сформирована зернами эвтектики, кристаллитами первичного кремния и включениями игольчатой (пластинчатой) формы, обогащенными атомами железа. Установлено, что электровзрывное легирование приводит к формированию в поверхностном слое силумина морфологически сложной многоуровневой структуры, характерные элементы которой изменяются в пределах от единиц до сотен микрометров. Выявлен многофазный состав структуры поверхностного слоя силумина после электровзрывного легирования, основными фа-

зами которого являются Al, Y_2O_3 , $YAlO_3$ и $TiAl$. Показано, что электровзрывное легирование приводит к увеличению износостойкости силумина в 2,2 раза. Установлено, что коэффициент трения силумина, модифицированного электровзрывным методом, зависит от времени трибологических испытаний, постепенно увеличиваясь от $\mu = 0,16$ до $\mu = 0,55$. Высказано предположение, что увеличение коэффициента трения обусловлено постепенным истиранием модифицированного слоя силумина с последующим достижением структуры литого состояния материала.

Список литературы

1. Шлякова Е.В. Использование лазерной термообработки для повышения стойкости к коррозии и упрочнения жаропрочных никелевых сплавов // Вестник Технологического университета. 2021. Т. 24. № 3. С. 55-59.
2. Невский С.А. Механизм образования микро- и нанокристаллических поверхностных слоев титановых и алюминиевых сплавов при электронно-пучковой обработке // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2020. Т. 17. № 3. С. 385-395.
3. Невский С.А. Математическая модель образования поверхностных наноструктур доэвтектического силумина при электронно-пучковой обработке // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2019. Т. 16. № 2. С. 154-162.
4. Комаров Д.В., Коновалов С.В., Жуков Д.В., Виноградов И.С., Панченко И.А. Анализ современной ситуации в области применения электронно-пучковой обработки различных сплавов. Часть 1 // Ползуновский вестник. 2021. № 4. С. 129-139.
5. Будовских Е.А., Бащенко Л.П., Макеева Н.И. Особенности жидкофазного смешивания титана и никеля с алюминием при электровзрывном легировании // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2020. № 1(31). С. 49-51.
6. Sinha M., Tyagi R.K., Bajpai P.K. Weight Reduction of Structural Members for Ground Vehicles by the Introduction of FRP Composite and Its Implications // Proceedings of the International Conference on Modern Research in Aerospace Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2018. P. 277-290.
7. Pian W., Zhou Y., Xiao T. A review of the feasibility of aluminum alloys, carbon fiber composites and glass fiber composites for vehicle weight reduction in the automotive industry // Journal of Physics: Conference Series. 2023. Vol. 2608. P. 012005.
8. Napitupulu J.Y., Murniati R., Kusumadjati A., Hirawan A., Alwan M.I. Simulation of calculation of combat vehicle fuel efficiency by reducing vehicle weight using aluminum material // International Journal of Applied Mathematics, Sciences, and Technology for National Defense. 2024. Vol. 2(1). P. 9-18.
9. Jeong W., Kim C., Lee C.A., Bong H.J., Hong S.H., Lee M.G. A probabilistic mean-field and microstructure based finite element modeling for predicting mechanical and ductile fracture behavior of the cast aluminum alloy // Int. J. Plast. 2022. Vol. 154. P. 103299.
10. Zhang X., Huang L.K., Zhang B., Chen Y.Z., Liu F. Microstructural evolution and strengthening mechanism of an Al-Si-Mg alloy processed by high-pressure torsion with different heat treatments // Mater. Sci. Eng. A. 2020. Vol. 794. P. 139932.
11. Sauvage X., Bobruk E.V., Murashkin M.Y., Nasedkina Y., Enikeev N.A., Valiev R.Z. Optimization of electrical conductivity and strength combination by structure design at the nanoscale in Al-Mg-Si alloys // Acta Mater. 2015. Vol. 98. P. 355-366.
12. Шлярова Ю.А., Загуляев Д.В., Громов В.Е. Сравнительный анализ изменения структуры и свойств сплавов системы Al-Si, подвергнутых электровзрывному легированию // Frontier Materials and Technologies. 2022. № 2. С. 113-120.
13. Romanov D.A., Budovskikh E.A., Zhmakin Y.D., Gromov V.E. Surface modification by the EVU 60/10 electroexplosive system // Steel in Translation. 2011. Vol. 41. No. 6. P. 464-468.
14. Egerton F.R. Physical Principles of Electron Microscopy. Basel: Springer International Publishing, 2016. 196 p.
15. Kumar C.S.S.R. Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials. New York: Springer, 2014. 717 p.
16. Carter C.B., Williams D.B. Transmission Electron Microscopy. Berlin: Springer International Publishing, 2016. 518 p.
17. Хирш П., Хови А., Николсон П., Пэшли Д., Уэлан М. Электронная микроскопия тонких кристаллов. М.: Мир, 1968. 574 с.

Информация об авторах

Ю. А. Шлярова – аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, научный сотрудник 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.

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

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

В. Е. Громов – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

References

1. Shlyakova, E.V. (2021). Use of laser heat treatment to increase corrosion resistance and strengthen heat-resistant nickel alloys. *Bulletin of the Technological University*, 24(3), 55-59. (In Russ.).
2. Nevskii, S.A. (2020). Mechanism of formation of micro-and nanocrystalline surface layers of titanium and aluminum alloys during electron beam processing. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 17(3), 385-395. (In Russ.).
3. Nevskii, S.A. (2019). Mathematical model of formation of surface nanostructures of pre-eutectic silumin during electron beam processing. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 16(2), 154-162. (In Russ.).
4. Komarov, D.V., Konovalov, S.V., Zhukov, D.V., Vinogradov, I.S., Panchenko, I.A. (2021). Analysis of the current situation in the field of application of electron-beam processing of various alloys. Part 1. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 129-139. (In Russ.).
5. Budovskikh, E.A., Bashchenko, L.P., Makeeva, N.I. (2020). Features of liquid mixing of titanium and nickel with aluminum during electro-explosive alloying. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*, 1(31), 49-51. (In Russ.).
6. Sinha, M., Tyagi, R.K., Bajpai, P.K. (2018). Weight Reduction of Structural Members for Ground Vehicles by the Introduction of FRP Composite and Its Implications. *Proceedings of the International Conference on Modern Research in Aerospace Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 277–290.
7. Pian, W., Zhou, Y., Xiao, T. (2023). A review of the feasibility of aluminum alloys, carbon fiber composites and glass fiber composites for vehicle weight reduction in the automotive industry. *Journal of Physics: Conference Series*, 2608, 012005.
8. Napitupulu, J.Y., Murniati, R., Kusumadjadi, A., Hirawan, A., Alwan, M.I. (2024). Simulation of calculation of combat vehicle fuel efficiency by reducing vehicle weight using aluminum material. *International Journal of Applied Mathematics, Sciences, and Technology for National Defense*, 2(1), 9-18.
9. Jeong, W., Kim, C., Lee, C.A., Bong, H.J., Hong, S.H., Lee, M.G. (2022). A probabilistic mean-field and microstructure based finite element modeling for predicting mechanical and ductile fracture behavior of the cast aluminum alloy. *Int. J. Plast.*, 154, 103299.
10. Zhang, X., Huang, L.K., Zhang, B., Chen, Y.Z., Liu, F. (2020). Microstructural evolution and strengthening mechanism of an Al-Si-Mg alloy processed by high-pressure torsion with different heat treatments. *Mater. Sci. Eng. A*, 794, 139932.
11. Sauvage, X., Bobruk, E.V., Murashkin, M.Y., Nasedkina, Y., Enikeev, N.A., Valiev, R.Z. (2015). Optimization of electrical conductivity and strength combination by structure design at the nanoscale in Al-Mg-Si alloys. *Acta Mater.*, 98, 355–366.

12. Shlyarova, Yu.A., Zagulyaev, D.V., Gromov, V.E. (2022). The comparative analysis of change in the structure and properties of Al–Si system alloys exposed to electroexplosive alloying. *Frontier Materials & Technologies*, (2), 113–120. (In Russ.).
13. 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*, 41(6), 464–468.
14. Egerton, F.R. (2016). *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing. P. 196.
15. Kumar, C.S.S.R. (2014). *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York: Springer. P. 717
16. Carter, C.B. & Williams, D.B. (2016). *Transmission Electron Microscopy*. Berlin: Springer International Publishing. P. 518.
17. Hirsch, P., Hovey, A., Nicholson, P., Pashley, D. & Whelan, M. (1986). *Electron microscopy of thin crystals*. M.: Mir. P. 574.

Information about the authors

Yu. A. Shliarova – Post-graduate student of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel, Researcher at the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing (EM&OP), Siberian State Industrial University.

Yu. F. Ivanov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Institute of High Current Electronics SB RAS.

V. V. Shlyarov – Post-graduate student of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel, Researcher at the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing (EM&OP), Siberian State Industrial University.

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

V. E. Gromov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 12.12.2024; одобрена после рецензирования 22.04.2025; принята к публикации 05.05.2025.

The article was received by the editorial board on 12 Dec. 2024; approved after reviewing 22 Apr. 2025; accepted for publication 05 May 2025.