



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.789:538.911

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-97-105

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗ И СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВЫСОКОКРЕМНИСТОГО СИЛУМИНА ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Шлярова Ю.А., Шляров В.В., Серебрякова А.А., Загуляев Д.В.

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

**Аннотация. Актуальность работы.** Применение комбинированного модифицирования сплава Al-15%Si методами внешних энергетических воздействий позволяет локально упрочнить поверхностный слой деталей и узлов, изготавливаемых из алюминиевых сплавов. **Цель работы.** Выявление закономерностей изменения фазового состава и структуры сплава высококремнистого силумина, подвергнутого комбинированной модификации в зависимости от глубины модифицированного слоя. **Используемые методы.** Выполнено поверхностное модифицирование сплава Al-15%Si, которое заключалось в комбинировании электровзрывного легирования поверхности образцов порошком  $Y_2O_3$  (установка ЭВУ 60/10) и облучения электронным пучком модифицированных электровзрывным методом образцов. Осуществляли на установке «СОЛЮ» при следующих параметрах облучения: энергия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов  $E_s = 35$  Дж/см<sup>2</sup> при длительности импульсов воздействия 150 мкс, количество импульсов 3, частота следования импульсов  $0,3$  с<sup>-1</sup>, давление рабочего газа (аргон) в рабочей камере 0,02 Па. **Новизна.** Разработка уникального способа модификации сплава Al-15%Si, заключающегося в комбинированной обработке и позволяющего улучшить его износостойкость и эксплуатационные свойства по сравнению с материалом в исходном состоянии. **Результаты.** В результате проведения рентгенофазового анализа установлено, что модифицированная поверхность характеризуется многофазной структурой поверхностного слоя. На расстоянии 25 мкм от поверхности выявлена зеренная структура, сформированная атомами алюминия и титана, а на глубине 65 мкм обнаружена структура пластинчатой эвтектики, в которой пластины твердого раствора на основе алюминия чередуются с пластинами кремния. По результатам индифференцирования микроэлектронограмм и темнопольного анализа фольг, полученных на поверхности образца, выявлены частицы в виде игл или пластин, которые представляют собой элементный состав  $Ti_4Al_{13}Y_6$ , а также окислы алюминия, титана и иттрия, и на расстоянии 25 мкм от поверхностного слоя найдены частицы окисной фазы с составом  $TiO_2$  и  $YTi_2O_6$ , в объеме зерен на дислокациях обнаруживаются наноразмерные (10-15 нм) частицы, предположительно  $TiO_2$  или  $YAl_3$ . **Практическая значимость.** Применение данного способа комбинированной модификации в производстве высокопрочных и износостойких компонентов для авиационной и автомобильной промышленности, а также в других сферах, где требуются материалы с улучшенными механическими свойствами.

**Ключевые слова:** силумин Al-15%Si, электровзрывное легирование, электронно-пучковая обработка, порошок  $Y_2O_3$ , комбинированная обработка, фазовый состав, рентгенограмма, микроэлектронограмма

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

© Шлярова Ю.А., Шляров В.В., Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., 2025

### Для цитирования

Распределение фаз и структурные изменения высококремнистого силумина после электровзрывного легирования и обработки электронным пучком / Шлярова Ю.А., Шляров В.В., Серебрякова А.А., Загуляев Д.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 97-105. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-97-105>



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

# PHASE DISTRIBUTION AND STRUCTURAL CHANGES OF HIGH-SILICON SILUMIN AFTER ELECTRO-EXPLOSIVE ALLOYING AND ELECTRON BEAM TREATMENT

Shliarova Yu.A., Shliarov V.V., Serebryakova A.A., Zaguliaev D.V.

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

**Abstract. The Relevance of this Work.** The use of combined modification of the Al-15%Si alloy by methods of external energy influences makes it possible to locally strengthen the surface layer of parts and assemblies made of aluminum alloys. **Objectives.** It lies in identifying patterns of changes in the phase composition and structure of a high-silicon silumin alloy subjected to a combined modification depending on the depth of the modified layer. **Methods Applied.** Surface modification of the Al-15%Si alloy was performed, which consisted in combining electro-explosive alloying of the sample surface with  $Y_2O_3$  powder (EUV 60/10 unit) and electron beam irradiation of the samples modified by the electro-explosive method (SOLO unit, with the following irradiation parameters: accelerated electron energy 18 keV, electron beam energy density  $E_S = 35 \text{ J/cm}^2$  with a pulse duration of 150 microseconds, the number of pulses is 3, the pulse repetition rate is  $0.3 \text{ s}^{-1}$ , the pressure of the working gas (argon) in the working chamber is 0.02 Pa). **Originality.** It lies in the development of a unique method for modifying the Al-15%Si alloy, which consists in combined processing and improves its wear resistance and performance properties compared to the material in its original state. **Result.** As a result of X-ray phase analysis, it was found that the modified surface is characterized by a multiphase structure of the surface layer. At a distance of 25 microns from the surface, a grain structure formed by aluminum and titanium atoms was revealed, and at a depth of 65 microns, a lamellar eutectic structure was found in which aluminum-based plates of solid solution alternate with silicon plates. According to the results of microelectronogram indexing and dark-field analysis of foils obtained on the surface of the sample, particles in the form of needles or plates representing the elemental composition  $Ti_4Al_3Y_6$ , as well as aluminum, titanium, and yttrium oxides were identified, and particles of the oxide phase with the composition  $TiO_2$  and  $YTi_2O_6$  were found at a distance of 25 microns from the surface layer, nanoscale (10-15 nm) particles, presumably  $TiO_2$  or  $YAl_3$ , are found in the volume of grains on the dislocations. **Practical Relevance.** It lies in the application of this combined modification method in the production of high-strength and wear-resistant components for the aviation and automotive industries, as well as in other areas where materials with improved mechanical properties are required.

**Keywords:** silumin Al-15%Si, electroexplosive alloying, electron beam processing,  $Y_2O_3$  powder, combined processing, phase composition, X-ray diffraction pattern, microelectron diffraction pattern

The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 24-29-00665, <https://rscf.ru/project/24-29-00665/>.

## For citation

Shliarova Yu.A., Shliarov V.V., Serebryakova A.A., Zaguliaev D.V. Phase Distribution and Structural Changes of High-Silicon Silumin after Electro-Explosive Alloying and Electron Beam Treatment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 97-105. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-97-105>

## Введение

Современные технологии обработки материалов требуют постоянного поиска инновационных решений для улучшения их физико-механических свойств. Одной из перспективных стратегий является электро-взрывное легирование и электронно-пучковая обработка, которые открывают новые горизонты в модификации свойств сплавов [1, 2]. Эти методы обработки позволяют значительно улучшить структуру и, соответственно, характеристики материалов, что, в свою очередь, может привести к повышению их долговечности и эксплуатационных качеств [3, 4].

В последние годы особое внимание уделяется высококремнистым силуминам, обладающим хорошими антикоррозионными свойствами и высокой прочно-

стью [5]. Эти материалы обладают уникальными характеристиками, которые делают их оптимальными для применения в различных отраслях, включая автомобилестроение и аэрокосмическую промышленность [6]. Высококремнистые сплавы, такие как Al-Si, продемонстрировали значительные преимущества в условиях коррозионной среды и механических нагрузок, что делает их предпочтительными для использования в конструкциях, требующих высокой надежности и устойчивости к внешним воздействиям [7].

Кроме этого, использование современных методов, таких как электронно-пучковая обработка [8, 9], способствует созданию материалов с заданными свойствами. Например, использование электронно-пучковой обработки позволяет улучшить микроструктуру материалов, что, в свою очередь, влияет на

их физико-механические характеристики. Также следует отметить, что сочетание двух и более видов обработки приводит к наиболее выраженному эффекту, показанному в ранних работах авторского коллектива, а именно к кардинальным изменениям состояния дефектной субструктуры поверхностного слоя материала [10].

Целью данной статьи является выявление закономерностей изменения фазового состава и структуры сплава высококремнистого силумина, подвергнутого комбинированной модификации в зависимости от глубины модифицированного слоя.

### Материалы и методы исследования

В качестве материала исследования были использованы образцы силумина Al-15%Si. Элементный состав силумина: 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  $15 \times 15 \times 10$  мм<sup>3</sup>. Электровзрывное легирование поверхности образцов осуществляли порошком  $Y_2O_3$  на установке ЭВУ 60/10 (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк) [11], при следующих параметрах:  $m_{(Al)} = 0,0589$  г;  $m_{(Y_2O_3)} = 0,0589$ ;  $U = 2,8$  кВ.

Облучение модифицированных электровзрывным методом образцов осуществляли на установке «СОЛО», входящей в перечень объектов современной исследовательской инфраструктуры Российской Федерации (УНУ «УНИКУУМ» (<http://www.ckr-rf.ru/usu/434216/>) с использованием одноименного источника электронов в среде аргона особой чистоты (99,999%) при давлении 35 МПа [4]. Параметры облучения: энергия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов  $E_S = 35$  Дж/см<sup>2</sup> при длительности импульсов воздействия 150 мкс, количество импульсов 3, частота следования импульсов  $0,3$  с<sup>-1</sup>, давление рабочего газа (аргон) в рабочей камере 0,02 Па.

Исследование элементного состава и дефектной структуры поверхности модифицирования образцов силумина осуществляли методами сканирующей электронной микроскопии (прибор Philips SEM-515 с микроанализатором EDAX ECON IV). Исследование фазового состава и дефектной субструктуры модифицированного слоя силумина осуществляли методами просвечивающей дифракционной электронной микроскопии (прибор JEOL JEM-2100F) [12, 13].

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 бомбардировкой поверхности пластинок ионами и нейтральными атомами аргона на установке Ion Slicer (EM-09100IS). Пластины вырезали в сечении, перпендикулярном модифицированной поверхности образца. Это позволяло на одной фольге исследовать изменение струк-

туры 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) на  $CuK_{\alpha}$ -излучении. Анализ фазового состава проводили с использованием баз данных PDF 4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.4.

### Результаты исследований

Фазовый состав модифицированного поверхностного слоя был изучен с использованием методов рентгенофазового анализа. На **рис. 1** представлена рентгенограмма, полученная от образца силумина, который прошел комплексную обработку, включающую электровзрывное легирование с последующим облучением импульсным электронным пучком. Проведенный анализ рентгенограммы продемонстрировал, что химические элементы, обнаруженные в поверхностном слое, формируют многофазную структуру. В этой структуре присутствуют следующие компоненты: твердый раствор алюминия (Al), состав которого составляет 45 мас. %, кремний (Si) в количестве 9 мас. %, алюминид титана (TiAl) с содержанием 20 мас. %, оксид алюминия ( $Al_2O_3$ ) на уровне 20 мас. % и оксид иттрия ( $Y_2O_3$ ), который составляет 6 мас. %. Составленный многофазный слой демонстрирует потенциальные улучшения в термостойкости и механических свойствах.

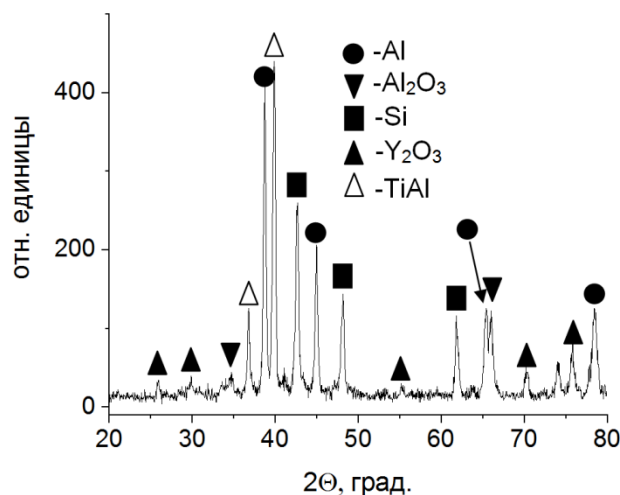


Рис. 1. Рентгенограмма силумина, подвергнутого комбинированной обработке, сочетающей электровзрывное легирование и последующее облучение импульсным электронным пучком при  $E_S = 35$  Дж/см<sup>2</sup>

Fig. 1. X-ray diffraction pattern of silumin subjected to combined processing, combining electro-explosive alloying and subsequent irradiation with a pulsed electron beam at  $E_S = 35$  J/cm<sup>2</sup>

Распределение фаз в объёме модифицированного слоя и визуализация распределения химических элементов в нём были изучены с использованием методов просвечивающей электронной дифракционной микроскопии, применяя методику индицирования микроэлектроннограмм и метод темнопольного анализа. Результаты элементного анализа объёма поверхностного слоя толщиной примерно 6 мкм представлены на **рис. 2**. Ясно видно, что области, обогащенные атомами алюминия, имеют округлую форму и размеры в диапазоне от 0,5 до 0,63 мкм (**рис. 2, а, б**). В то же время области, обогащенные атомами титана, формируют включения хлопьевидной формы, размеры которых варьируются от 0,6 до 0,78 мкм (**рис. 2, в**). Атомы кремния, очевидно, вместе с некоторыми атомами иттрия формируют прослойки, расположенные на границах включений, содержащих алюминий и титан (**рис. 2, г, д**). Атомы железа также наблюдаются на границах включений, обогащенных алюминием и титаном (**рис. 2, е**).

Фазовый состав области фольги, показанной на **рис. 2, а**, был исследован с применением метода индицирования микроэлектроннограммы в сочетании с темнопольным анализом (**рис. 3**). Проведенный анализ позволил выявить несколько особенностей структурных элементов: во-первых, были обнаружены зер-

на твердого раствора на основе алюминия, размер которых составляет от 400 до 500 нм (**рис. 3, в**). Во-вторых, зафиксированы частицы в виде игл или пластинок, которые представляют собой элементный состав  $Ti_4Al_{43}Y_6$  (**рис. 3, г**). Также были обнаружены частицы окислов титана, алюминия и иттрия, размеры которых варьируются от 20 до 45 нм (**рис. 3, д**). Дополнительно представлено распределение химических элементов в слое, который находится на расстоянии 25 мкм от поверхности модифицирования, как показано на **рис. 4**.

При сопоставлении результатов на **рис. 2, а**, и **рис. 4, а** можно отметить аналогичные структурные особенности в образующихся элементах: наблюдается зеренная структура, созданная атомами алюминия и титана. Вдоль границ этих зерен можно увидеть прослойки, которые обогащены атомами кремния и иттрия. Это может указывать на процессы диффузии элементов и изменения микроструктуры материала в результате модификации, что, в свою очередь, может оказывать существенное влияние на механические и физические свойства материала. Таким образом, результаты анализа не только подтверждают наличие различных фаз, но и позволяют делать выводы о распределении и взаимодействии химических элементов в пределах исследуемого материала.

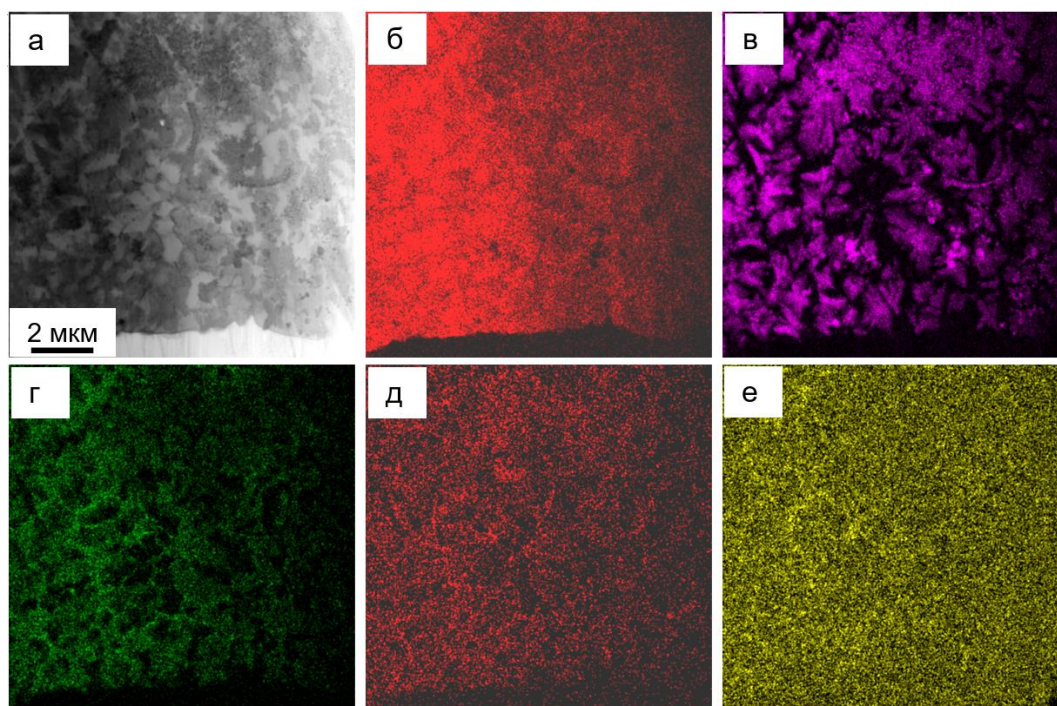


Рис. 2. ПЭМ-изображение структуры поверхностного слоя образца силумина, подвергнутого комбинированной обработке (а); изображение участка а, полученное в характеристическом рентгеновском излучении атомов Al (б), Ti (в), Si (г), Y (д), Fe (е)

Fig. 2. STEM of the structure of the surface layer of a silumin sample subjected to combined treatment (a); image of section a obtained in the characteristic X-ray radiation of atoms of Al (б), Ti (в), Si (г), Y (д), Fe (е)

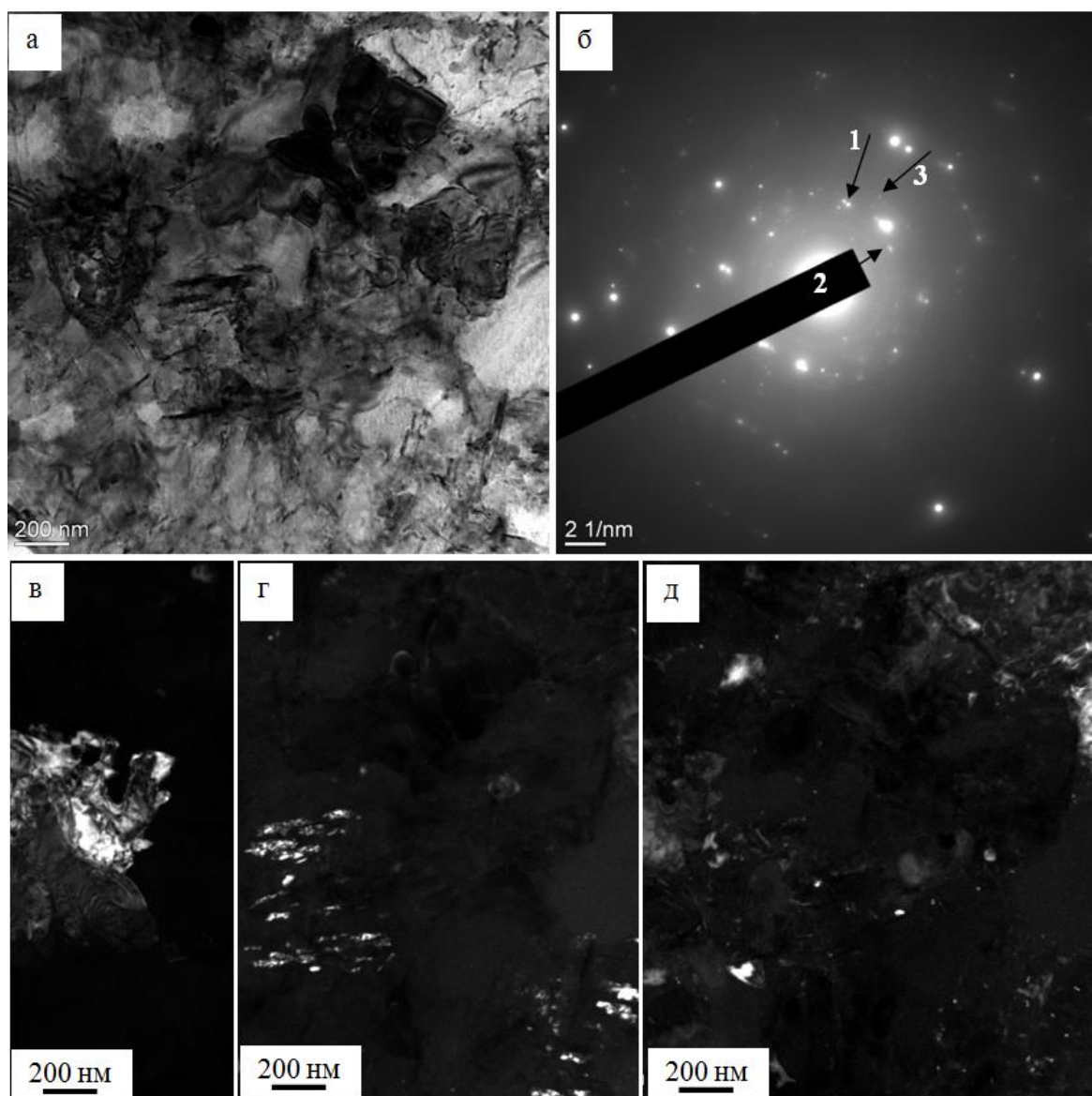


Рис. 3. ПЭМ-изображение структуры поверхностного слоя силумина, модифицированного комбинированным методом: а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма; в–д – темные поля, полученные в рефлексах  $[111]\text{Al}$  (в),  $[206]\text{Ti}_4\text{Al}_{43}\text{Y}_6 + [102]\text{Ti}_5\text{O}_9$  (г),  $[440]\text{Y}_2\text{O}_3 + [132]\text{TiO}_2 + [220]\text{YAlO}_3$  (д) (на б стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля: для в – 1, для г – 2, для д – 3)

Fig. 3. STEM image of the structure of the surface layer of silumin modified by the combined method: a is light field; b is microelectron diffraction pattern; в–д are dark fields obtained in reflexes  $[111]\text{Al}$  (в),  $[206]\text{Ti}_4\text{Al}_{43} + [102]\text{Ti}_5\text{O}_9$  (г),  $[440]\text{Y}_2\text{O}_3 + [132]\text{TiO}_2 + [220]\text{YAlO}_3$  (д); on б the arrows indicate the reflexes in which dark fields are obtained: for в – 1, for г – 2, for д – 3

На рис. 5 представлены результаты анализа фазового состава участка фольги, находящегося на расстоянии 25 мкм от поверхности модифицирования. Установлено присутствие зерен, сформированных твердым раствором на основе алюминия (рис. 5, в). Внутри зерен на дислокациях выявлены наночастицы размером 10–15 нм, которые предположительно являются фазами  $\text{TiO}_2$  или  $\text{YAl}_3$ . На границах зерен алюминия обнаружены слои, содержащие кремний, а также оксиды титана и иттрия (рис. 5, г). Области, обогащенные атомами титана, показаны на рис. 5, д.

Методами микроэлектронной микроскопии установлено наличие частиц окисных фаз, таких как  $\text{TiO}_2$  и  $\text{YTi}_2\text{O}_6$ , в указанных областях.

На рис. 6 показано распределение химических элементов в слое, находящемся на расстоянии 65 мкм от поверхности модифицирования. Зафиксирована структура пластинчатой эвтектики, где пластины твердого раствора на основе алюминия чередуются с пластинами кремния. Также в зерне эвтектики обнаружены включения пластинообразной формы, обогащенные атомами железа (рис. 6, г).

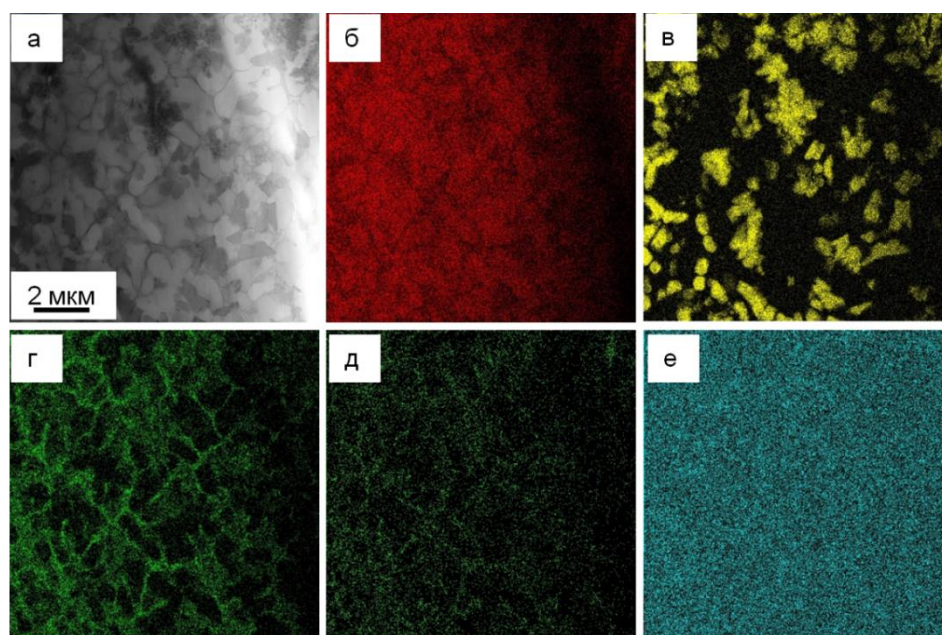


Рис. 4. ПЭМ-изображение структуры слоя образца силумина, подвергнутого комбинированной обработке, расположенного на глубине 25 мкм (а); изображение участка а, полученное в характеристическом рентгеновском излучении атомов Al (б), Ti (в), Si (г), Y (д), Fe (е)

Fig. 4. STEM image of the structure of the silumin sample layer subjected to combined processing, located at a depth of 25 microns (a); image of the site a obtained in the characteristic X-ray radiation of Al (б), Ti (в), Si (г), Y (д), Fe (е) atoms

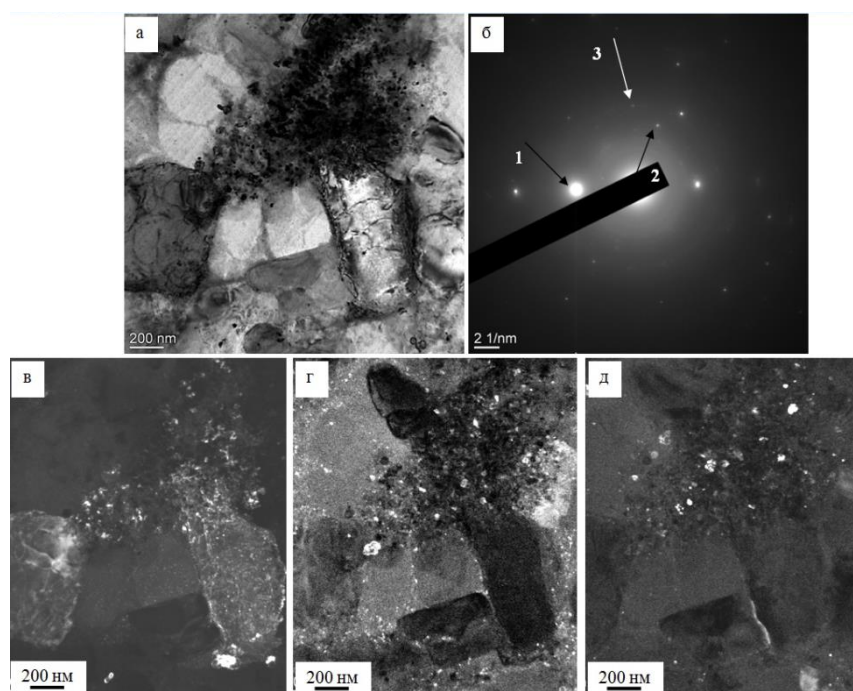


Рис. 5. ПЭМ-изображение структуры слоя силумина, модифицированного комбинированным методом, расположенного на глубине 25 мкм: а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма; в-д – темные поля, полученные в рефлексах  $[002]\text{Al} + [210]\text{TiO}_2 + [211]\text{YAl}_3$  (в),  $[220]\text{Si} + [231]\text{TiO}_2 + [440]\text{Y}_2\text{O}_3$  (г),  $[110]\text{Ti} + [223]\text{YTi}_2\text{O}_6$  (д) (на б стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля: для в – 1, для г – 2, для д – 3)

Fig. 5. STEM image of the structure of the silumin layer modified by the combined method, located at a depth of 25 microns: a is light field; б is microelectron diffraction pattern; в-д are dark fields obtained in reflexes  $[002]\text{Al} + [210]\text{TiO}_2 + [211]\text{YAl}_3$  (в),  $[220]\text{Si} + [231]\text{TiO}_2 + [440]\text{Y}_2\text{O}_3$  (г),  $[110]\text{Ti} + [223]\text{YTi}_2\text{O}_6$  (д); on б the arrows indicate the reflexes in which dark fields are obtained: for в – 1, for г – 2, for д – 3

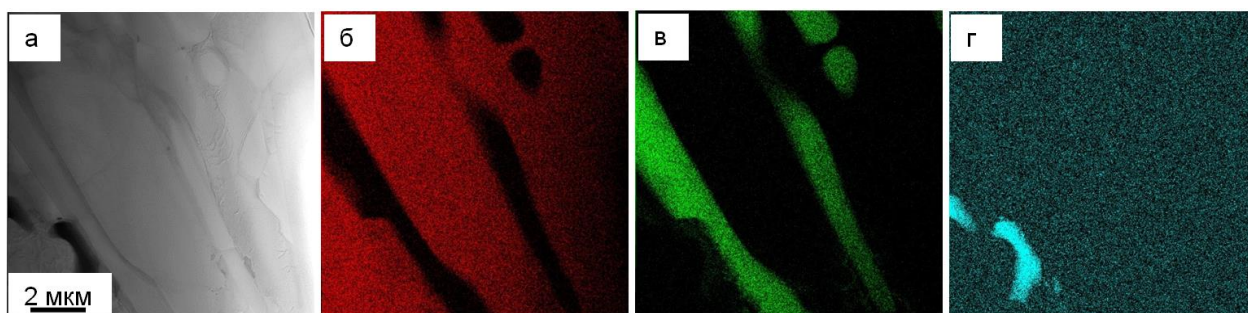


Рис. 6. ПЭМ-изображение структуры слоя образца силумина, подвергнутого комбинированной обработке, расположенного на глубине 65 мкм (а); изображение участка а, полученное в характеристическом рентгеновском излучении атомов Al (б), Si (в), Fe (г)

Fig. 6. STEM image of the structure of the layer of a silumin sample subjected to combined processing, located at a depth of 65 microns (a); image of the site a obtained in the characteristic X-ray radiation of Al (б), Si (в), Fe (г) atoms

В результате проведенного электронно-микроскопического анализа можно сделать вывод о том, что толщина модифицированного слоя исследуемого участка образца составляет не более 60 мкм.

### Заключение

1. Проведена комплексная обработка силумина Al-15%Si, включающая в себя электровзрывное легирование порошком оксида иттрия с последующим облучением импульсным электронным пучком с длительностью воздействия в субмиллисекундном диапазоне.

2. В проведенном рентгенофазовом анализе модифицированной поверхности образца была выявлена многофазная структура поверхностного слоя. На глубине 25 мкм от поверхности обнаружена зернистая структура, сформированная атомами алюминия и титана, что указывает на наличие процессов легирования. На расстоянии 65 мкм от поверхности была идентифицирована структура, представляющая собой пластинчатую эвтектику, состоящую из чередующихся слоев твердого раствора на основе алюминия и кремния, что свидетельствует о сложных фазовых преобразованиях, происходящих в этом слое.

3. Также была проведена идентификация микроэлектроннограмм и темнопольный анализ фольг, полученных с поверхности образца. В ходе анализа были обнаружены частички, имеющие форму игл или пластин, которые составляют элементную фазу  $Ti_4Al_{43}Y_6$ . Кроме того, были идентифицированы окислы алюминия, титана и иттрия. На глубине 25 мкм от поверхности наблюдаются частицы окисной фазы с составом  $TiO_2$  и  $YTi_2O_6$ . В объемной части зерен, особенно в областях дислокаций, были найдены наноразмерные частицы (10–15 нм), которые, вероятно, представляют собой  $TiO_2$  или  $YAl_3$ , что указывает на многообразие фазовых состояний и сложную микроструктуру, влияющую на механические свойства и коррозионную стойкость исследуемого материала.

Результаты показывают, что комбинированная обработка способствует формированию в поверхностном слое многоэлементной многофазной субмикро- и нанокристаллической структуры, упрочняющей фазой которой служат частицы оксидов алюминия, титана, кремния и иттрия.

### Список источников

1. Девятков В.Н., Коваль Н.Н., Щанин П.М. Получение высокоэнергетических низкоэнергетических электронных пучков в системах с плазменным эмиттером // Изв. вузов. Физика. 2001. Т. 44. № 9. С. 36–43.
2. Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н. Низкоэнергетические электронные пучки субмиллисекундной длительности: получение и некоторые аспекты применения в области материаловедения // Структура и свойства перспективных металлических материалов / под общ. ред. А.И. Потекаева. Гл. 13. Томск: Изд-во НТЛ, 2007. С. 345–382.
3. Разработка комплексной технологии электронно-ионно-плазменного инжиниринга поверхности материалов и изделий / Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф., Тересов А.Д. и др. // Наноинженерия. 2015. № 4(46). С. 4–13.
4. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов / под общ. ред. Н.Н. Ковалья и Ю.Ф. Иванова. Томск: Изд-во НТЛ, 2016. 312 с.
5. Otani B. Silumin and its Structure // J. Inst. Met. 2022, no. 36, p. 1926.
6. Microstructures, mechanical properties, and corrosion behavior of novel high-thermal-conductivity hypoeutectic Al-Si alloys prepared by rheological high pressure die-casting and high pressure die-casting / Qi M., Kang Y., Qiu Q., Tang W., Li J. // J. Alloys Compd. 2018, no. 15 (745), pp. 487–502.
7. Marukovich E., Stetsenko V. The problem of modifying an aluminum-silicon eutectic alloy of silumins. Way of solutions // Litiyo i Metallurgiya. 2018, pp. 12–15.
8. Electroexplosive consolidation and heat treatment of Al-Si alloys / F. L. D. S. B. Lima et al. // Journal of Materials Science. 2019, vol. 54, no. 2, pp. 123–134.

9. Properties of high-silicon aluminum alloys processed by electron beam melting / V.A. Khomutov et al. // Journal of Alloys and Compounds. 2020, vol. 812.
10. Структура поверхности силумина АК15, подвергнутого комбинированному внешнему энергетическому воздействию / Серебрякова А. А., Шлярова Ю. А., Шляров В. В., Загуляев Д. В. // Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов, посвященные 105-летию со дня рождения Марка Львовича Бернштейна : сборник тезисов научно-технического семинара, 22–26 октября 2024 г. / Университет науки и технологий МИСиС [и др.]. М.: НИТУ МИСиС, 2024. С. 117.
11. Surface modification by the EVU 60/10 electroexplosive system / Romanov D.A., Budovskikh E.A., Zhmakin Y.D., Gromov V.E. // Steel in Translation. 2011, vol. 41, no. 6, pp. 464–468.
12. Primig S., Theska F., Haghdadi N. Electron Microscopy Methods. Elsevier, 2020.
13. Kuo J. Electron Microscopy: Methods and Protocols. Humana Totowa, NJ, 2014.
4. Koval N.N., Ivanov Yu.F. *Razrabotka kompleksnoy tekhnologii elektronno-ionno-plazmennogo inzhiniringa poverhnosti materialov i izdeliy* [Development of a comprehensive technology for electron-ion-plasma surface engineering of materials and products]. Tomsk: NTL Publishing House, 2016, 312 p. (In Russ.)
5. Otani B. Silumin and its Structure. J. Inst. Met. 2022;36:1926.
6. Qi M., Kang Y., Qiu Q., Tang W., Li J. Microstructures, mechanical properties, and corrosion behavior of novel high-thermal-conductivity hypoeutectic Al-Si alloys prepared by rheological high pressure die-casting and high pressure die-casting. J. Alloys Compd. 2018;(15 (745)):487-502.
7. Marukovich E., Stetsenko V. The problem of modifying an aluminum-silicon eutectic alloy of silumins. Way of solutions. Litiyo i Metallurgiya. 2018:12-15.
8. Lima F. L. D. S. B., et al. Electroexplosive consolidation and heat treatment of Al-Si alloys. Journal of Materials Science. 2019;54(2):123-134.
9. Khomutov V.A., et al. Properties of high-silicon aluminum alloys processed by electron beam melt-ing. Journal of Alloys and Compounds. 2020;812.
10. Serebryakova A., Shliarova Yu.A., Shliarov V.V., Zagulyaev D.V. Surface structure of AK15 silumin subjected to combined external energy impact. *Bernshteinovskie chteniya po termomekhanicheskoy obrabotke metallicheskih materialov, posvyashchennye 105-letiyu so dnya rozhdeniya Marka Lvovicha Bernshteina : sbornik tezisov nauchno-tekhnicheskogo seminar* [Bernstein readings on thermomechanical processing of metallic materials dedicated to the 105th anniversary of the birth of Mark Lvovich Bernstein. Proceedings of the scientific and technical seminar]. Moscow: NUST MISIS, 2024, pp. 117. (In Russ.)
11. 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;41(6):464-468.
12. Primig S., Theska F., Haghdadi N. Electron Microscopy Methods. Elsevier, 2020.
13. Kuo J. Electron Microscopy: Methods and Protocols. Humana Totowa, NJ, 2014.

# References

1. Devyatkov V.N., Koval N.N., Shchanin P.M. Production of high-current low-energy electron beams in systems with a plasma emitter. *Izv. vuzov. Fizika* [News of universities. Physics], 2001;44(9):36-43. (In Russ.)
2. Ivanov Yu.F., Koval N.N. *Nizkoenergeticheskie elektronnye puchki submillisekundnoy dlitelnosti: poluchenie i nekotorye aspekty primeneniya v oblasti materialovedeniya* [Low-energy electron beams of submillisecond duration: production and some aspects of application in the field of materials science]. *Struktura i svoystva perspektivnykh metallicheskih materialov* [Structure and properties of promising metallic materials]. Tomsk: NTL Publishing House, 2007, pp. 345-382. (In Russ.)
3. Koval N.N., Ivanov Yu.F., Teresov A.D., et al. Development of an integrated technology for electron-ion-plasma engineering of the surface of materials and products. *Nanoinzheneriya* [Nanoengineering], 2015;(4(46)):4-13. (In Russ.)

Поступила 17.02.2025; принята к публикации 14.03.2025; опубликована 30.09.2025  
Submitted 17/02/2025; revised 14/03/2025; published 30/09/2025

**Шлярова Юлия Андреевна** – ассистент кафедры ЕНД имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.  
Email: rubannikova96@mail.ru. ORCID 0000-0001-5677-1427

**Шляров Виталий Владиславович** – заведующий сектором ОИАМиО, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.  
Email: ShlyarovVitaly@yandex.ru. ORCID 0000-0001-8130-648X

**Серебрякова Анна Александровна** – старший преподаватель кафедры транспорта и логистики, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.  
Email: aserebrakova87@gmail.com. ORCID 0000-0003-3979-7777

**Загуляев Дмитрий Валерьевич** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры ЕНД имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.  
Email: zagulyaev\_dv@physics.sibsiu.ru. ORCID 0000-0002-9859-8949

**Yulia A. Shliarova** – Assistant of the Department of Natural Science named after Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.  
Email: rubannikova96@mail.ru. ORCID 0000-0001-5677-1427

**Vitaliy V. Shliarov** – Head of the Sector of the Department of Information and Analytical Monitoring and Reporting,  
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.  
Email: ShlyarovVitaly@yandex.ru. ORCID 0000-0001-8130-648X

**Anna A. Serebryakova** – Senior Lecturer of the Department of Transport and Logistics,  
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.  
Email: aserebrakova87@gmail.com. ORCID 0000-0003-3979-7777

**Dmitriy V. Zaguliaev** – DrSc(Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Natural Science named after Professor V.M. Finkel,  
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.  
Email: zagulyaev\_dv@physics.sibsiu.ru. ORCID 0000-0002-9859-8949