

Оригинальная статья

УДК 621.789:538.911

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-4(50)-46-54

ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ И ФАЗОВОГО СОСТАВА СПЛАВА АК15, ПОДВЕРГНУТОГО ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОМУ ЛЕГИРОВАНИЮ И ОБРАБОТКЕ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

© 2024 г. Ю. А. Шлярова, А. А. Серебрякова, В. В. Шляров, А. Н. Прудников, Д. В. Загуляев

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

Аннотация. Заэвтектические сплавы Al – Si играют важную роль в промышленности и в области износостойкости материалов. В работе исследуется заэвтектический сплав Al – 15 % Si, подвергнутый комбинированной обработке в различных режимах. Анализировали покрытия методами: сканирующая электронная микроскопия (СЭМ); просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ); рентгенофазовый анализ; измерение микротвердости. Экспериментальные данные показывают, что введение Al – Y_2O_3 способствует улучшению как морфологических, так и механических характеристик композита. Фазовый анализ продемонстрировал разнообразие структур и размеров различных фаз в исследуемом материале. Важно отметить, что средняя микротвердость покрытия увеличилась в 1,5 раза по сравнению с подложкой, что указывает на успешное увеличение прочностных характеристик благодаря изменениям в структуре материала. Просвечивающая электронная микроскопия подтвердила, что кристаллические ячейки в основном состоят из Y_3Al_2 , в то время как промежуточные слои сформированы $Y_2Si_2O_7$. Эти соединения, как известно, обладают повышенной термостойкостью и прочностью, что в значительной степени способствует улучшению эксплуатационных характеристик материала. Использование интенсивного импульсного электронного пучка привело к образованию многофазной субмикро- и нанокристаллической структуры в поверхностном слое. Такой процесс способствует значительному повышению микротвердости. В результате структура материала становится более устойчивой при нагрузках, что значительно увеличивает его долговечность и надежность в условиях эксплуатации. Эти результаты подтверждают целесообразность использования комбинированных методов неравновесной модификации поверхности материалов и изделий, которые могут существенно повысить производительность и эффективность использования таких материалов в различных сферах промышленности.

Ключевые слова: силумин Al – 15 % Si, электровзрывное легирование, микротвердость, электронно-пучковая обработка, сканирующая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, многофазная субмикро- и нанокристаллическая структура

Финансирование: Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-29-00665, <https://rscf.ru/project/24-29-00665/>

Для цитирования: Шлярова Ю.А., Серебрякова А.А., Шляров В.В., Прудников А.Н., Загуляев Д.В. Изменение микротвердости и фазового состава сплава АК15, подвергнутого электровзрывному легированию и обработке электронным пучком. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;(4(50)):46–54. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-46-54](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-46-54)

Original article

CHANGES IN MICROHARDNESS AND PHASE COMPOSITION OF AK15 ALLOY SUBJECTED TO ELECTROEXPLOSIVE ALLOYING AND ELECTRON BEAM PROCESSING

© 2024 Yu. A. Shliarova, A. A. Serebryakova, V. V. Shlyarov, A. N. Prudnikov,
D. V. Zaguliaev

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

Abstract. Hypereutectic Al – Si alloys play an important role in industry and in the field of wear resistance of materials. The paper investigates the hypereutectic alloy Al – 15 % Si, subjected to combined processing in various modes. Coatings were analyzed using the following methods: scanning electron microscopy (SEM); scanning electron microscopy (TEM); X-ray phase analysis; measurement of microhardness. Experimental data show that the introduction of Al – Y_2O_3 improves both the morphological and mechanical characteristics of the composite. The phase analysis demonstrated a variety of structures and sizes of different phases in the studied material. It is important to note that the average micro-strength of the coating increased by 1.5 times compared to the substrate, which indicates a successful increase in strength characteristics due to changes in the structure of the material. Transmission electron microscopy confirmed that the crystalline cells mainly consist of Y_3Al_2 , while the intermediate layers are formed by $Y_2Si_2O_7$. These compounds are known to have increased thermal stability and strength, which greatly contributes to improving the operational characteristics of the material. The use of an intense pulsed electron beam led to the formation of a multiphase submicro- and nanocrystalline structure in the surface layer. This process contributes to a significant increase in microhardness. As a result, the structure of the material becomes more stable under loads, which significantly increases its durability and reliability under operating conditions. These results confirm the expediency of using combined methods of non-equilibrium surface modification of materials and products, which can significantly increase the productivity and efficiency of using such materials in various fields of industry.

Keywords: silumin AK15, electroexplosive alloying, microhardness, electron beam processing, scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, multiphase submicro- and nanocrystalline structure

Финансирование: The work was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 24-29-00665, <https://rscf.ru/project/24-29-00665/>

For citation: Shliarova Yu.A., Serebryakova A.A., Shlyarov B.B., Prudnikov A.N., Zaguliaev D.V. Changes in microhardness and phase composition of AK15 alloy subjected to electroexplosive alloying and electron beam processing. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;(4(50)):46–54. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-46-54](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-46-54)

Введение

Изменение микротвердости и фазового состава металлов и сплавов под воздействием различных тепловых и механических процессов является одной из ключевых тем в области материаловедения и металлургии [1; 2].

Заэвтектические сплавы системы Al – Si, в частности, сплав АК15 (Al – 15 % Si), активно используются в аэрокосмической и автомобильной промышленности благодаря сочетанию низкой плотности и высокой прочности [3 – 6]. В последние годы активно используются неравновесные способы модификации поверхности металлических материалов, к одному из таких методов можно отнести электровзрывное легирование (ЭВЛ) [7 – 9]. Однако, как показали последние исследования, эффективным является комбинирование методов, например, ЭВЛ и обработка электронным пучком (ЭПО). Обработка электронным пучком позволяет создать высокий градиент температур с высокоскоростным охлаждением, при этом формируется уникальная ячеи-

стая структура, обладающая повышенными физико-механическими характеристиками [10 – 13].

В настоящей работе рассматриваются результаты исследования изменения микротвердости и фазового состава сплава Al – 15 % Si, подвергнутого электровзрывному легированию и обработке электронным пучком.

Целью работы является установление микротвердости и фазового состава сплава АК15 (Al – 15 % Si), подвергнутого комбинированной обработке, заключающейся в создании на поверхности сплава АК15 (Al – 15 % Si) системы покрытие (Al – Y_2O_3) – подложка (Al – 15 % Si) и последующее ЭПО.

В связи с изложенным представленная работа является актуальной, поскольку направлена на изменение свойств сплава Al – 15 % Si комбинированной обработкой.

Материалы и методика

В качестве материала исследования были использованы образцы силумина Al – 15 % Si. Элементный состав силумина (прибор Shimadzu

XRF-1800), мас. %: 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, остальное алюминий. Размеры образцов силумина 15×15×10 мм.

Электровзрывное легирование поверхности образцов осуществляли порошком Y_2O_3 на установке ЭВУ 60/10 (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк) [14], при следующих параметрах: $m(Al) = 0,0589$ г; $m(Y_2O_3) = 0,0589$ г; $U = 2,8$ кВ.

Облучение модифицированных электровзрывным методом образцов осуществляли на установке «СОЛО» [15], входящей в перечень объектов современной исследовательской инфраструктуры Российской Федерации (УНУ «УНИКУУМ» (<http://www.ckp-rf.ru/usu/434216/>) с использованием одноименного источника электронов в среде аргона особой чистоты (99,999 %) при давлении 35 МПа. Параметры облучения: энергия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов (E_s) 25 Дж/см², длительность импульсов воздействия 150 мкс, количество импульсов 3, частота следования импульсов 0,3 с⁻¹, давление рабочего газа (аргон) в рабочей камере 0,02 Па.

Исследования микротвердости материалов осуществлялись на микротвердомере HVS 1000 по ГОСТ 9450 – 76. Масса нагрузки, действующая на пирамиду, составляла 50 г, время под нагрузкой 10 с. Значение микротвердости усреднялось по 30 измерениям с шагом 25 мкм.

Исследования 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 микро-

скопии [14 – 19]. Фазовый состав модифицированного слоя изучали методами рентгеноструктурного и рентгенофазового анализа (рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD 6000).

Результаты

Морфология поверхности сплава Al – 15 % Si показана на рис. 1. *а*, результат рентгенофазового анализа – на рис. 1, *б*. Пики указывают на то, что сплав в основном состоит из твердого раствора алюминия и частиц кремния. Структурное состояние данного материала характеризуется зернами эвтектики Al – Si (рис. 1, обл. 1), кристаллами первичного кремния (рис. 1, область 2), включениями пластинчатой (ленточной) формы, обогащенными атомами железа (рис. 1, область 3) и зернами твердого раствора на основе алюминия (рис. 1, область 4). Соотношение химических элементов в данных структурных составляющих силумина приведено в таблице. Методами рентгенофазового анализа установлено, что относительное содержание фаз алюминия и кремния в литом силумине составляет 51 и 49 мас. %.

Комбинированная обработка образцов литого силумина, сочетающая электровзрывное легирование и последующее облучение импульсным электронным пучком (ЭВЛ + ЭПО), приводит к кардинальным изменениям элементного и фазового составов и состояния дефектной субструктуры поверхностного слоя материала. Обработка комбинированным методом при $E_s = 25$ Дж/см² сопровождается формированием рельефной структуры, характерное изображение которой приведено на рис. 2, *а*, *б*. При сравнительно больших увеличениях выявляется субструктура поверхностного слоя, сформированная зернами, размеры которых изменяются в пределах

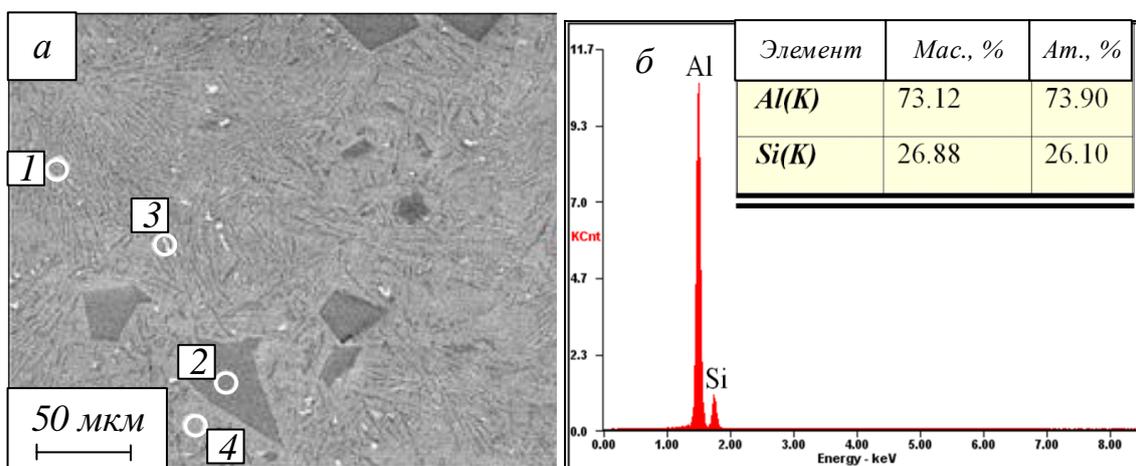


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение структуры силумина Al – 15 % Si в литом состоянии (*а*) и энергетические спектры (*б*), полученные с площади образца, изображение которой представлено на поз. *а*
 Fig. 1. Electron microscopic image of the structure of silumin Al – 15 % Si in the cast state (*a*) and energy spectra (*b*) obtained from the sample area, the image of which is shown in fig. *a*

Результаты микрорентгеноспектрального анализа образца силумина (рис. 3) The results of the microrentgenospectral analysis of the silumin sample (Fig. 3)

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

0,4 – 0,7 мкм (рис. 2, в). Характерным элементом поверхностного слоя являются частицы сферической формы размерами 0,6 – 9,0 мкм (рис. 2, б, в). Можно предположить, что данные образования являются частицами порошка Y_2O_3 .

При воздействии интенсивного импульсного электронного пучка с плотностью энергии 25 Дж/см² морфология покрытия претерпевает заметные изменения (рис. 3). Результаты исследований (микрорентгеноспектральный анализ), представленные на рис. 3 и в таблице, свидетельствуют о наличии в поверхностном слое областей, обогащенных атомами иттрия (рис. 3, обл. 1), атомами титана (рис. 3, обл. 2) и атомами титана и алюминия (рис. 3, обл. 3).

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

Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии с использованием фольг проведены исследования структуры силумина в зависимости от расстояния от поверхности модифицирования. На рис. 4 приведено STEM изображение структуры поперечного сечения области 1, указанной на рис. 3.

При анализе рис. 4 можно сделать вывод о наличии многослойной структуры. В слое 1

наблюдается обогащение атомами иттрия, что свидетельствует о его значительной роли в формировании поверхности. Слой 2 содержит структуру включения, обогащенные атомами титана и атомами алюминия. Слой 3 включает атомы алюминия и также содержит включения, обогащенные атомами титана, кремния и железа. Подобная многослойная структура оказывает существенное влияние на формирование конечных механических характеристик обрабатываемого сплава [20].

Для более детального представления элементного состава структуры (рис. 4) ниже приведены количественные данные, которые отражают соотношение элементов в исследуемом участке фольги (в числителе и знаменателе: мас. и ат. %).

Содержание элемента, мас. % / ат. %						
O	Al	Si	Ti	Fe	Y	
<u>4,72</u>	<u>42,43</u>	<u>7,60</u>	<u>26,67</u>	<u>4,48</u>	<u>14,09</u>	
10,06	53,60	9,22	18,98	2,74	5,40	

Результаты анализа фазового состава участка фольги, расположенного на глубине 45 мкм от поверхности модифицирования, представлено на рис. 5. Основными элементами структуры являются зерна твердого раствора на основе алюминия, размеры которых изменяются в пределах 0,3 – 0,5 мкм (рис. 5, в) и зерна твердого раствора на основе титана размерами 0,10 – 0,25 мкм

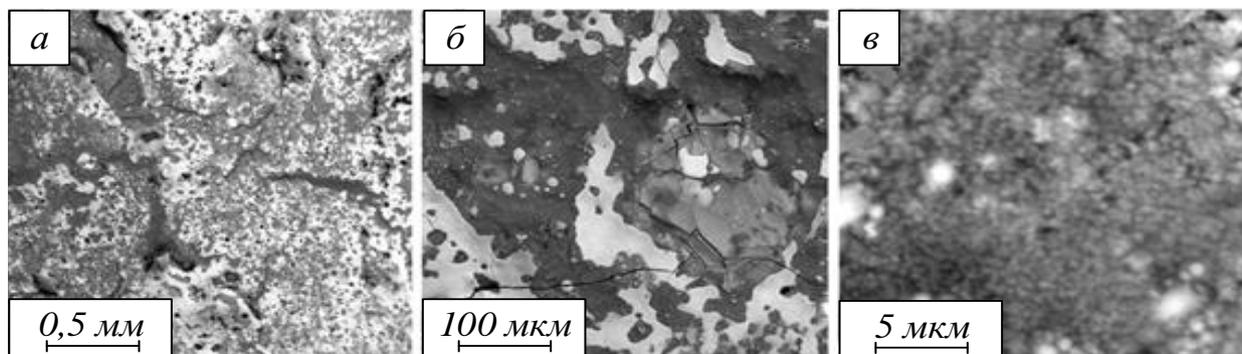


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности образца силумина, подвергнутого комбинированной обработке (плотность энергии пучка электронов 25 Дж/см²)

Fig. 2. Electron microscopic image of the surface structure of a silumin sample subjected to combined treatment (electron beam energy density of 25 J/cm²)

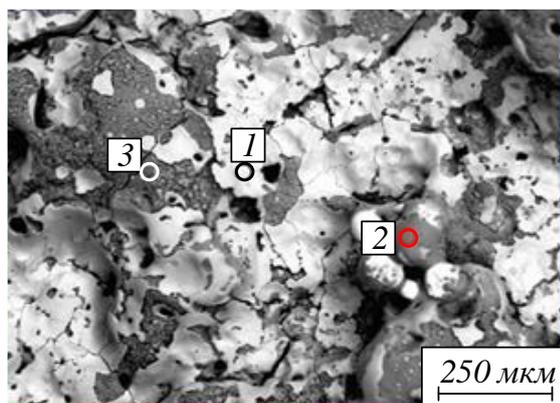


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности образца силумина, подвергнутого комбинированной обработке (плотность энергии пучка электронов 25 Дж/см²)

Fig. 3. Electron microscopic image of the surface structure of a silumin sample subjected to combined treatment (the energy density of the electron beam is 25 J/cm²)

(рис. 5, з). Данный слой содержит наноразмерные (10 – 40 нм) частицы оксидов титана, кремния и алюминия (рис. 5, з).

Распределение химических элементов в слое, расположенном на расстоянии 65 мкм от поверхности модифицирования, представлено на рис. 6. Наблюдается структура пластинчатой эвтектики, в которой пластины твердого раствора на основе алюминия чередуются с пластинами кремния. Одновременно с этим в зерне эвтектики присутствуют включения пластинчатой формы, обогащенные атомами железа (рис. 6, з). Таким образом можно заключить, что толщина модифицированного слоя участка образца не превышает 60 мкм.

Результаты измерения микротвердости показали, что микротвердость исходного сплава составляет порядка 51 HV, формирование системы покрытие (Al – Y₂O₃)/подложка (Al – 15 % Si) приводит к увеличению микротвердости поверхности в 1,6 раза и составляет 176,7 HV. Дополнительное облучение полученной системы электронным пучком также приводит к еще большему увеличению микротвердости до 286,3 HV. Таким образом можно утверждать, что комбинированная обработка является эффективным способом повышения прочностных характеристик исследуемого материала [21].

Выводы

Процесс электровзрывного легирования силумина системы Al – 15 % Si с добавлением оксида иттрия, за которым последовала обработка интенсивным импульсным электронным пучком, способствовал образованию субмикро- и нанокристаллического слоя, который обогащен атомами иттрия и кислорода.

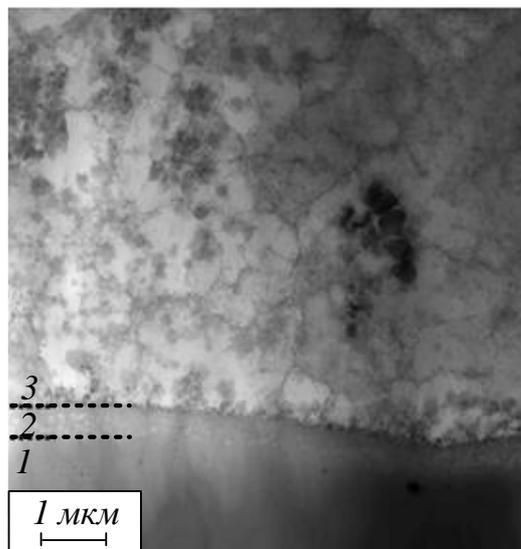


Рис. 4. STEM изображение структуры поперечного сечения области 1

Fig. 4. SEM image of the cross-sectional structure of area 1

Методами рентгенофазового анализа показано, что комбинированная обработка сопровождается формированием многофазного поверхностного слоя, основными фазами которого являются твердый раствор на основе алюминия, алюминид титана состава TiAl, оксид иттрия Y₂O₃ и оксиалюминид иттрия состава YAlO₃.

Микротвердость после комбинированной обработки значительно повышается по сравнению с исходным состоянием материала: рост микротвердости в 5,6 раза при комбинации ЭВЛ + ЭПО с плотностью энергии пучка электронов 25 Дж/см².

Полученные результаты открывают новые перспективы для применения модифицированных материалов в различных областях промышленности, где требуется высокая прочность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов Н.А. *Фазовый состав алюминиевых сплавов*. Москва: Издательский Дом МИСиС, 2009;392.
2. Белов Н.А., Савченко С.В., Хван А.В. *Фазовый состав и структура силуминов*. Москва: МИСИС, 2008;282.
3. Бельский С.Е., Волчок И.П., Митяев А.А., Свидунович Н.А. *Производство алюминиевых сплавов: состояние и перспективы. Литье и металлургия*. 2006;26:130–133.
4. Дроздов А.А. *Алюминий. Тринадцатый элемент: энциклопедия*. Москва: Библиотека РУСАЛа, 2007;239.
5. Золоторевский В.С., Белов Н.А. *Металловедение литейных алюминиевых сплавов*. Москва: МИСиС, 2005;376.

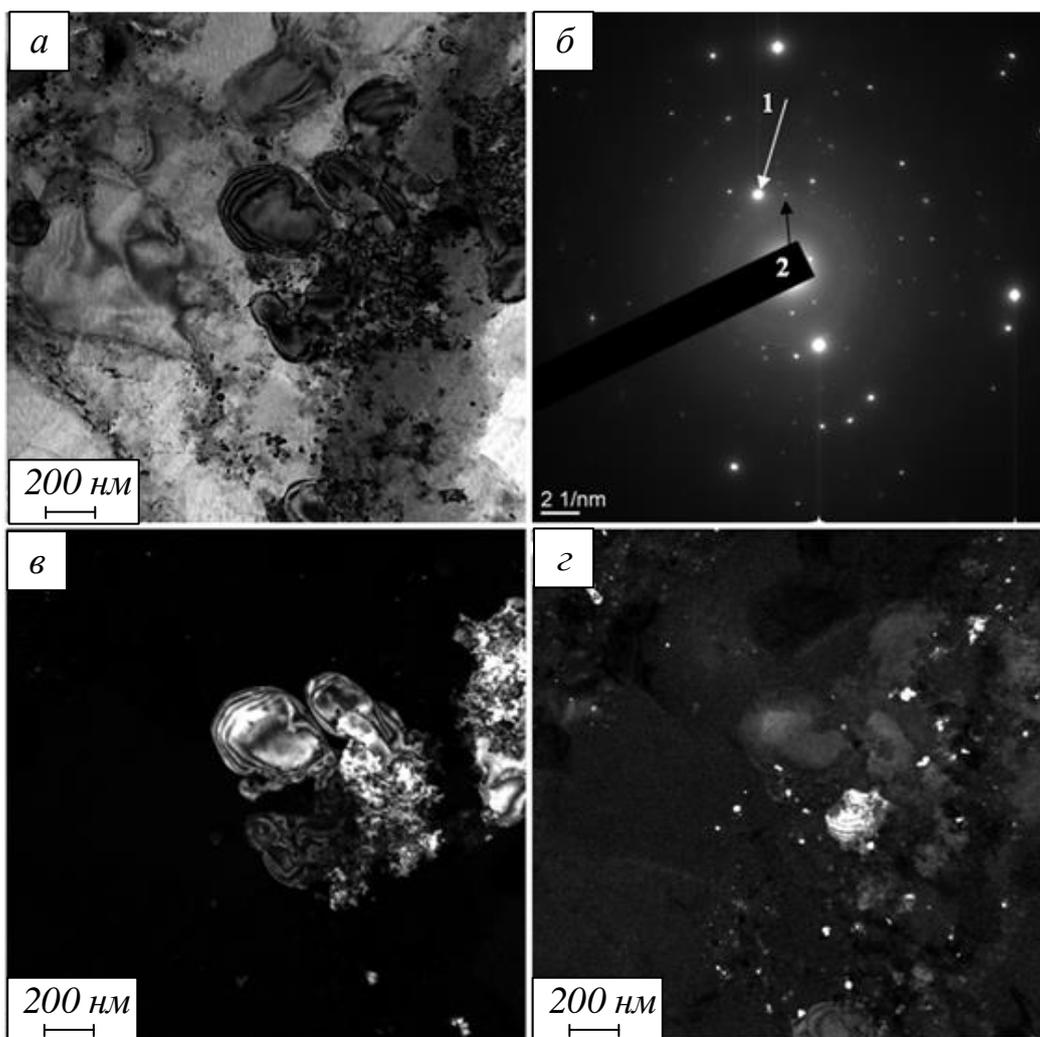


Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение структуры слоя силумина, модифицированного комбинированным методом, расположенного на глубине 45 мкм:
 а – светлое поле; б – микроэлектронграмма; в, г – темное поле, полученное в рефлексах $[111]\text{Al} + [442]\text{SiO}_2$ (в), $[002]\text{Ti} + [121]\text{Ti}_5\text{O}_9 + [131]\text{Al}_2\text{O}_3 + [342]\text{SiO}_2$ (г); на поз. б стрелками указаны рефлексы, в которых получено темное поле 1 для (в) и 2 для (г)

Fig. 5. Electron microscopic image of the structure of the silumin layer modified by the combined method, located at a depth of 45 microns:

а – light field; б – microelectronogram; в, г – dark field obtained in reflexes $[111]\text{Al} + [442]\text{SiO}_2$ (в), $[002]\text{Ti} + [121]\text{Ti}_5\text{O}_9 + [131]\text{Al}_2\text{O}_3 + [342]\text{SiO}_2$ (г); in pos. б the arrows indicate reflexes in which a dark field is obtained 1 for (в) and 2 for (г)

6. Javidani M., Larouche D. Application of cast Al-Si alloys in internal combustion engine components. *International Materials Reviews*. 2014;59(3):132–158.
7. Марукович Е., Стеценко В.Ю. Проблема модификации алюминиево-кремниевой эвтектики силуминов. Пути решения. *Литье и металлургия*. 2018;2:12–15.
<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-2-12-15>
8. Samat S., Omar M.Z., Baghdadi A.H., Mohamed I.F., Aziz A.M. Mechanical properties and microstructures of a modified Al-Si-Cu alloy prepared by thixoforming process for automotive connecting rods. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;10:1086–1102.
9. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой / А.П. Ласковнев, Ю.Ф. Иванов, Е.А. Петрикова и др.; под ред. А.П. Ласковнева. Минск: Беларус. Наука, 2013;287.
10. Sigworth G.K. The modification of Al-Si casting alloys: important practical and theoretical aspects. *International Journal of Metalcasting*. 2008;2(2):19–40.
<https://doi.org/10.1007/BF03355425>
11. Stepanova E.N., Grabovetskaya G.P., Mishin I.P., Teresov A.P., Syrtanov M.S. Structure and mechanical properties of the Zr-Nb-H system alloys after pulsed electron beam exposure.

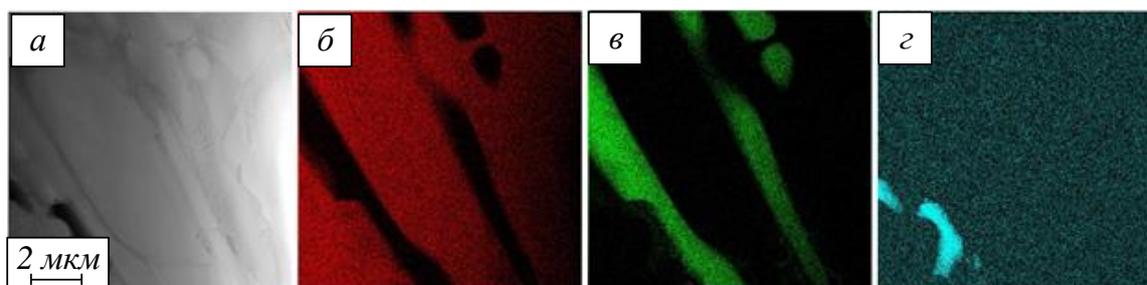


Рис. 6. Электронно-микроскопическое изображение структуры слоя образца силумина, подвергнутого комбинированной обработке, расположенного на глубине 65 мкм (а), и изображение участка (а), полученное в характеристическом рентгеновском излучении атомов алюминия (б), кремния (в) и железа (г)

Fig. 6. Electron microscopic image of the structure of the silumin sample layer, subjected to combined processing, located at a depth of 65 microns (a), and the image of the site (a) obtained in the characteristic X-ray radiation of aluminum (b), silicon (c) and iron (d) atoms

AIP Conference Proceedings: Proceedings of the Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures. 2018;251(1):020295.

<https://doi.org/10.1063/1.5083538>.

12. Bestetti M., Andrea L.H., Batuhan A., et al. Investigation on the properties of anodic oxides grown on aluminium-silicon alloys irradiated by pulsed electron beam. *Materials. Technologies. Design*. 2023;5(3(13)):109–122. https://doi.org/10.54708/26587572_2023_5313109
13. Гэн Я., Панченко И.А., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Чен С. Влияние электронно-пучковой обработки на структуру аддитивного сплава Al – Mg. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2023;2(44):13–19. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2\(44\)-13-19](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2(44)-13-19); EDN: HEJAEC.
14. Романов Д.А., Будовских Е.А., Жмакин Ю.Д., Громов В.Е. Опыт и перспективы использования электровзрывной установки ЭВУ 60/10 для модификации поверхности материалов. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2011;(6):19–23. EDN: QCFHVBX.
15. *Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов / Под общ. ред. Н.Н. Ковалея и Ю.Ф. Иванова*. Томск: Изд-во НТЛ, 2016;312.
16. Egerton F.R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing, 2016;196.
17. Kumar C.S.S.R. *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York: Springer, 2014;717.
18. Fultz B., Howe J. *Transmission Electron Microscopy and Diffractometry of materials, fourth edition*. Berlin: Springer, 2013;764.
19. Thomas J., Gemming T. *Analytical transmission Electron Microscopy*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014;348.
20. Liu Y.R., Zhang K.M., Zou J.X., Liu D.K., Zhang T.C. Effect of the high current pulsed electron beam treatment on the surface microstructure and corrosion resistance of a Mg-4Sm alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;741:65–75. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.227>
21. Zhang T.C., Zhang K.M., Zou J.X., Yan P., Yang H.Y., Song L.X., Zhang X. Surface microstructure and property modifications in a Mg-8Gd-3Y-0.5Zr magnesium alloy treated by high current pulsed electron beam. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;788:231–239. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.02.130>

REFERENCES

1. Belov N.A. *Phase composition of aluminum alloys*. Moscow: MISiS Publishing House, 2009:392. (In Russ.)
2. Belov N.A., Savchenko S.V., Hwang A.V. *Phase composition and structure of silumins*. Moscow: MISiS, 2008:282. (In Russ.)
3. Belsky S.E., Volchok I.P., Mityaev A.A., Svidunovich N.A. Production of aluminum alloys: status and prospects. *Casting and metallurgy*. 2006;2:130–133. (In Russ.)
4. Drozdov A.A. *Aluminum. The thirteenth element: encyclopedia*. Moscow: RUSAL Library, 2007:239. (In Russ.)
5. Zolotarevsky V.S., Belov N.A. *Metallurgy of foundry aluminum alloys*. Moscow: MISiS, 2005:376. (In Russ.)
6. Javidani M., Larouche D. Application of cast Al-Si alloys in internal combustion engine components. *International Materials Reviews*. 2014;59(3):132–158.
7. Marukovich E., Stetsenko V. The problem of modifying an aluminum-silicon eutectic alloy of silumins. Way of solutions. *Litiyo i Metallurgiya*. 2018;2:12–15. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-2-12-15>

8. Samat S., Omar M.Z., Baghdadi A.H., Mohamed I.F., Aziz A.M. Mechanical properties and microstructures of a modified Al–Si–Cu alloy prepared by thixoforming process for automotive connecting rods. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;10:1086–1102.
9. Laskovnev A.P., Ivanov Yu.F., Petrikova E.A. *Modification of the structure and properties of eutectic silumin by electron-ion-plasma treatment*. Minsk: Belarus Science, 2013:287. (In Russ.).
10. Sigworth G.K. The modification of Al-Si casting alloys: important practical and theoretical aspects. *International Journal of Metalcasting*. 2008;2(2):19–40.
<https://doi.org/10.1007/BF03355425>
11. Stepanova E.N., Grabovetskaya G.P., Mishin I.P., Teresov A.P., Syrtanov M.S. Structure and mechanical properties of the Zr-Nb-H system alloys after pulsed electron beam exposure. AIP Conference Proceedings: Proceedings of the Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures: electronic collection, Tomsk, 01–05 октября 2018. Vol. 2051. Tomsk: AIP Publishing LLC, 2018;020295.
<https://doi.org/10.1063/1.5083538>
12. Bestetti M., Andrea L. H., Batuhan A. Investigation on the properties of anodic oxides grown on aluminium-silicon alloys irradiated by pulsed electron beam. *Materials. Technologies. Design*. 2023;5(3):109–122.
https://doi.org/10.54708/26587572_2023_5313109
13. Gen Ya., Panchenko I.A., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Chen S. Effect of electron beam processing on the structure of additive Al – Mg alloy. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023;44(2):13–19. (In Russ.).
[https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2\(44\)-13-19](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2(44)-13-19)
14. Romanov D.A., Budovskikh E.A., Zhmakin Y.D., Gromov V.E. Surface modification by the EVU 60/10 electroexplosive system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011;(6):19–23.
15. *Electron-ion-plasma modification of the surface of non-ferrous metals and alloys*. N.N. Koval and Yu.F. Ivanov ed. Tomsk: NTL Publishing House, 2016:312. (In Russ.).
16. Egerton F.R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing, 2016:196.
17. Kumar C.S.S.R. *Transmission Electron Microscopy*. Characterization of Nanomaterials. New York: Springer, 2014:717.
18. Fultz B., Howe J. *Transmission Electron Microscopy and Diffractometry of materials, fourth edition*. Berlin: Springer, 2013:764.
19. Thomas J., Gemming T. *Analytical transmission Electron Microscopy*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014:348.
20. Liu Y.R., Zhang K.M., Zou J.X., Liu D.K., Zhang T.C. Effect of the high current pulsed electron beam treatment on the surface microstructure and corrosion resistance of a Mg-4Sm alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;741(3):65–75.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.227>
21. Zhang T.C., Zhang K.M., Zou J.X., Yan P., Yang H.Y., Song L.X., Zhang X. Surface microstructure and property modifications in a Mg-8Gd-3Y-0.5Zr magnesium alloy treated by high current pulsed electron beam. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;788(2):231–239.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.02.130>

Сведения об авторах

Юлия Андреевна Шлярова, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: rubannikova96@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5677-1427
SPIN-код: 7791-1310

Анна Александровна Серебрякова, старший преподаватель кафедры транспорта и логистики, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: aserebrakova87@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3979-7777
SPIN-код: 5889-2235

Виталий Владиславович Шляров, заведующий сектором ОИАМиО, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: shlyarov@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8130-648X
SPIN-код: 5074-3309

Александр Николаевич Прудников, д.т.н., доцент, профессор кафедры обработки металлов давлением и материаловедения ЕВРАЗ ЗСМК, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: a.prudnikov@mail.ru
ORCID: 0000-002-4150
SPIN-код: 1949-3246

Дмитрий Валерьевич Загуляев, д.т.н., доцент, начальник УНИ, профессор кафедры естественнонаучных дисциплин им. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: zagulyaev_dv@physics.sibsui.ru
ORCID: 0000-0002-9859-8949
SPIN-код: 9522-4745

Information about the authors

Yulia A. Shliarova, Researcher, Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University

E-mail: rubannikova96@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5677-1427
SPIN-код: 7791-1310

Anna A. Serebryakova, Senior Lecturer, Department of Transport and Logistics, Siberian State Industrial University

E-mail: aserebrakova87@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3979-7777
SPIN-код: 5889-2235

Vitaly V. Shlyarov, Head of the OIAMO Sector, Siberian State Industrial University

E-mail: shlyarov@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8130-648X
SPIN-код: 5074-3309

Aleksander N. Prudnikov, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Department of Metal Forming and Materials Science.

EVRAZ ZSMK, Siberian State Industrial University
E-mail: a.prudnikov@mail.ru

ORCID: 0000-002-4150
SPIN-код: 1949-3246

Dmitrii V. Zaguliaev, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Prof. Head of the Scientific Research Institute, Professor, Department of Natural Sciences named after V.M. Finkel, Siberian State Industrial University

E-mail: zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-9859-8949
SPIN-код: 9522-4745

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

Поступила в редакцию 05.11.2024

После доработки 18.11.2024

Принята к публикации 22.11.2024

Received 05.11.2024

Revised 18.11.2024

Accepted 22.11.2024