

УДК 669.715 : 621.793.182

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-5-69-78>

Научная статья

Research article



Электронно-ионно-плазменное модифицирование поверхности силумина заэвтектического состава

Ю.А. Шлярова¹, В.В. Шляров¹, Д.В. Загуляев¹, Ю.Ф. Иванов², В.Е. Громов¹¹ Сибирский государственный индустриальный университет
654007, Россия, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42² Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/3

✉ Юлия Андреевна Шлярова (rubannikova96@mail.ru)

Аннотация: В настоящем исследовании проведена сложная обработка силумина заэвтектического состава, включающая комбинацию электровзрывного легирования поверхностного слоя порошком оксида иттрия с последующим облучением импульсным электронным пучком. Полученные данные свидетельствуют о том, что такая комплексная обработка приводит к созданию многофазной субмикро-нанокристаллической структуры высокоскоростной ячеистой кристаллизации алюминия в поверхностном слое. Объем кристаллизационных ячеек обогащен атомами алюминия, что свидетельствует об образовании твердого раствора на основе алюминия. Нанокристаллические слои, образованные частицами кремния и оксидом иттрия, расположены вдоль границ ячеек. Исследование показывает, что в результате комплексной обработки при плотности энергии электронного пучка 25 Дж/см² происходит увеличение параметра износа модифицированных образцов в $7,9 \pm 0,6$ раза и уменьшение коэффициента трения в $1,7 \pm 0,15$ раза по сравнению с силумином в исходном состоянии. Кроме того, микротвердость модифицированного таким образом поверхностного слоя силумина возрастает по сравнению с исходным состоянием в $1,5 \pm 0,12$ раза. Повышение плотности энергии электронного пучка до 35 Дж/см² приводит к увеличению параметра износа силумина в $2,1 \pm 0,21$ раза, коэффициента трения в $1,13 \pm 0,1$ раза и снижению микротвердости в $1,3 \pm 0,13$ раза, при этом все еще превышая заданные характеристики силумина в исходном состоянии. В исследовании предполагается, что многократное увеличение параметра износа при комплексной обработке связано с присутствием в поверхностном слое включений кремния, которые не растворились при модификации, в окружении высокоскоростной ячеистой кристаллизационной структуры.

Ключевые слова: силумин, электровзрывное легирование, импульсный электронный пучок, структура, параметр износа.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-79-10059, <https://rscf.ru/project/19-79-10059/>

Для цитирования: Шлярова Ю.А., Шляров В.В., Загуляев Д.В., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Электронно-ионно-плазменное модифицирование поверхности силумина заэвтектического состава. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;29(5):69–78. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-5-69-78>

Electron-ion-plasma surface modification of hypereutectic silumin

Yu.A. Shliarova¹, V.V. Shlyarov¹, D.V. Zaguliaev¹, Yu.F. Ivanov², V.E. Gromov¹¹ Siberian State Industrial University
42 Kirov Str., Novokuznetsk, 654007, Russia² Institute of High-Current Electronics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk, 634055, Russia

✉ Yuliya A. Shliarova (rubannikova96@mail.ru)

Abstract: In this study, an integrated treatment approach was employed to modify hypereutectic silumin. This method involved electroexplosive alloying of the surface layer with yttrium oxide powder, followed by irradiation with a pulsed electron beam. The experimental data obtained

demonstrate that this integrated treatment results in the formation of a submicron-nanocrystalline structure characterized by high-speed cellular crystallization of aluminum within the surface layer. This structure is composed of crystallization cells enriched with aluminum atoms, indicating the creation of a solid solution based on aluminum. The nanocrystalline layers, formed by silicon particles and yttrium oxide, are positioned at the cell boundaries. The study reveals that, as a consequence of integrated treatment with an electron beam energy density of 25 J/cm^2 , the wear parameter of the modified samples increases by 7.9 ± 0.6 -fold, and the friction coefficient decreases by 1.7 ± 0.15 -fold compared to the initial state. Additionally, the microhardness of the modified silumin surface layer increases by 1.5 ± 0.12 -fold compared to the initial state. When the electron beam energy density is elevated to 35 J/cm^2 , the wear parameter of silumin is enhanced by 2.1 ± 0.21 -fold, while the friction coefficient increases by 1.13 ± 0.1 -fold. However, the microhardness decreases by 1.3 ± 0.13 -fold, while still surpassing the specified characteristics of untreated silumin. This investigation postulates that the substantial increase in the wear parameter during integrated treatment may be attributed to the presence of silicon inclusions in the surface layer that did not dissolve during the modification process. These inclusions are surrounded by the high-speed cellular crystallization structure mentioned earlier.

Keywords: silumin, electroexplosive alloying, pulsed electron beam, structure, wear parameter.

Acknowledgments: This research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 19-79-10059, <https://rscf.ru/project/19-79-10059/>

For citation: Shliarova Yu.A., Shlyarov V.V., Zaguliaev D.V., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. Electron-ion-plasma modification of the surface of silumin of hypereutectic composition. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;29(5):69–78. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-5-69-78>

Введение

Заэвтектические алюминиево-кремниевые (Al—Si) литейные сплавы широко применяются в аэрокосмической, автомобильной и общей машиностроительной промышленности благодаря своим превосходным свойствам — таким, как хорошие литейность, износостойкость и коррозионная стойкость, высокая прочность, пониженная плотность, хорошая теплопроводность и низкий коэффициент теплового расширения [1–3]. Таким образом, заэвтектические сплавы Al—Si являются привлекательными материалами, которые заменят традиционно используемый чугуны, чтобы способствовать экономии топлива и уменьшению выбросов газов транспортных средств в технических приложениях, включая блоки цилиндров, гильзы цилиндров и поршни [4; 5].

Хорошо известно, что общая микроструктура заэвтектических сплавов Al—Si состоит из первичных кристаллов Si и структуры эвтектической смеси α -Al и эвтектического Si. С увеличением содержания кремния первичный кремний и длинный игольчатый эвтектический кремний в заэвтектических сплавах Al—Si расщепляют матрицу и снижают характеристики сплавов. Поэтому важно модифицировать заэвтектические сплавы Al—Si для изменения морфологии и распределения первичных и эвтектических кремниевых фаз с целью улучшения механических и трибологических свойств сплавов [6; 7]. В настоящее время однозначно установлено существенное преобразование структуры и свойств поверхности материалов при воздействии на их поверхность интенсивных импульсных электронных пучков [8–11]. Совокупность положительных качеств интенсивных импульсных электронных пучков, несомненно,

является залогом их использования при комбинированных технологиях модифицирования металлических материалов.

В работах [12–14] заэвтектический сплав Al—17,5Si обрабатывали сильноточным импульсным электронным пучком. В результате обработанная поверхность демонстрирует разные структурные характеристики в разных составах и зонах распределения: это зона, обогащенная кремнием; обогащенная алюминием и промежуточная зона. Микроструктура в зоне, обогащенной кремнием, состоит из мелких, дисперсных и сферических наноразмерных кристаллов Si, окруженных Al-ячейками. Зона, богатая алюминием, имеет ячеистую микроструктуру с размером ячеек $\sim 100 \text{ нм}$. Промежуточная зона формируется на границе двух зон и состоит из эвтектической структуры. С увеличением количества импульсов доля богатой кремнием зоны по всей верхней поверхности увеличивается, и большое количество ячеистых субструктур преобразуется в мелкое равноосное зерно. В похожей работе [15] облучение заэвтектического силумина с меньшим содержанием кремния (Al—12,6Si) приводит к образованию мелкой и равноосной зеренной структуры, при этом износостойкость сплава значительно улучшается (в 2,5 раза).

В работе [16] исследовали поверхностное легирование молибденом алюминиевого сплава сильноточным электронным пучком. В результате было установлено, что после облучения в легированном слое появилась фаза Al_3Mo с игольчатой структурой. Были обнаружены многочисленные дефекты структуры — кратеры, различные трещины, дислокационные петли и дислокационные стенки. Исследования различных режимов облу-

чения показали, что с увеличением числа импульсов плотность и размеры кратеров, образующихся на облучаемой поверхности, значительно уменьшались; также наблюдалось существенное повышение коррозионной стойкости. Международным научным коллективом были исследованы вопросы влияния электронно-пучковой обработки на растворимость Sc в Al и эффекты упрочнения, связанные с повышенной растворимостью [17].

Обработка сильноточным импульсным электронным пучком заэвтектического сплава Al–15Si увеличивает прочность на разрыв обработанного сплава на 41,4 %. Очевидно, что такая обработка является универсальным методом для улучшения механических свойств заэвтектических сплавов системы Al–Si [18].

Наиболее перспективным методом обработки поверхности металлов и сплавов является электронно-ионно-плазменный метод, сочетающий в себе нанесение покрытия и последующее облучение электронным пучком. Данная комбинация методов позволяет не только осуществить термическое воздействие на поверхность материала, но и выполнить легирование поверхностного слоя [19–21]. В совокупности указанные методы воздействия на структуру и фазовый состав позволяют минимизировать большую часть недостатков и повысить срок службы деталей машин и механизмов.

Цель настоящей работы состояла в обнаружении и анализе закономерностей формирования структуры и свойств силумина заэвтектического состава, подвергнутого модифицированию частицами оксида иттрия комплексным методом, сочетающим электровзрывное легирование и последующее облучение импульсным электронным пучком.

Материалы и методика исследования

Для проведения исследования в закрытой лабораторной печи сопротивления СШОЛ в Сибирском государственном индустриальном университете (СибГИУ, г. Новокузнецк) были изготовлены 5 образцов силумина заэвтектического состава (Si — 20,28 мас.%; Fe — 1,14 %; Cu — 0,072 %; Mn — 0,015 %; Ni — 0,006 %; Ti — 0,006 %; Cr — 0,001 %; остальное — Al).

Первым этапом обработки было электровзрывное легирование силумина, которое осуществляли на электроразрядной установке ЭВУ 60/10 (СибГИУ). В качестве материала взрываемых проводников были использованы алюминиевые фольги; порошковой навеской служил Y_2O_3 . Обработку

выполняли по следующему режиму: масса алюминиевой фольги — 58,9 мг; масса порошка Y_2O_3 — 58,9 мг; напряжение разряда — 2,8 кВ.

На втором этапе проводили облучение модифицированной поверхности образцов силумина импульсным электронным пучком. Облучение осуществляли на установке «СОЛО» (Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск). Режимы облучения: энергия ускоренных электронов — 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов — 25 и 35 Дж/см², длительность импульса пучка электронов — 150 мкс, количество импульсов тока — 3, частота следования импульсов — 0,3 с^{–1}.

Структуру поверхности облучения анализировали методами растровой электронной микроскопии с помощью прибора SEM-515 (Philips, Нидерланды). Элементный состав поверхностного слоя материала определяли методами рентгеноспектрального микроанализа, используя микроанализатор EDAX ECON IV, являющийся приставкой к электронному растровому микроскопу SEM-515 (Philips, Германия). Структурно-фазовое состояние силумина в зависимости от расстояния до поверхности модифицирования исследовали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии тонких фольг (прибор JEM-2100F, JEOL, Япония), позволяющей изучать дефектную субструктуру и фазовый состав, осуществлять высокочувствительное сканирование электронным пучком и выполнять исследование элементного состава фольги методом энергодисперсионного анализа рентгеновского излучения. Механические свойства модифицированного силумина исследовали при комнатной температуре на воздухе, определяя микротвердость (прибор ПМТ-3, ОАО «ЛОМО», г. Санкт-Петербург, нагрузка на индентор — 0,5 Н). Трибологические свойства (прибор TRIBOtester, метод испытаний Pin-on-Disc, Франция) модифицированного силумина характеризовали параметром износа и коэффициентом трения. Условия испытаний, проводимых при комнатной температуре на воздухе: индентор — шарик Al_2O_3 диаметром 6 мм, нагрузка на индентор — 5 Н, скорость вращения образца — 25 мм/с, длина дорожки трения — 100 м.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведенные исследования включали облучение образцов силумина, легированных электровзрывным методом. Образцы подвергали воз-

действию импульсного электронного пучка с плотностью энергии 25 Дж/см^2 . Было установлено значительное снижение параметра износа модифицированных образцов в $7,9 \pm 0,6$ раза и коэффициента трения в $1,7 \pm 0,15$ раза по сравнению с литым силумином в исходном состоянии. Микротвердость модифицированного таким образом поверхностного слоя силумина показала относительно незначительное увеличение — в $1,5 \pm 0,12$ раза. Однако повышение плотности энергии электронного пучка до 35 Дж/см^2 привело к росту параметра износа силумина в $2,1 \pm 0,21$ раза и коэффициента трения в $1,13 \pm 0,1$ раза, а также к снижению микротвердости в $1,3 \pm 0,13$ раза по сравнению с характеристиками силумина, модифицированного при плотности энергии электронного пучка 25 Дж/см^2 , при сохранении превышения характеристик силумина в исходном состоянии.

Очевидно, что механические и трибологические характеристики силумина будут определяться состоянием структуры модифицированного поверхностного слоя. На рис. 1 приведены электронно-микроскопические изображения структуры поверхности силумина в исходном состоянии, демонстрирующие наличие большого количества включений ограниченной формы (частицы темного цвета), иглообразных включений и включений в виде китайских иероглифов.

Общеизвестно, что ограниченные включения являются частицами кремния (частицы темного цвета); включения в виде иероглифов и иглообразные включения — это соединения сложного состава (частицы светлого цвета), образованные атомами алюминия, железа, меди, марганца и кремния [22].

Ранее [23], при исследовании силуминов эвтектического состава было показано, что комбинированная обработка, сочетающая электровзрывное легирование оксидом иттрия и последующее облучение импульсным электронным пучком (40 Дж/см^2 , 200 мкс, 3 имп.), приводит к формированию поверхностного слоя толщиной до 150 мкм, имеющего структуру высокоскоростной ячеистой кристаллизации. Объем ячеек, размеры которых изменяются в пределах 400—800 нм, сформирован твердым раствором на основе алюминия. Ячейки разделены прослойками толщиной до 100 нм, образованными кремнием и интерметаллическими соединениями сложного элементного состава. Выявленное модифицирование силумина приводит к увеличению износостойкости в 3,5 раза, снижению коэффициента трения в 1,3 раза и повышению микротвердости в 1,2 раза относительно исходного материала. Можно предположить, что установленные в работе [19] закономерности эволюции структуры и свойств силумина эвтектического состава, подвергнутого комплексной обработке, будут наблюдаться и в силумине заэвтектического состава. Действительно, исследования, выполненные в настоящей работе, выявили формирование при комплексной обработке заэвтектического силумина структуры высокоскоростной ячеистой кристаллизации (рис. 2).

Рентгеноспектральный микроанализ фольг показал (рис. 3), что объем ячеек обогащен атомами алюминия; расположенные вдоль границ ячеек прослойки обогащены преимущественно атомами кремния и иттрия. Наряду с алюминием, кремнием и иттрием, в исследуемом слое обнару-

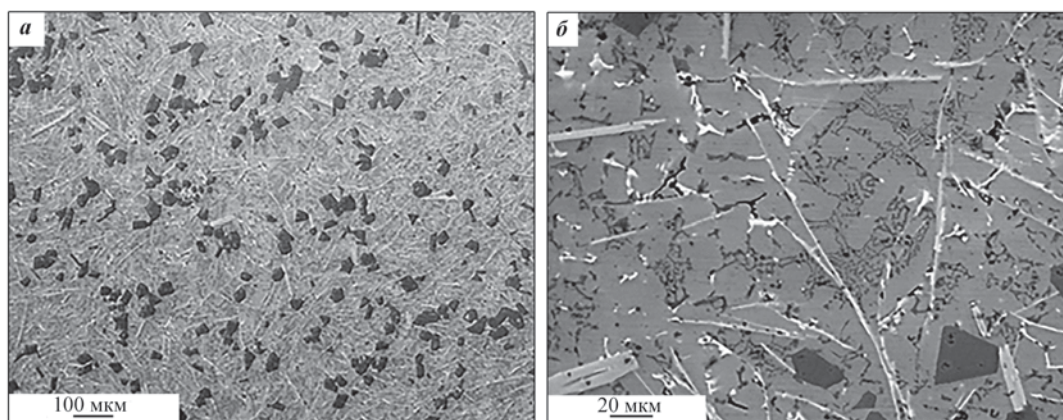


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения структуры силумина заэвтектического состава в исходном состоянии

Fig. 1. Electron microscopic images of the structure of hypereutectic silumin in the initial state

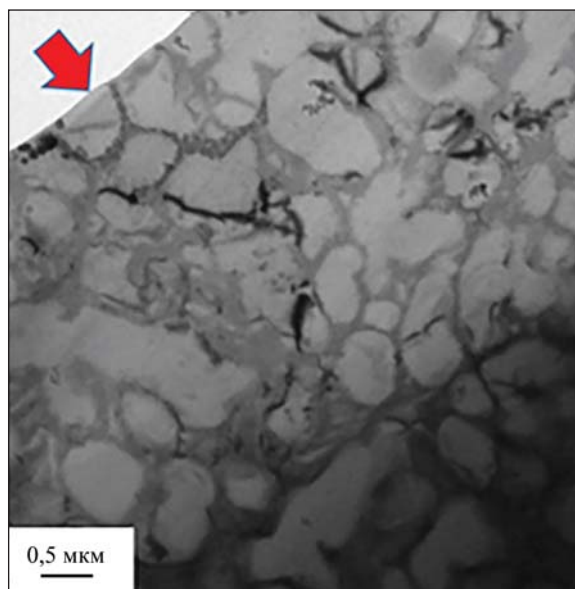


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры высокоскоростной ячеистой кристаллизации, формирующейся в поверхностном слое силумина заэвтектического состава, подвергнутого электровзрывному легированию оксидом иттрия и последующему облучению импульсным электронным пучком при плотности энергии пучка электронов 25 Дж/см^2

Стрелкой указана поверхность модифицирования

Fig. 2. Electron microscopic image of the structure of high-speed cellular crystallization formed in the surface layer of hypereutectic silumin exposed to electroexplosive alloying by yttrium oxide and subsequent irradiation by pulsed electron beam at an electron beam density of 25 J/cm^2

Modified surface is indicated by an arrow

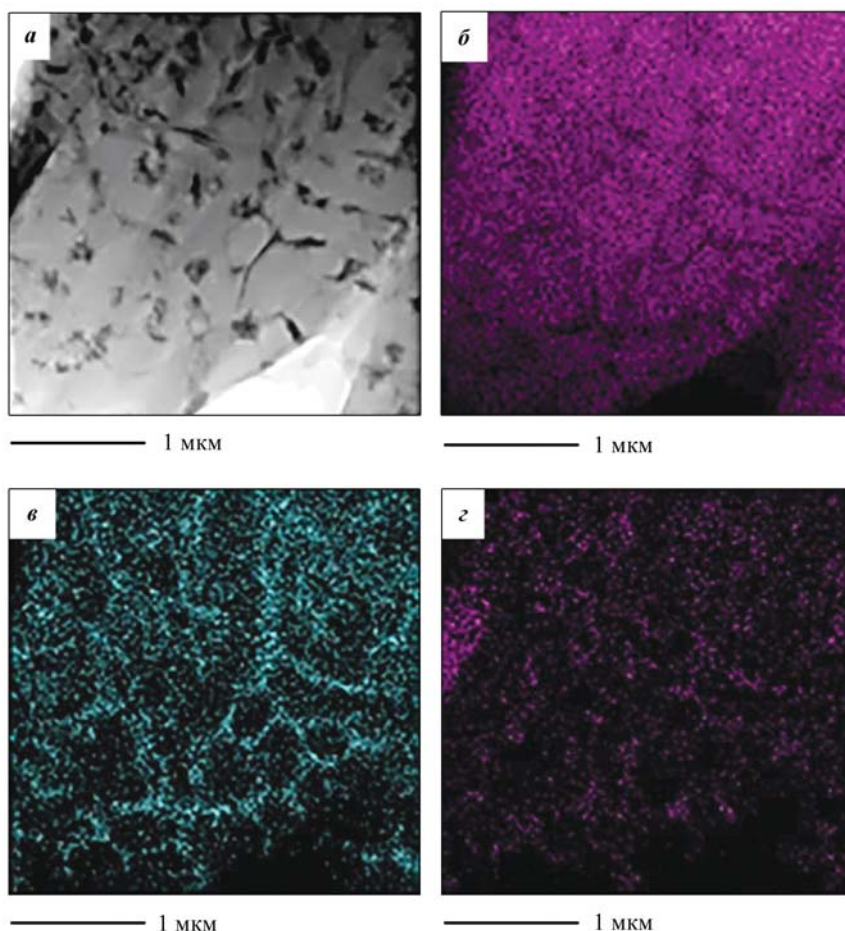


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя силумина, подвергнутого комплексной обработке (25 Дж/см^2) (а), и изображения участка фольги а, полученные в характеристическом рентгеновском излучении атомов алюминия (б), кремния (в), иттрия (г)

Fig. 3. Electron microscopic image of the structure of the silumin surface layer exposed to integrated treatment (25 J/cm^2) (а), and images of foil segment а, acquired in characteristic X-ray irradiation of aluminum (б), silicon (в), and yttrium (г) atoms

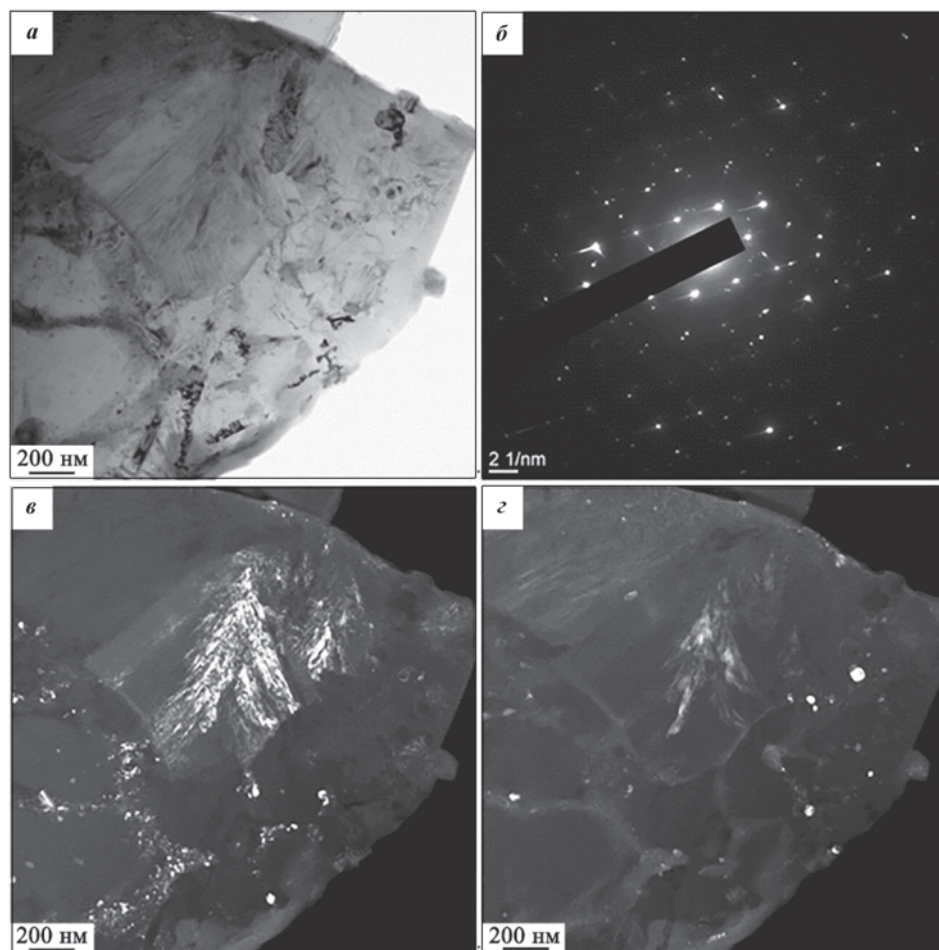


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры, формирующейся в поверхностном слое силумина заэвтектического состава, подвергнутого электровзрывному легированию оксидом иттрия и последующему облучению импульсным электронным пучком при плотности энергии пучка электронов 25 Дж/см²
a – светлое поле; *б* – микроэлектроннограмма; *в*, *г* – темные поля, полученные в рефlekсах [111] Si (*в*) и [022] Y₂SiO₅ (*г*)

Fig. 4. Electron microscopic image of structure formed in the surface layer of hypereutectic silumin exposed to electroexplosive alloying by yttrium oxide and subsequent irradiation by pulsed electron beam at an electron beam energy density of 25 J/cm²

a – light filed; *б* – electron diffraction pattern; *в*, *г* – dark fields acquired in reflections [111] Si (*в*) and [022] Y₂SiO₅ (*г*)

жены (в небольшом количестве) атомы кислорода, железа, титана и никеля, которые являются в исследуемом материале примесными атомами.

Особенностью структуры заэвтектического силумина, подвергнутого комплексной модификации, является наличие в поверхностном слое включений кремния, не растворившихся при высокоэнергетической обработке. Облучение модифицированной электровзрывным методом поверхности импульсным электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 25 Дж/см² приводит к формированию во включениях кремния микродвойниковой структуры (рис. 4, *a*, *в*). При этом сами включения кремния сохраняют

ограниченную форму, характерную для включений литого силумина. Одновременно с этим рис. 4 демонстрирует формирование прослоек силумина, располагающихся вдоль границ ячеек кристаллизации алюминия и имеющих нанокристаллическое (10–15 нм) строение (рис. 4, *в*), а также присутствие частиц оксисилицидов иттрия (рис. 4, *г*).

Облучение силумина импульсным электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 35 Дж/см² приводит к формированию в сохранившихся включениях кремния нанокристаллической структуры (9–30 нм); включения приобретают округлую (глобулярную) форму

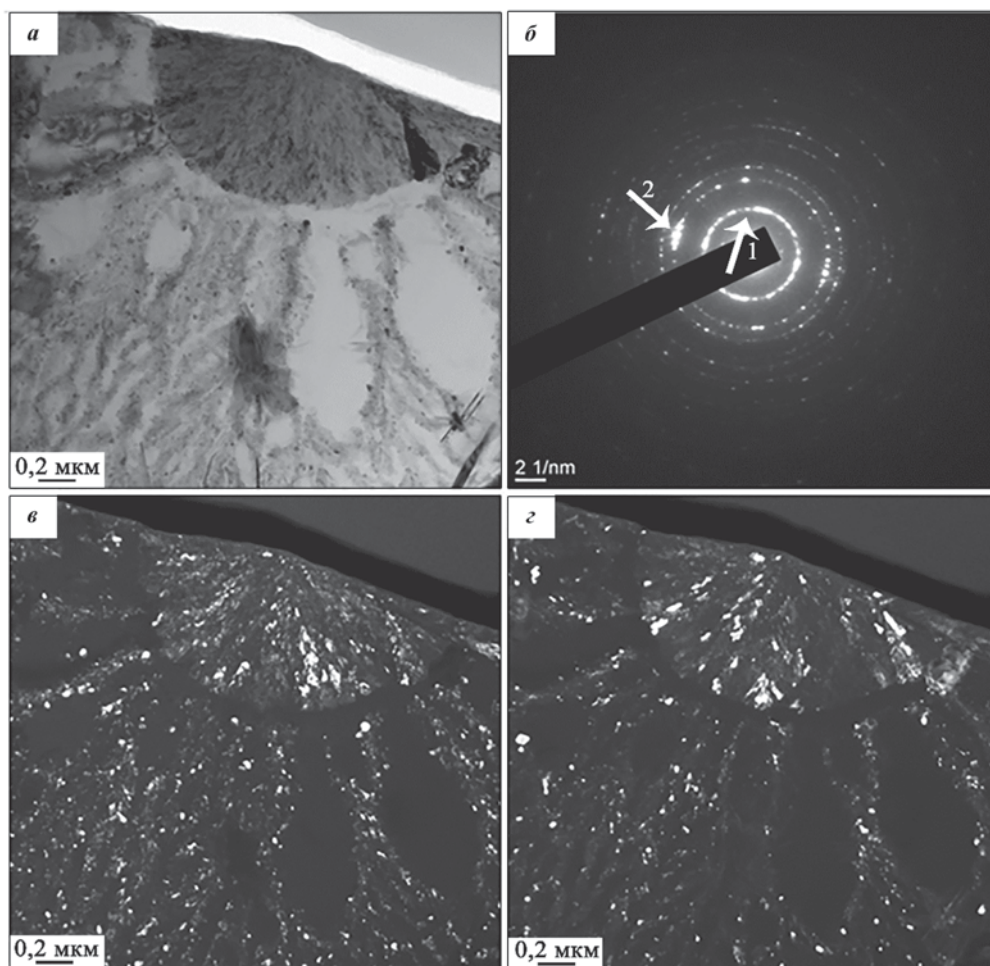


Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение структуры, формирующейся в поверхностном слое силумина заэвтектического состава, подвергнутого электровзрывному легированию оксидом иттрия и последующему облучению импульсным электронным пучком при плотности энергии пучка электронов 35 Дж/см^2
a – светлое поле; ***б*** – микроэлектроннограмма; ***в, г*** – темные поля, полученные в рефлексах ***1*** – $[111] \text{ Si}$ (***в***) и ***2*** – $[032] \text{ Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ (***г***)

Fig. 5. Electron microscopic image of the structure formed in the surface layer of hypereutectic silumin exposed to electroexplosive alloying by yttrium oxide and subsequent irradiation by pulsed electron beam at an electron beam energy density of 35 J/cm^2

a – light filed; ***б*** – electron diffraction pattern;
в, г – dark fields acquired in reflections $[111] \text{ Si}$ (***в***) and $[032] \text{ Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ (***г***)

(рис. 5). Как и в случае, представленном на рис. 4, частичное растворение включений кремния и последующая высокоскоростная кристаллизация поверхностного слоя сопровождаются формированием ячеистой структуры с выделениями наноразмерных частиц кремния и оксисилицидов иттрия по границам ячеек (рис. 5, *в, г*).

Совокупность полученных результатов позволяет предположить, что многократное увеличение износостойкости силумина, подвергнутого комплексной обработке (как относительно силумина в литом состоянии, так и относительно эвтектиче-

ского силумина, модифицированного подобным образом), обусловлено, в том числе, присутствием в поверхностном слое не растворившихся при модифицировании включений кремния, окруженных структурой высокоскоростной ячеистой кристаллизации.

Выводы

1. Комплексная обработка, сочетающая в себе электровзрывное легирование с последующим импульсным облучением электронным пуч-

ком при плотности энергии пучка электронов 25 Дж/см^2 , сопровождается повышением параметра износа модифицированных образцов в $7,9 \pm \pm 0,6$ раза и снижением коэффициента трения в $1,7 \pm 0,15$ раза относительно силумина в исходном состоянии. Микротвердость поверхностного слоя силумина возрастает (относительно исходного состояния) в $1,5 \pm 0,12$ раза.

2. Облучение образцов с плотностью энергии пучка электронов 35 Дж/см^2 приводит к увеличению параметра износа силумина в $2,1 \pm 0,21$ раза и коэффициента трения в $1,13 \pm 0,1$ раза, а также к снижению микротвердости в $1,3 \pm 0,13$ раза (относительно образцов, модифицированных при плотности энергии пучка электронов 25 Дж/см^2).

3. Высказано предположение, что многократное увеличение параметра износа силумина, подвергнутого комплексной обработке (как относительно силумина в литом состоянии, так и относительно эвтектического силумина, модифицированного подобным образом), обусловлено присутствием в поверхностном слое не растворившихся при модифицировании включений кремния, окруженных структурой высокоскоростной ячеистой кристаллизации.

Список литературы/References

1. Tutunchilar S., Besharati Givi M.K., Haghpanahi M., Asadi P. Eutectic Al—Si piston alloy surface transformed to modified hypereutectic alloy via FSP. *Materials Science and Engineering: A*. 2012;534:557—567. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.12.008>
2. Mohamed A.M.A., Samuel A.M., Samuel F.H., Doty H.W. Influence of additives on the microstructure and tensile properties of near-eutectic Al—10.8%Si cast alloy. *Materials & Design*. 2009;30(10):3943—3957. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.05.042>
3. Li Q., Xia T., Lan Y., Li P., Fan L. Effects of rare earth Er addition on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al—20% Si alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2013;588:97—102. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.09.017>
4. Chen M., Meng-Burany X., Perry T.A., Alpas A.T. Micromechanisms and mechanics of ultra-mild wear in Al—Si alloys. *Acta Materialia*. 2008;56(19):5605—5616. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2008.07.043>
5. Chen M., Alpas A.T. Ultra-mild wear of a hypereutectic Al—18.5wt.%Si alloy. *Wear*. 2008;265(1-2):186—195. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.10.002>
6. Cao F., Jia Y., Prashanth K.G., Ma P., Liu J., Scudino S., Huang F., Eckert J., Sun J. Evolution of microstructure and mechanical properties of as-cast Al—50Si alloy due to heat treatment and P modifier content. *Materials & Design*. 2015;74:150—156. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.03.008>
7. Li Q., Xia T., Lan Y., Zhao W., Fan L., Li P. Effect of in situ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ particles on the microstructure of hypereutectic Al—20%Si alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2013;577:232—236. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.04.043>
8. Wenhai P., Shengzhi H., Jun C., Wei L., Limin Z., Jun D. Surface composite microstructure and improved mechanical property of YG10X cemented carbide induced by high current pulsed electron beam irradiation. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2019;78:233—239. <https://doi.org/10.1016/j.jirmhm.2018.09.016>
9. Hangyu Y., Yuyong C., Xiaopeng W., Fantao K. Effect of beam current on microstructure, phase, grain characteristic and mechanical properties of Ti—47Al—2Cr—2Nb alloy fabricated by selective electron beam melting. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;750: 617—625. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.343>
10. Wei J., Langping W., Xiaofeng W. Studies on surface topography and mechanical properties of TiN coating irradiated by high current pulsed electron beam. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2018;436: 63—67. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2018.09.003>
11. Zou J., Qin Y., Dong C., Wang X., Almin W., Hao S. Numerical simulation of the thermal-mechanical process of high current pulsed electron beam treatment. *Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces and Films*. 2004;22(3):545—552. <https://doi.org/10.1116/1.1697481>
12. Gao B., Hao Y., Zhuang W.F., Tu G.F., Shi W.X., Li S.W., Hao S.Z., Dong C., Li M.C. Study on continuous solid solution of Al and Si elements of a high current pulsed electron beam treated hypereutectic Al—17.5Si alloy. *Physics Procedia*. 2011;18:187—192. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.06.079>
13. Gao B., Hu L., Li S., Hao Y., Zhang Y., Tu G., Grosdidier T. Study on the nanostructure formation mechanism of hypereutectic Al—17.5Si alloy induced by high current pulsed electron beam. *Applied Surface Science*. 2015;346:147—157. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.04.029>
14. Hu L., Gao B., Lv J.K., Hao Y., Tu G.F., Hao S.Z., Dong C. The metastable structure of hypereutectic Al—17.5Si alloy surface induced by high current pulsed electron beam. *Materials Research Innovations*. 2015;19: S5320—S5324. <https://doi.org/10.1179/1432891714Z.0000000001102>

15. Hao Y., Gao B., Tu G.F., Cao H., Hao S.Z., Dong C. Surface modification of Al–12.6Si alloy by high current pulsed electron beam. *Applied Surface Science*. 2012;258:2052–2056.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.04.104>
16. Xia H., Zhang C., Lv P., Cai J., Jin Y., Guan Q. Surface alloying of aluminum with molybdenum by high-current pulsed electron beam. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2018;416:9–15.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.11.028>
17. Tomus D., Qian M., Brice C.A., Muddle B.C. Electron beam processing of Al–2Sc alloy for enhanced precipitation hardening. *Scripta Materialia*. 2010;63(2): 151–154.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.03.039>
18. Bo G., Ning X., Pengfei X. Shock wave induced nanocrystallization during the high current pulsed electron beam process and its effect on mechanical properties. *Materials Letters*. 2019;237:180–184.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.11.054>
19. Zaguliaev D., Gromov V., Rubannikova Yu., Kononov S., Ivanov Yu., Romanov D., Semin A. Structure and phase states modification of Al–11Si–2Cu alloy processed by ion-plasma jet and pulsed electron beam. *Surface and Coatings Technology*. 2020;383:125246.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125246>
20. Zaguliaev D., Kononov S., Ivanov Yu., Gromov V., Petrikova E. Microstructure and mechanical properties of doped and electron-beam treated surface of hypereutectic Al–11.1%Si alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019;8(5):3835–3842.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.045>
21. Zaguliaev D., Kononov S., Ivanov Yu., Gromov V. Effect of electron-plasma alloying on structure and mechanical properties of Al–Si alloy. *Applied Surface Science*. 2019;498:143767.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.143767>
22. Белов Н.А., Савченко С.В., Хван А.В. Фазовый состав и структура силуминов. М.: МИСИС, 2008. 282 с.
23. Громов В.Е., Загуляев Д.В., Иванов Ю.Ф., Коновалов С.В., Невский С.А., Сарычев В.Д., Будовских Е.А., Рубанникова Ю.А. Структура и упрочнение силумина, модифицированного электронно-ионной плазмой. Новокузнецк: Изд центр СибГИУ, 2020. 284 с.

Информация об авторах

Юлия Андреевна Шлярова — аспирант кафедры естественно-научных дисциплин Сибирского государственного индустриального университета (СибГИУ), научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений СибГИУ.
<https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>
E-mail: rubannikova96@mail.ru

Виталий Владиславович Шляров — аспирант кафедры естественно-научных дисциплин СибГИУ, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений СибГИУ.
<https://orcid.org/0000-0001-8130-648X>
E-mail: shlyarov@mail.ru

Дмитрий Валерьевич Загуляев — д.т.н., зам. начальника управления научных исследований СибГИУ.
<https://orcid.org/0000-0002-9859-8949>
E-mail: zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru

Юрий Федорович Иванов — д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник Института сильноточной электроники СО РАН.
<https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>
E-mail: yufi55@mail.ru

Виктор Евгеньевич Громов — д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественно-научных дисциплин СибГИУ.
<https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>
E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Information about the authors

Yuliya A. Shliarova — Postgraduate Student of the Department of Natural Science Disciplines of Siberian State Industrial University (SibSIU), Researcher of the Laboratory of electron microscopy and image processing of SibSIU.
<https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>
E-mail: rubannikova96@mail.ru

Vitaliy V. Shlyarov — Postgraduate Student of SibSIU, Researcher of the Laboratory of electron microscopy and image processing of SibSIU.
<https://orcid.org/0000-0001-8130-648X>
E-mail: shlyarov@mail.ru

Dmitriy V. Zaguliaev — Dr. Sci. (Eng.). Deputy Head of Scientific Research Department of SibSIU.
<https://orcid.org/0000-0002-9859-8949>
E-mail: zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru

Yuriy F. Ivanov — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Chief Researcher of the Institute of High-Current Electronics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.
<https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>
E-mail: yufi55@mail.ru

Viktor E. Gromov — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Department of Natural Science Disciplines of SibSIU.
<https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>
E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Вклад авторов

Ю.А. Шлярова — формирование основной концепции, постановка цели и задачи исследования, подготовка текста.

В.В. Шляров — подготовка экспериментов, проведение экспериментов, обзор литературы.

Д.В. Загуляев — научное руководство, корректировка текста, корректировка выводов.

Ю.Ф. Иванов — проведение электронно-микроскопических исследований, анализ результатов.

В.Е. Громов — концепция работы, анализ ПЭМ-изображений, подготовка текста, формулировка выводов.

Contribution of the authors

Yu.A. Shliarova — formulation of the main concept, goal, and objectives of the study, manuscript writing.

V.V. Shlyarov — experiment preparation, experiment execution, literature review.

D.V. Zaguliaev — scientific guidance, manuscript revision, and results analysis.

Yu.F. Ivanov — electron microscopic studies, results analysis.

V.E. Gromov — work concept, TEM images analysis, manuscript writing, conclusions formulation.

Статья поступила в редакцию 03.02.2023, доработана 25.05.2023, подписана в печать 30.05.2023

The article was submitted 03.02.2023, revised 25.05.2023, accepted for publication 30.05.2023