

УДК 669/713-048/25

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ МОДИФИКАЦИИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА ИНТЕНСИВНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Рыгина М.Е. *, Петрикова Е.А. **, Тересов А.Д. ***, Иванов Ю.Ф. ****

*Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук,
ИСЭ СО РАН, Академический просп., 2/3, Томск, 634055, Россия*

** e-mail: l-7755me@mail.ru*

*** e-mail: petrikova@opee.hcei.tsc.ru*

**** e-mail: tad514@yandex.ru*

***** e-mail: yufi55@mail.ru*

Силумины заэвтектического состава в литом состоянии характеризуются высоким уровнем пористости, наличием крупных включений кремния и интерметаллидов, что существенно сужает сферу использования данного материала в промышленности. Для устранения указанных недостатков облучали в вакууме образцы заэвтектического силумина (Al-(20-22) вес. % Si) интенсивным импульсным электронным пучком в режиме плавления поверхностного слоя. Показано, что высокоскоростное плавление и последующая высокоскоростная кристаллизация приводят к формированию беспористого поверхностного слоя толщиной до 100 мкм, свободного от первичных включений кремния и интерметаллидов, имеющего структуру ячеистой кристаллизации. Размер ячеек, образованных твердым раствором на основе алюминия, (0,4–0,6) мкм. Ячейки разделены прослойками второй фазы с поперечным размером частиц до 100 нм. Установлено, что формирование многофазной субмикронанокристаллической структуры сопровождается увеличением микротвердости силумина в 4,5 раза, износостойкости — в 1,2 раза по сравнению с литым состоянием.

Ключевые слова: заэвтектический силумин, интенсивный импульсный электронный пучок, фазовый состав, структура, твердость, износостойкость.

Введение

Силумин — сплав алюминия с кремнием. Сплавы, содержащие более 13 % Si и состоящие из первичных кристаллов кремния, интерметаллидов и эвтектики, относятся к заэвтектическим [12]. Силумины благодаря высоким удельным характеристикам, отличной жидкотекучести, хорошей корро-

зионной стойкости и другим эксплуатационным свойствам, нашли широкое применение в авиационной и автомобильной промышленности, приборостроении и строительной индустрии, кораблестроении и т.д. [1–3]. Ограничение на дальнейшее расширение сферы использования силуминов, особенно заэвтектического состава, связано с наличием

в структуре грубых включений кремния и интерметаллидов, размеры которых могут достигать сотен микрометров, присутствием микропор, что существенно снижает механические свойства материала [1–3]. Традиционно устранение данных недостатков осуществляется модифицированием расплава силумина [4–7]. В последнее время интенсивно развиваются получили методы модифицирования сплавов на основе алюминия, в том числе и силумина, в твердом состоянии физико-механическими методами [8–10] и методами, в основе которых использование концентрированных потоков энергии [11–20].

Целью настоящей работы является анализ целесообразности применения интенсивного импульсного электронного пучка для модификации структуры и свойств силумина заэвтектического состава.

Материал и методика исследования

В качестве материала исследования был использован силумин заэвтектического состава (Al-(20-24) вес. % Si), находящийся в литом состоянии. Форма образцов — цилиндр высотой 5 мм, диаметром 30 мм. Модифицирование силумина осуществляли облучением поверхности образцов интенсивным импульсным электронным пучком (установка «СОЛО», ИСЭ СО РАН) [21]. Облучение осуществляли в остаточной атмосфере аргона при давлении 0,02 Па при следующих параметрах: 18 кэВ; 40 Дж/см²; 200 мкс; 0,3 с⁻¹; 20 имп. Выбор режима электронно-пучковой обработки основывался на результатах моделирования температурного поля, формирующегося в поверхностном слое силумина [21]. Теплофизические характеристики материала были взяты из [22].

Исследования элементного состава и состояния дефектной субструктуры силумина в исходном состоянии и после модифицирования интенсивным импульсным электронным пучком осуществляли методами сканирующей электронной микроскопии (прибор SEM-515 Philips); фазовый состав материала определяли методами рентгеноструктурного анализа (дифрактометр XRD 6000, съемка осуществлялась в медном отфильтрованном излучении Cu-K α 1; монохроматор CM-3121); состояние дефектной субструктуры анализировали методами просвечивающей электронной микроскопии (прибор JEM 2100F); микротвердость образцов в исходном и модифицированном состояниях определяли на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 0,1 Н; параметр износа и коэффициент трения выявляли на трибометре TRIBOtechnic.

Результаты исследования и их обсуждение

Структура силумина заэвтектического состава в исходном состоянии характеризуется наличием включений первичного кремния преимущественно пластинчатой формы, размеры которых (продольные) достигают 100 мкм (рис. 1,а). Наряду с пластинами кремния выявляются включения интерметаллидных фаз (рис. 1,б). Явным недостатком заэвтектического силумина в литом состоянии является наличие пор микронных и субмикронных размеров. Твердость образцов силумина в исходном состоянии составила 970 МПа.

Элементный состав силумина изучали методами микрорентгеноспектрального анализа. Результаты исследований представлены на рис. 2.

Рентгеноструктурный анализ (участок рентгенограммы представлен на рис. 3) выявил в литом силумине наличие двух основных фаз — твердого

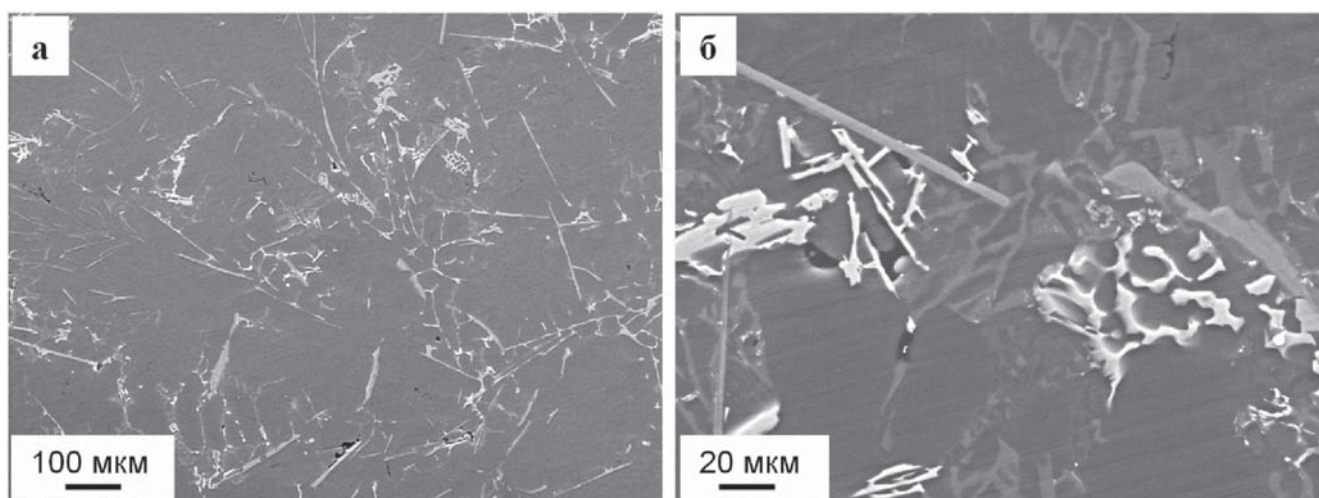


Рис. 1. Структура заэвтектического силумина в литом состоянии (а); изображение получено методами сканирующей электронной микроскопии (б)

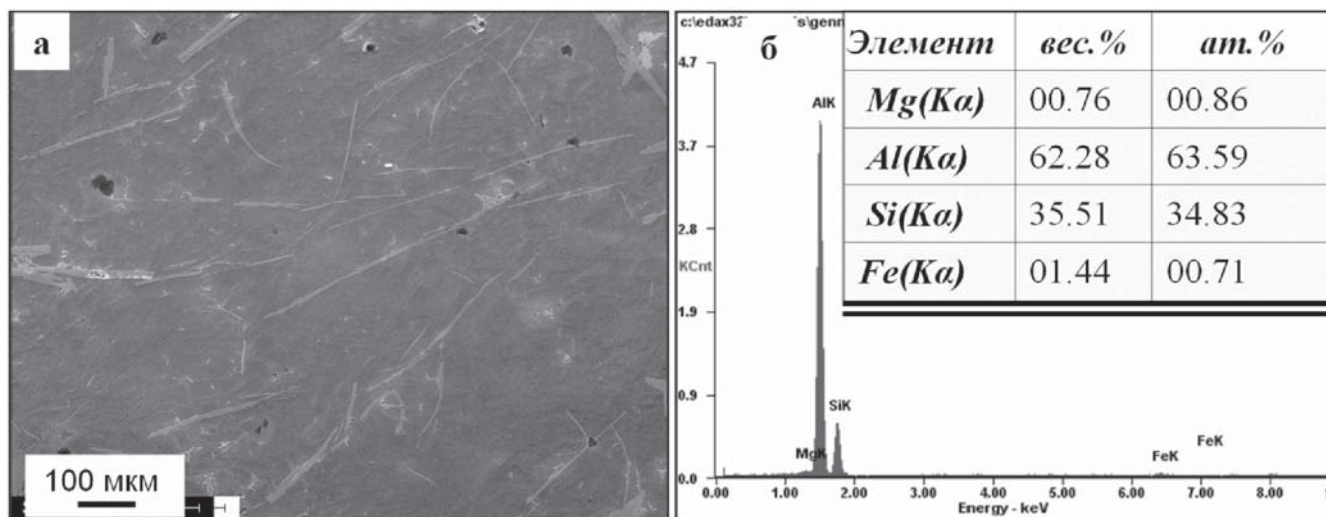


Рис. 2. Структура поверхности литого силумина (а); результаты микрорентгеноспектрального анализа участка (б)

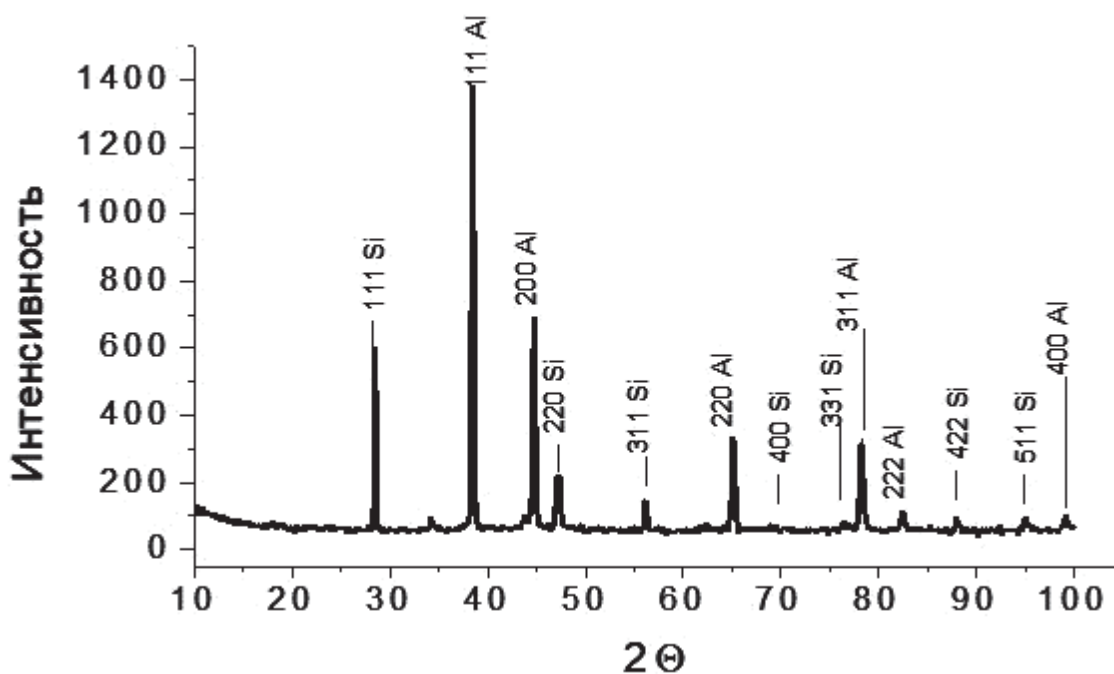


Рис. 3. Участок рентгенограммы силумина заэвтектического состава в литом состоянии

раствора на основе алюминия и твердого раствора на основе кремния. Дополнительными фазами исследуемого силумина являются интерметаллиды и оксиды. Анализ рентгенограмм выявил наличие низкоинтенсивных дифракционных максимумов фаз $Mg_{0.54}Fe_{0.46}SiO_3$, $Al_{0.83}Mg_{0.17}$, MgO , NiO и $(Ni, Mg)O$.

Облучение образцов силумина осуществляли, как показали выполненные ранее расчеты температурного поля [21], в режиме плавления всех присутствующих в материале фаз (18 кэВ; 40 Дж/см²; 200 мкс; 0,3 с⁻¹; 20 имп.). На рис. 4,а приведена микрофотография поверхности образца, обработанного интенсивным импульсным электронным пуч-

ком. Размеры кристаллов, которые составляют структуру поверхностного слоя, изменяются в пределах (0,4...0,6 мкм) (рис. 4,б). Микрорентгеноспектральный анализ показывает, что концентрация кремния в поверхностном слое изменяется в пределах (10...12) ат. %, что соответствует составу эвтектики сплава Al-Si (рис. 5,а,б).

Анализ поперечного травленного шлифа выявил формирование многослойной структуры (рис. 6). Глубина модифицированного слоя (слоя, в котором отсутствуют микропоры, грубые включения кремния и интерметаллидов) достигает 100 мкм (рис. 6,а). Модифицированный слой имеет глобулярную структуру; размер глобул 2—4 мкм

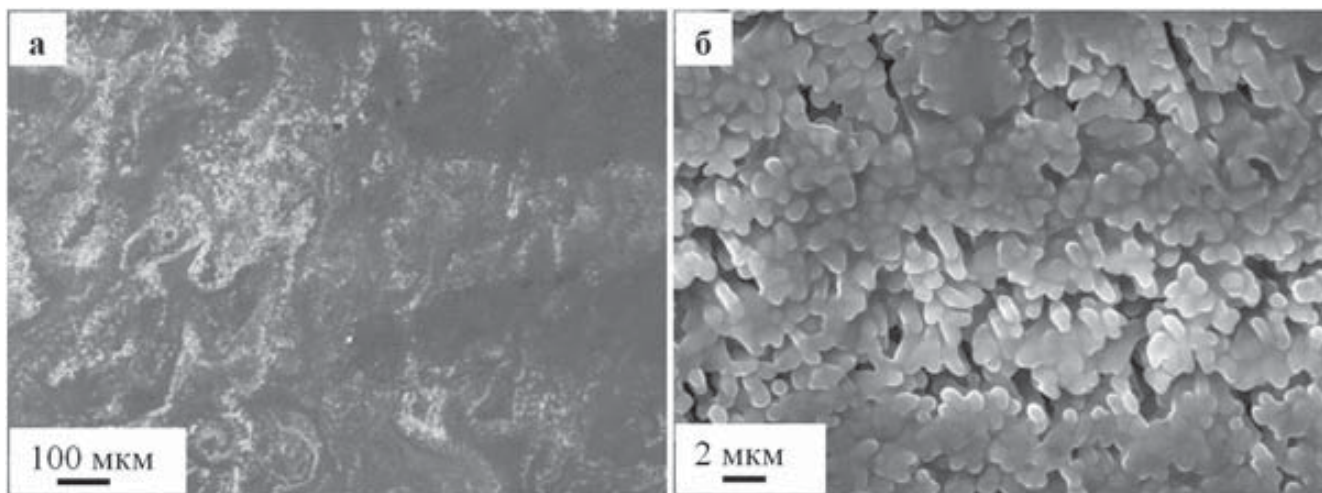


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности литого силумина, облученного интенсивным импульсным электронным пучком

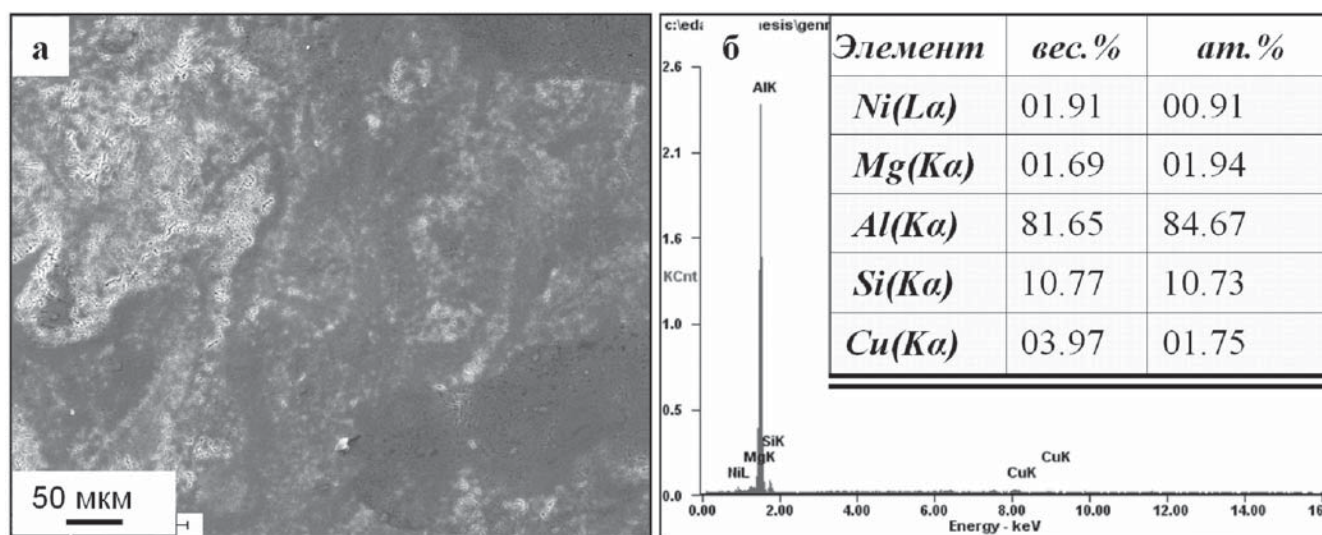


Рис. 5. Структура поверхности литого силумина (а); результаты микрорентгеноспектрального анализа участка (б)

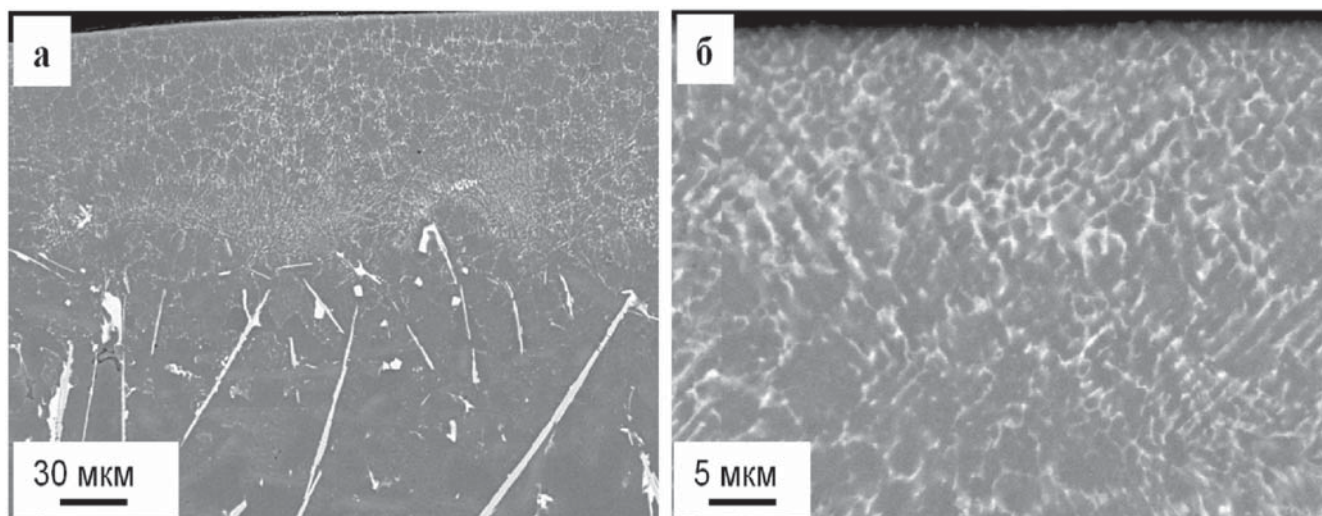


Рис. 6. Структура поперечного сечения заэвтектического силумина, облученного интенсивным импульсным пучком электронов

(рис. 6, б). По границам глобул наблюдаются выделения второй фазы.

На рис. 7 представлен участок рентгенограммы заэвтектического силумина, подвергнутого облучению интенсивным импульсным электронным пучком. Анализ рентгенограммы выявил, наряду с алюминием и кремнием, присутствие следующих фаз: 5-6 масс.% $Mg_{0.54}Fe_{0.46}SiO_3$ и 3-5 масс.% $Al_{0.83}Mg_{0.17}$.

Фазовый состав и состояние дефектной субструктуры силумина, облученного электронным пучком, анализировали методами электронной

микроскопии тонких фольг на просвет. Фольги готовили методом ионного распыления пластинки, вырезанной в поперечном сечении объемного образца. Характерные изображения структуры модифицированного слоя, полученные данным методом, представлены на рис. 8.

Анализируя результаты, представленные на этом рисунке, можно отметить, что поверхностный слой имеет ячеистую структуру высокоскоростной кристаллизации (рис. 8, а). Размер ячеек изменяется в пределах до 600 нм. Ячейки разделены прослойками второй фазы, толщина которых изменяется в

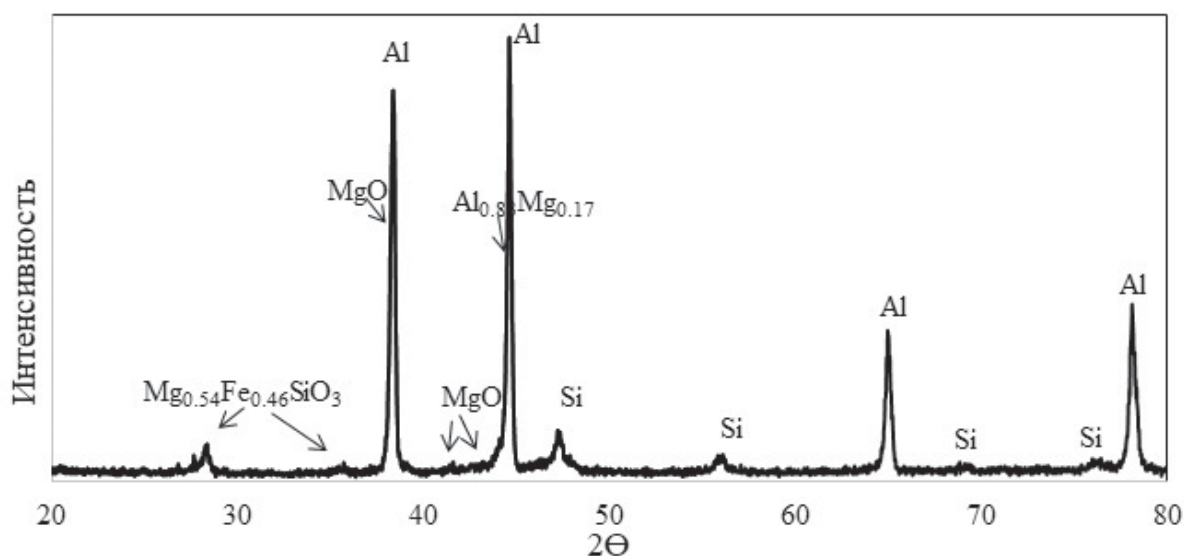


Рис. 7. Участок рентгенограммы силумина заэвтектического состава, облученного интенсивным импульсным электронным пучком

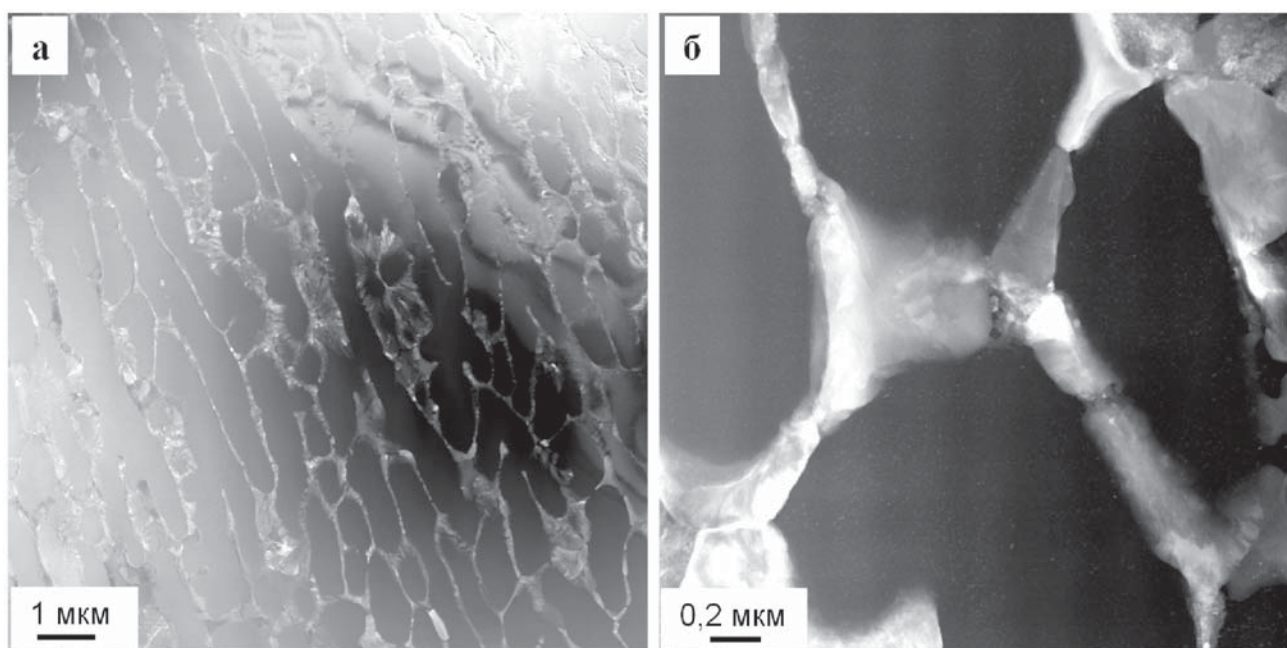


Рис. 8. Электронно-микроскопическое изображение структуры слоя силумина, примыкающего к поверхности облучения интенсивным импульсным электронным пучком. Просвечивающая электронная микроскопия поперечной фольги

пределах до 100 нм; в стыках ячеек толщина прослоек может достигать 500 нм (рис. 8, б).

Элементный состав поверхностного слоя силумина, облученного интенсивным импульсным электронным пучком, анализировали методами микрорентгеноспектрального анализа тонкой фольги (рис. 9). Выполненные исследования показали, что ячейки образованы твердым раствором на основе алюминия; прослойки, их разделяющие, обогащены атомами кремния, меди, никеля и железа.

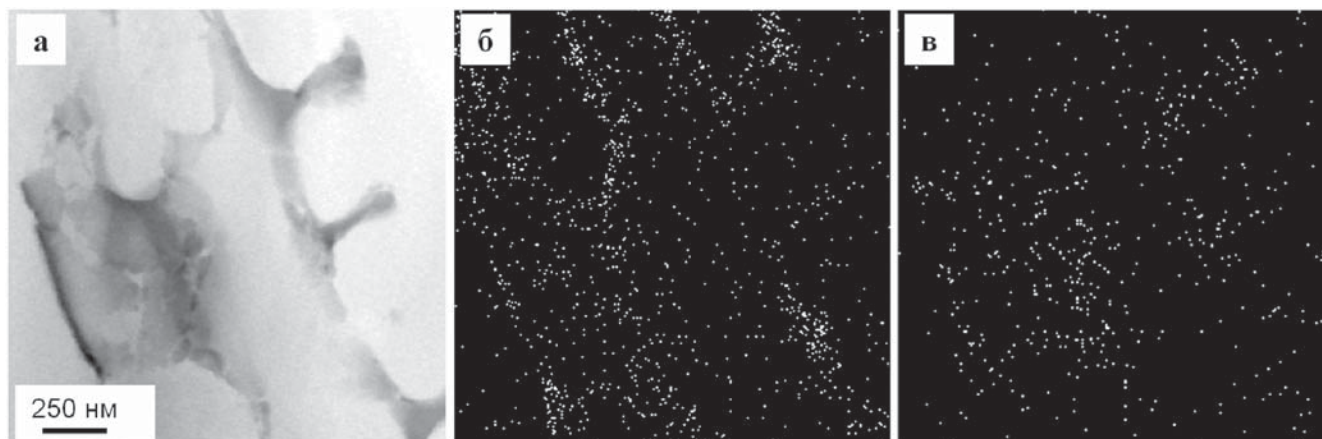


Рис. 9. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя силумина, облученного электронным пучком (а) и результаты картирования элементного состава (б, в), полученные с данного участка фольги (изображение, полученное в рентгеновском излучении атомов кремния (б) и атомов меди (в))

Модифицирование структуры поверхностного слоя заэвтектического силумина интенсивным импульсным электронным пучком сопровождается увеличением микротвердости поверхностного слоя в ~4,5 раза (4400 МПа), износостойкости в ~1,2 раза относительно материала в исходного состоянии.

Выводы

Методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии установлено, что облучение заэвтектического силумина интенсивным импульсным электронным пучком приводит в результате высокоскоростного плавления и кристаллизации к формированию многослойной структуры, поверхностный слой которой толщиной до 100 мкм свободен от первичных включений кремния и интерметаллидов и имеет структуру ячеистой кристаллизации. Ячейки кристаллизации (твердый раствор на основе алюминия) разделены прослойками второй фазы нано- и субмикронных размеров, обогащенными легирующими элементами (кремний, медь, никель, железо). Методами рентгеноструктурного анализа выявлено присутствие в модифицированном поверхностном слое твердых растворов на основе алюминия и кремния, частиц алюминидов и силицидов. Показано, что облучение

заэвтектического силумина интенсивным импульсным электронным пучком сопровождается кратным увеличением микротвердости и износостойкости поверхностного слоя материала. Полученные в настоящей работе результаты позволяют предположить, что интенсивный импульсный электронный пучок может быть использован для повышения прочностных и трибологических свойств не только силуминов, но и многих других материалов.

Авторы выражают благодарность академику А.П. Ласковневу (ФТИ НАН Беларуси, Минск) и профессору В.В. Углову (БГУ, Минск), предоставившим образцы заэвтектического силумина.

Библиографический список

1. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. — М.: Металлургия, 1979. — 640 с.
2. Белов Н.А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов. — М.: Издательский дом МИСиС, 2010. — 509 с.
3. Курдюмов А.В., Пикунев М.В., Чурсин В.М., Бибииков Е.Л. Производство отливок из сплавов цветных металлов: Учебник для вузов. — М.: Металлургия, 1986. — 416 с.
4. Агафонов Р.Ю., Вилков Ф.Е., Касицын А.Н., Предко П.Ю., Марченков А.Ю. Применение в ракетно-космической технике сплавов на основе алюминия с добавками редкоземельных металлов // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 4. С. 174-180.
5. Шляпцева А.Д., Петров И.А., Ряховский А.П., Моисеев В.С. Комплексное влияние модифицирующих добавок на структуру и механические свойства сплава АК12 // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. №3. С. 175-181.

6. *Makhloufe M.M., Guthy H.V.* The aluminum-silicon eutectic reaction: mechanisms and crystallography // *Journal of Light Metals*. 2001. Vol. 1. No. 4, pp. 199-218. DOI: 10.1016/S1471-5317(02)00003-2
7. *Paramo V., Colas R., Velasco E., Valtierra S.* Spheroidization of the Al-Si Eutectic in a Cast Aluminum Alloy // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2000. Vol. 9. No. 6, pp. 616-622. DOI: 10.1361/105994900770345467
8. *Калугина М.С., Ремшев Е.Ю., Данилин Г.А., Воробьева Г.А., Тельнов А.К.* Способ упрочнения легких сплавов аэротермоакустической обработкой в авиа- и ракетостроении // *Вестник Московского авиационного института*. 2018. Т. 25. № 2. С. 230-239.
9. *Воронин С.В., Лобода П.С., Ледаев М.Е.* Определение оптимальной пористой структуры с целью повышения удельных механических свойств алюминиевого сплава // *Вестник Московского авиационного института*. 2016. Т. 23. № 4. С. 164-173.
10. *Комков В.А., Кокорева О.Г., Курсаков А.В.* Исследование возможностей упрочнения поверхностей тонкостенных элементов летательных аппаратов методом поверхностной пластической деформации // *Вестник Московского авиационного института*. 2015. Т. 22. № 2. С. 132-136.
11. *Углов В.В.* Структурно-фазовые превращения в алюминии, железе и его сплавах при комбинированных ионных и плазменных воздействиях: Дисс. ... докт. физ.-мат. наук. — Минск: БГУ, 2006. — 278 с.
12. *Ласковнев А.П., Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А.* и др. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой: Монография. — Минск: Белорусская наука, 2013. — 287 с.
13. *Rotshtein V., Ivanov Yu., and Markov A.* Surface treatment of materials with low-energy, high-current electron beams // *Materials surface processing by directed energy techniques*. Ed. by Y. Pauleau. — Elsevier Science, 2006. Ch. 6, pp. 205-240. DOI: 10.1016/B978-008044496-3/50007-1
14. *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. Vol. 258. No. 6, pp. 2052-2056. DOI: 10.1016/j.apsusc.2011.04.104
15. *Gao B., Hao Y., Wang Z., Tu G.-F., Shi W.-X., Li S.-W., Hao S.-Z., Dong C.* High current pulsed electron beam treatment of hypereutectic Al-17.5Si alloy // *Transactions of Materials and Heat Treatment*. 2010. Vol. 31. No. 9, pp. 115-118.
16. *Hao Y., Gao B., Tu G.F., Wang Z., Hao C.Z.* Influence of high current pulsed electron beam (HCPEB) treatment on wear resistance of hypereutectic Al-17.5Si and Al-20Si Alloys // *Materials Science Forum*. 2011. Vol. 675-677, pp. 693-696. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.675-677.693
17. *Zagulyaev D., Konovalov S., Gromov V., Glezer A., Ivanov Yu., Sundeev R.* Structure and properties changes of Al-Si alloy treated by pulsed electron beam // *Materials Letters*. 2018. Vol. 229, pp. 377-380. DOI: 10.1016/j.matlet.2018.07.064
18. *Dzjadon A., Mola R. and Blaz L.* The microstructure of the surface layer of magnesium laser alloyed with aluminum and silicon // *Materials Characterization*. 2016. Vol. 118, pp. 505-513. DOI: 10.1016/j.matchar.2016.06.034
19. *Maryam S. and Bashir F.* Effect of laser irradiation on surface hardness and structural parameters of 7178 aluminium alloy // *Materials Research Express*. 2018. Vol. 5. No. 4. DOI: 10.1088/2053-1591/aabb3d
20. *Hao Y., Gao B., Tu G.-F., Shi W.-X., Li S.-W., Hao S.-Z., Dong C.* Effect of HCPEB treatment on microstructure and microhardness of hypereutectic Al-20Si alloy // *Transactions of Materials and Heat Treatment*. 2010. Vol. 31. No. 9, pp. 142-145.
21. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов / Под общ. ред. Н.Н. Ковалея и Ю.Ф. Иванова. — Томск: Изд-во НТЛ, 2016. — 308 с.
22. *Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М.* и др. Физические величины. Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.

STUDYING THE POSSIBILITY OF HYPEREUTECTIC SILUMIN SURFACE LAYER STRUCTURE AND PROPERTIES MODIFICATION BY INTENSE PULSED ELECTRON BEAM

Rygina M.E.*, Petrikova E.A.**, Teresov A.D.***, Ivanov Yu.F.****

*Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
IHCE SB RAS, 2/3, Akademichesky av., Tomsk, 634055, Russia*

* e-mail: l-7755me@mail.ru

** e-mail: petrikova@opee.hcei.tsc.ru

*** e-mail: tad514@yandex.ru

**** e-mail: yufi55@mail.ru

Abstract

Silumins of the hypereutectic composition in the cast state are characterized by a high level of porosity, the presence of large silicon inclusions and intermetallics, which significantly reduces the range of this material application in industry. To eliminate these drawbacks, samples of hypereutectic silumin (Al- (20-22) wt% Si) were irradiated in vacuum with an intense pulsed electron beam in the surface layer melting mode. Irradiation of the surface of the silumin samples was performed by an intense pulsed electron beam ("SOLO" facility, HCEI SB RAS). The irradiation was performed in a residual argon atmosphere at a pressure of 0.02 Pa with the following parameters: 18 keV; 40 J/cm²; 200 μs; 0.3 c⁻¹; 20 pulses. The selected mode, as shown by the results of modeling the temperature field formed in the surface layer of silumin, results in the surface layer melting of the material up to 70 μm thickness. Investigations of the elemental and phase composition, the state of silumin defective substructure in the initial state, and after irradiation with an intense pulsed electron beam were performed using scanning electron microscopy (SEM-515 Philips) and transmission electron microscopy (JEM 2100F), X-ray diffraction (XRD 6000, imaging copper-filtered radiation of Cu-Kα1, monochromator CM-3121). The samples microhardness was being determined with the PMT-3 device with an indenter load of 0.1 N. The wear-out parameter and friction coefficient were being identified on a TRIBOtechnic tribometer. The results of the studies performed revealed that the high-speed melting and subsequent high-speed crystallization were led to a nonporous surface layer forming of up to 100 μm thickness with the structure of cellular crystallization free of primary inclusions of silicon and intermetallics.

The size of the cells of high-speed crystallization formed by a solid solution based on aluminum was 0.4-0.6 μm. The cells were separated by interlayers enriched with silicon, copper, nickel and iron atoms. The transverse size of the interlayers was up to 100 nm.

It was revealed that the nonporous surface layer formation with a multiphase submicro- nanocrystal structure was accompanied by an increase in the silumin microhardness by 4.5 times, and wear resistance by 1.2 times compared to the cast state.

Keywords: hypereutectic silumin, intensive pulsed electron beam, phase composition, structure, hardness, wear resistance.

References

1. Mondol'fo L.F. *Struktura i svoystva alyuminievykh splavov* (Structure and properties of aluminum alloys), Moscow, Metallurgiya, 1979, 640 p.
2. Belov N.A. *Fazovyyi sostav promyshlennykh i perspektivnykh alyuminievykh splavov* (Phase composition of industrial and advanced aluminum alloys), Moscow, MISiS, 2010, 509 p.
3. Kurdyumov A.V., Pikunov M.V., Chursin V.M., Bibikov E.L. *Proizvodstvo otlivok iz splavov tsvetnykh metallov* (Production of castings from non-ferrous metals alloys), Moscow, Metallurgiya, 1986, 416 p.
4. Agafonov R.Yu., Vilkov F.E., Kasitsyn A.N., Predko P.Yu., Marchenkov A.Yu. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 174-180.
5. Shlyaptseva A.D., Petrov I.A., Ryakhovskii A.P., Moiseev V.S. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 3, pp. 175-181.
6. Makhloufe M.M., Guthy H.V. The aluminum-silicon eutectic reaction: mechanisms and crystallography. *Journal of Light Metals*, 2001, vol. 1, no. 4, pp. 199-218. DOI: 10.1016/S1471-5317(02)00003-2
7. Paramo V., Colas R., Velasco E., Valtierra S. Spheroidization of the Al-Si Eutectic in a Cast Aluminum Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2000, vol. 9, no. 6, pp. 616-622. DOI: 10.1361/105994900770345467
8. Kalugina M.S., Remshev E.Yu., Danilin G.A., Vorob'eva G.A., Tel'nov A.K. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 230-239.
9. Voronin S.V., Loboda P.S., Ledyayev M.E. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 164-173.

10. Komkov V.A., Kokoreva O.G., Kursakov A.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, vol. 22, no. 2, pp. 132-136.
11. Uglov V.V. *Strukturno-fazovye prevrashcheniya v alyuminii, zheleze i ego splavakh pri kombinirovannykh ionnykh i plazmennyykh vozdeistviyakh* (Structural-phase transformations in aluminum, iron and its alloys under combined ion and plasma impacts), Doctor's thesis, Minsk, BGU, 2006, 278 p.
12. Laskovnev A.P., Ivanov Yu.F., Petrikova E.A. *Modifikatsiya struktury i svoystv evtekticheskogo silumina elektronno-ionno-plazmennoi obrabotkoi* (Modification eutectic silumin structure and properties by electron-ion-plasma treatment), Minsk, Beloruskaya nauka, 2013, 287 p.
13. Rotshtein V., Ivanov Yu. and Markov A. Surface treatment of materials with low-energy, high-current electron beams. In: *Materials surface processing by directed energy techniques*. Ed. by Y. Pauleau. Elsevier Science, 2006. Ch. 6, pp. 205-240. DOI: 10.1016/B978-008044496-3/50007-1
14. 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, vol. 258, no. 6, pp. 2052-2056. DOI: 10.1016/j.apsusc.2011.04.104
15. Gao B., Hao Y., Wang Z., Tu G.-F., Shi W.-X., Li S.-W., Hao S.-Z., Dong C. High current pulsed electron beam treatment of hypereutectic Al-17.5Si alloy. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2010, vol. 31, no. 9, pp. 115-118.
16. Hao Y., Gao B., Tu G.F., Wang Z., Hao C.Z. Influence of high current pulsed electron beam (HCPEB) treatment on wear resistance of hypereutectic Al-17.5Si and Al-20Si Alloys. *Materials Science Forum*, 2011, vol. 675-677, pp. 693-696. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.675-677.693
17. Zagulyaev D., Konovalov S., Gromov V., Glezer A., Ivanov Yu., Sundeev R. Structure and properties changes of Al-Si alloy treated by pulsed electron beam. *Materials Letters*, 2018, vol. 229, pp. 377-380. DOI: 10.1016/j.matlet.2018.07.064
18. Dziadoc A., Mola R. and Blaz L. The microstructure of the surface layer of magnesium laser alloyed with aluminum and silicon. *Materials Characterization*, 2016, vol. 118, pp. 505-513. DOI: 10.1016/j.matchar.2016.06.034
19. Maryam S. and Bashir F. Effect of laser irradiation on surface hardness and structural parameters of 7178 aluminium alloy. *Materials Research Express*, 2018, vol. 5, no. 4. DOI: 10.1088/2053-1591/aabb3d
20. Hao Y., Gao B., Tu G.-F., Shi W.-X., Li S.-W., Hao S.-Z., Dong C. Effect of HCPEB treatment on microstructure and microhardness of hypereutectic Al-20Si alloy. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2010, vol. 31, no. 9, pp. 142-145.
21. Koval' N.N., Ivanov Yu.F. *Elektronno-ionno-plazmennaya modifikatsiya poverkhnosti tsvetnykh metallov i splavov* (Electron-ion-plasma modification of non-ferrous metals and alloys surface), Tomsk, NTL, 2016, 308 p.
22. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovskii A.M. *Fizicheskie velichiny. Spravochnik* (Physical quantities. Handbook), Moscow, Energoatomizdat, 1991, 1232 p.

Редакторы М.С. Винниченко, Е.Л. Мочина
Художественное оформление В.И. Володиной, И.В. Романовой
Компьютерная верстка О.Г. Лавровой

Сдано в набор 20.09.18. Подписано в печать 27.11.18.
Бумага писчая. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 29,76. Уч.-изд. л. 32,00. Тираж 150 экз. Заказ 947/659.

Издательство МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993
Типография Издательства МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993