

**СТРУКТУРА ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА, ОБРАБОТАННОГО ИНТЕНСИВНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ**

**Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А., Толкачев О.С, Тересов А.Д.**

*Институт сильноточной электроники СО РАН,*

*г. Томск, Россия, E-mail: yufi55@mail.ru*

Структура силуминов и, прежде всего, форма и размеры зерен алюминия и кристаллов кремния в эвтектическом сплаве, завися от условий плавки и кристаллизации, оказывают существенное влияние на свойства материала [1]. Следовательно, управление структурой силуминов является одной из задач технологии их получения и последующего модифицирования. В работе [2] показано, что облучение силумина эвтектического состава высокоинтенсивным импульсным электронным пучком в режиме плавления приводит к формированию поверхностного слоя, микротвердость которого превышает микротвердость исходного материала более чем в 2 раза. Одновременно с этим облучение силумина высокоинтенсивным электронным пучком сопровождается увеличением предела прочности материала на изгиб в  $\approx 1,2$  раза и на растяжение в  $\approx 1,4$  раза. Предел пластичности увеличивается в  $\approx 1,2$  раза при испытаниях на изгиб и в  $\approx 1,8$  раза при испытаниях на растяжение. Очевидно, что выявленное в [2] изменение свойств силумина, облученного интенсивным импульсным электронным пучком, обусловлено модифицированием его структурно-фазового состояния.

Целью настоящей работы является исследование структурно-фазового состояния силумина эвтектического состава, подвергнутого поверхностной обработке интенсивным импульсным электронным пучком.

В качестве материала исследования использовали силумин марки АК12 (11.1 Si, 0.58 Mg, 2.19 Cu, 0.92 Ni, 0.25 Fe, 0.029 Mn, 0.047 Ti, 0.005 Cr, ост. Al (вес. %)). Образцы имели форму диска диаметром 15 мм и толщиной 5 мм. Облучение поверхности силумина осуществляли интенсивным импульсным электронным пучком на установке «СОЛО» [3] при следующих параметрах: энергия электронов 15 кэВ, плотность энергии пучка электронов 20 Дж/см<sup>2</sup>, длительность импульса пучка электронов 150 мкс, количество импульсов 3, частота следования импульсов 0,3 с<sup>-1</sup>. Исследования фазового состава силумина осуществляли методами рентгенофазового анализа (дифрактометр XRD-7000s, Shimadzu, Япония). Исследование элементного и фазового состава, дефектной субструктуры силумина осуществляли методами сканирующей (прибор Philips SEM 515, оснащенный микроанализатором EDAX ECON IV) и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (прибор JEM-2100F, JEOL, Япония). Фольги (объект исследования материала методами просвечивающей электронной микроскопии) изготавливали методами ионного утонения тонких (100 мкм) пластинок на приборе Ion Slicer EM 09100IS.

На рисунке 1 и в таблице 1 представлены результаты микрорентгеноспектрального анализа силумина перед облучением электронным пучком (исходное состояние), из анализа которых следует, что легирующие элементы сплава распределены в материале весьма неоднородно, формируя различные соединения, различающиеся не только составом, но и морфологией.

Фазовый состав силумина в исходном состоянии, выявленный методами рентгенофазового анализа, представлен твердым раствором на основе алюминия (86,7 отн. %), кремния (13,3 отн. %),

Морфологию и элементный состав силумина в исходном состоянии анализировали методами просвечивающей электронной микроскопии, используя приставку для энергодисперсионного микрорентгеноспектрального анализа (метод STEM). Результаты выполненных исследований приведены на рисунке 2 и рисунке 3.

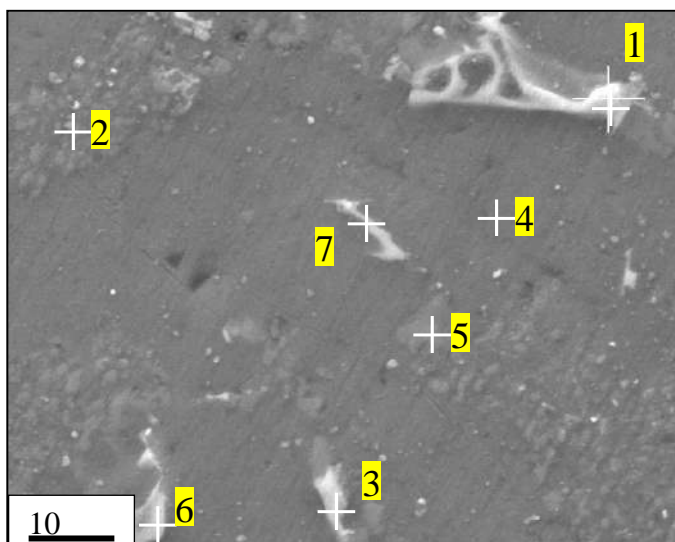


Рисунок 1 – Электронно-микроскопическое изображение структуры силумина в исходном состоянии; указаны области, в которых был выполнен микрорентгеноспектральный анализ элементного состава материала. Сканирующая электронная микроскопия.

Таблица 1 – Результаты микрорентгеноспектрального анализа участка поверхности силумина АК12, электронно-микроскопическое изображение которого представлено на рисунке 1

| Область | Элемент (остальное Al, вес. %) |      |      |     |     |
|---------|--------------------------------|------|------|-----|-----|
|         | Si                             | Ni   | Cu   | Fe  | Mn  |
| 1       | 0,6                            | 13,5 | 13,3 | 0,0 | 0,0 |
| 2       | 8,7                            | 0,3  | 2,2  | 0,0 | 0,0 |
| 3       | 1,7                            | 11,8 | 14,0 | 0,0 | 0,0 |
| 4       | 0,5                            | 0,2  | 1,3  | 0,0 | 0,0 |
| 5       | 22,5                           | 1,1  | 1,6  | 1,2 | 0,0 |
| 6       | 1,1                            | 14,8 | 15,8 | 0,5 | 0,0 |
| 7       | 2,3                            | 17,2 | 5,2  | 2,7 | 0,6 |

На рисунке 2 приведены результаты исследования распределения атомов кремния и магния в силумине АК12, выявленные методами STEM.

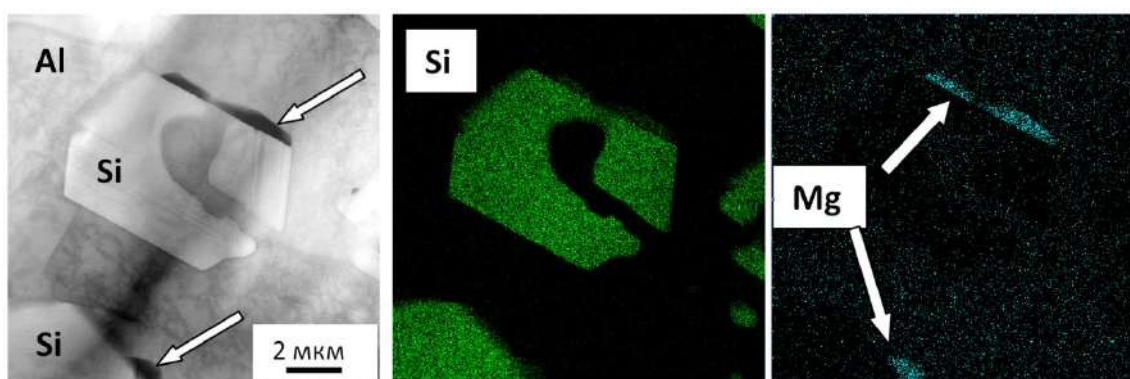


Рисунок 2 – STEM анализ элементного состава силумина марки АК12

Отчетливо видно (рис. 2), что магний располагается в вдоль границы раздела включения кремния и алюминия. Другие варианты распределения атомов кремния, магния, меди и никеля, выявленные методами микрорентгеноспектрального анализа (метод STEM), приведены на рисунке 3.

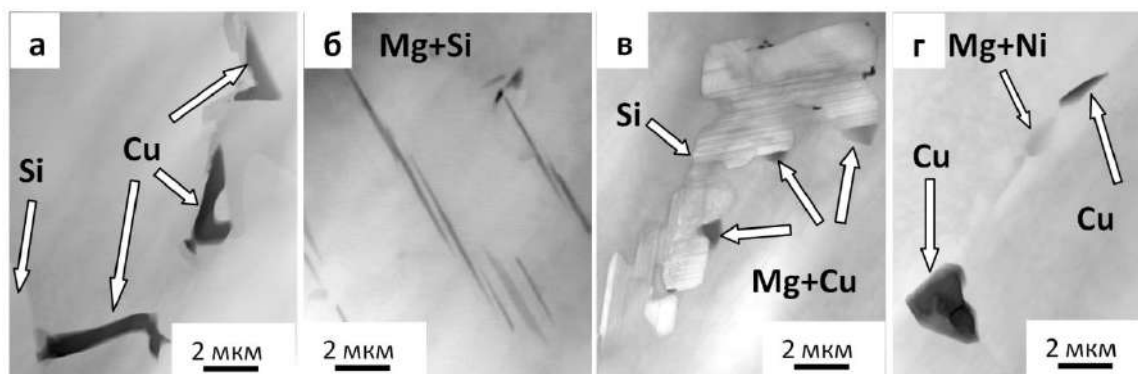


Рисунок 3 – STEM анализ элементного состава силумина марки АК12

Таким образом, методами СЭМ и STEM показано, что присутствующие в силумине элементы распределены неоднородно, формируя различные фазы.

Облучение поверхности силумина интенсивным импульсным электронным пучком в режиме плавления и последующего высокоскоростного охлаждения приводит к формированию поверхностного слоя толщиной до 50 мкм, имеющего структуру ячеистой кристаллизации (рис. 4). Объем ячеек сформирован твердым раствором на основе алюминия (рис. 4, в), разделяющие ячейки прослойки – кремнием (рис. 4, б). Включений интерметаллидных фаз в данном слое не обнаружено. Следовательно, облучение интенсивным импульсным электронным пучком приводит к гомогенизации поверхностного слоя силумина.

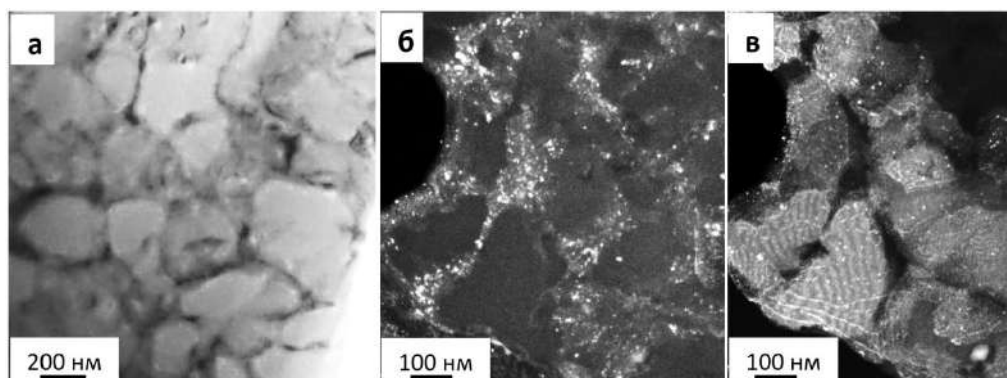


Рисунок 4 – Электронно-микроскопическое изображение структуры ячеистой кристаллизации силумина марки АК12; а – светлое поле; б, в – темные поля, полученные в рефлексах  $[220]Si$  и  $[111]Al$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект №16-58-00075-Бел\_а).

#### Список литературы:

1. Белов Н.А. Фазовый состав и структура силуминов / Н.А. Белов, С.В. Савченко, А.В. Хван. - М.: МИСИС, 2008. - 282 с.
2. 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 с.
3. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке // Известия вузов. Физика. - 2008. - №5. - С. 60-70.