

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА  
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СИЛУМИНА, ПОДВЕРГНУТОГО ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ  
ОБРАБОТКЕ**

Е.А. Петрикова, А.В. Ткаченко, К.И. Ткаченко

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. Ю.Ф. Иванов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: tkachenkoav@tpu.ru

**REGULARITIES OF STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION FORMATION OF SURFACE  
LAYER OF SILUMIN SUBJECTED TO ELECTRON-BEAM TREATMENT**

E.A. Petrikova, A.V. Tkachenko, K.I. Tkachenko

Scientific Supervisor: Prof., Dr. Yu.F. Ivanov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: tkachenkoav@tpu.ru

*It has been shown that electron beam treatment of silumin is accompanied by the formation of multilayer submicro- and nanocrystalline structure and result in increasing the microhardness of the surface layer (towards the core) is ~ 1.5 times up to 2 GPa.*

**Введение**

Эвтектические силумины представляют большой интерес в силу следующих особенностей: отличные литейные свойства, низкий температурный коэффициент линейного расширения, низкая плотность (сравнительно со сталью и медными сплавами), хорошая свариваемость и обрабатываемость резанием, низкая стоимость.

Эвтектические силумины широко используются в различных отраслях промышленности, в частности для производства поршней двигателей внутреннего сгорания и ряда других деталей. Очень часто использование этих сплавов для изготовления полуфабрикатов затруднено из-за формирования в структуре грубых первичных кристаллов кремниевого твёрдого раствора, снижающих технологичность материала при литье и эксплуатационные свойства готовых изделий.

Эффективный способ улучшения служебных характеристик путем модификации рабочих поверхностей и измельчения грубых включений кремния основан на воздействии на материал высокоинтенсивными импульсными электронными пучками микро- и субмиллисекундной длительности [1-3].

Цель настоящей работы – выявление закономерностей формирования структуры и фазового состава поверхностного слоя силумина, подвергнутого электронно-пучковой обработке при различной плотности энергии и длительности импульса электронного пучка.

**Материал и методика исследования**

Объектом исследований являлись образцы силумина эвтектического состава: 12.49 % Si, 2.36 % Mg, 0.6 % Cu, 0.35 % Ni, 0.3 % Fe, ост. Al, (в ат.%). Образцы в виде цилиндров диаметром 10 мм и толщиной

5 мм подвергали обработке высокоинтенсивными импульсными электронными пучками на установке «SOLO» (Институт сильноточной электроники СО РАН) и на ускорителе «Геза-1» (ОАО НИИЭФА им. Д.В. Ефремова). По совокупности основных параметров данное оборудование не имеет аналогов не только в России, но и за рубежом. Параметры электронно-пучковой обработки («SOLO»): плотность энергии пучка электронов  $E_s = 20$  Дж/см<sup>2</sup>, длительность импульса пучка электронов 150 мкс, частота следования импульсов облучения  $f = 0,3$  Гц, количество импульсов облучения  $N = 1, 3, 5, 10$  и  $50$ ; на установке «Геза-1»: плотность энергии пучка электронов –  $10...50$  Дж/см<sup>2</sup>, длительность импульса воздействия – 250 мкс; количество импульсов воздействия – 1-5. Механические свойства приповерхностного слоя характеризовали путем построения профиля микротвердости (метод Виккерса, прибор ПМТ-3). Структуру поверхности обработки и поверхностного слоя анализировали на сканирующем электронном микроскопе SEM-515 Philips, оснащенный микроанализатором EDAX ECON IV и просвечивающем электронном микроскопе (ЭМ-125 и JEM-2100F). Фазовый состав изучали методами рентгенофазового анализа (Дрон-7).

#### Результаты исследования и их обсуждение

Воздействие высокоэнергетического потока электронов на образцы силумина приводит, в зависимости от плотности поглощенной энергии, к плавлению поверхностного слоя толщиной до 100 мкм (в зависимости от плотности энергии пучка), перемешиванию элементов в расплаве за счет конвекции и последующей кристаллизации в условиях сверхбыстрого охлаждения с образованием структуры дендритной или ячеистой кристаллизации (рис. 1, б), размер кристаллитов которой, изменяющийся в нано- и субмикронном диапазоне, определяется величиной плотности энергии пучка электронов.

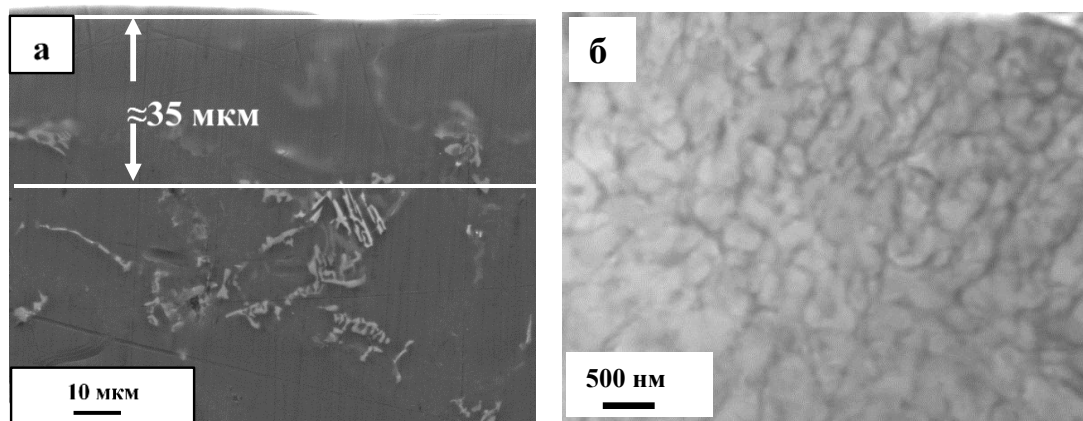
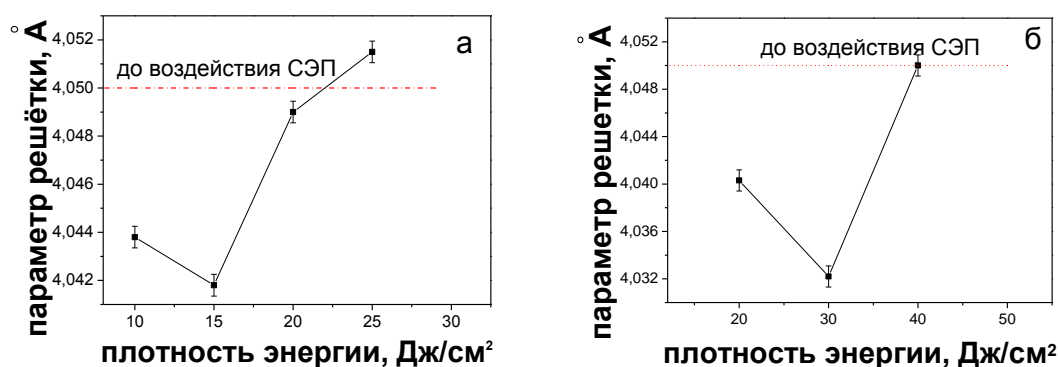


Рис. 1. Структура поперечного шлифа (а) (СЭМ) и поверхности (б) (ПЭМ) силумина, обработанного высокоинтенсивным электронным пучком

Фазовый состав силумина при электронно-пучковой обработке практически не изменяется – основными фазами поверхностного слоя, как показывает рентгенофазовый анализ, являются твердые растворы на основе кристаллических решеток алюминия и кремния. По смещению дифракционной линии (311) Al было выявлено уменьшение параметра кристаллической решетки алюминия при облучении силумина электронным пучком при вариации плотности энергии ( $10...15$ ) Дж/см<sup>2</sup> (на установке СОЛО) и ( $20...30$ ) Дж/см<sup>2</sup> (на установке Геза-1) (рис. 2). Это связано, очевидно, с внедрением атомов кремния в решетку алюминия. Радиус атома кремния меньше радиуса атома алюминия на

0,0054 нм, следовательно, обогащение твердого раствора на основе алюминия атомами кремния будет сопровождаться уменьшением параметра его решетки. При облучении силумина электронным пучком при плотности энергии 20...25 Дж/см<sup>2</sup> (СОЛО) и 40 Дж/см<sup>2</sup> (Геза-1) выявлено увеличение параметра решетки алюминия, что связано с растворением частиц интерметаллидных фаз и обогащением твердого раствора на основе алюминия атомами магния, обладающими большим, по сравнению с алюминием, атомным радиусом.

Рис. 2. Зависимость параметра кристаллической решетки алюминия от плотности поглощенной



энергии пучка электронов

Формирование многофазной наноразмерной структуры, обогащение кристаллической решетки алюминия атомами кремния и других легирующих элементов, способствует увеличению микротвердости поверхности слоя материала толщиной до 50 мкм в 1,5 раза по отношению к сердцевине образца (до 2 ГПа).

#### Закключение

Проведена обработка поверхности силумина высокоинтенсивным электронным пучком при различной длительности импульса и плотности энергии пучка. Выполнены исследования структуры и фазового состава поверхностного слоя силумина в исходном состоянии и после электронно-пучковой модификации. Продемонстрирована возможность диспергирования структуры силумина и формирование модифицированного слоя с повышенной микротвёрдостью.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00091).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов Н.А., Савченко С.В., Хван А.В. Фазовый состав и структура силуминов: Справочное издание. – М.: МИСИС, 2007. – 283 с.
2. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / Под ред. Дж. Поута, Г. Фоти и Д. Джекобсона. – М.: Машиностроение, 1987. – 424 с.
3. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2008. – Т. 51. - №5. – С. 60 – 70.