

## УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СИЛУМИНА ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Е.А. Петрикова, А.Д. Тересов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт сильноточной электроники СО РАН,  
пр. Академический, 2/3, Томск, 634055, Россия,  
elizmarkova@yahoo.com, tad514@sibmail

Были выполнены испытания силумина с модифицированным импульсным электронным пучком поверхностным слоем на износостойкость, растяжение и изгиб; проведены исследования микроструктуры поверхностей разрушения; выявлены структурные элементы, ответственные за разрушение силумина. Предложен способ влияния модификации тонкого поверхностного слоя на упругие и пластические свойства образца в целом, выявлена связь структуры и свойств модифицированных поверхностей с параметрами воздействия.

### Введение

Сплавы на основе алюминия с добавками кремния (силумины), обладающие приемлемым уровнем физико-механических и коррозионных характеристик, нашли широкое применение в промышленности [1, 2]. Структура силуминов включает в себя эвтектику, дендриты  $\alpha$  - твердого раствора, небольшое количество первичных кристаллов кремния и интерметаллидов [1, 2]. Небольшие, округлые, равномерно распределенные частицы кремния приводят к высокой пластичности и относительно высокой прочности; в то время как крупные игольчатые кристаллы существенно снижают пластичность, сопротивление усталости и износу. Измельчение и сфероидизация кристаллов кремния в эвтектике приводит к повышению на 30 – 40% предела прочности и в 2 – 3 раза относительного удлинения [1, 2]. В случае полной сфероидизации кремниевой фазы наилучшая структура, обеспечивающая оптимальный комплекс различных свойств, достигается у эвтектических силуминов, так как включения кремния в них распределены более равномерно [1, 2]. Применение низкоэнергетических электронных пучков, способных формировать в тонком поверхностном слое наноразмерную многофазную структуру, приводит к существенному торможению процесса трещинообразования, кратно снижается степень шероховатости поверхности, удаляется большинство поверхностных дефектов, также способных служить источниками трещин.

Цель работы – выявление влияния модифицирования структуры тонкого приповерхностного слоя силумина эвтектичного состава высокоинтенсивным электронным пучком на физико-механические, пластические и упругие свойства материалов.

### Материал и методика исследования

Материалом исследования являлся силумин (состояние, полученное методом литья в кокиль) 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 импульсным электронным пучком на установке «SOLO» (Институт сильноточной электроники СО РАН). Параметры электронно-пучковой обработки: энергия электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов ( $10^4$ – $10^6$ ) Дж/см<sup>2</sup>, длительность импульса пучка электронов 150 мкс. Облучение проводили в однопольном режиме в среде аргона при давлении газа ~0.02 Па. Импульсный режим работы источника электронов позволял проводить охлаждение материала от температуры плавления до комнатной со скоростями ( $10^4$ – $10^6$ ) К/с вследствие теплоотвода в основной объем интегрально холодного образца.

Фазовый состав и структуру силумина анализировали методами рентгеноструктурного анализа (ДРОН-4, фокусировка Брегга-Брентано), оптической (NEOFOT-32), сканирующей (SEM-515 Philips) и просвечивающей электронной (JEM-2100) микроскопии. Механические свойства силумина характеризовали твердостью (метод Виккерса, прибор ПМТ-3, нанотвердомер “Nanotest - 100”), пластичностью, пределами прочности на изгиб и на растяжение (Instron-3369).

### Результаты исследования и их обсуждение

Структура исходных образцов силумина представлена твердым раствором на основе алюминия, содержащего кремний и другие легирующие элементы, выделений интерметаллидных фаз ( $\text{Al}_8\text{Si}_6\text{Mg}_3\text{Fe}$ ;  $\text{Al}_7\text{Cu}_4\text{Ni}$ ) и кремния, окруженных эвтектикой, в состав которой входят атомы алюминия, кремния, меди и никеля. Структура исходного силумина является грубой и неоднородной, с крупными включениями кремния. Размер включений кремния, имеющих форму пластин, изменяется в пределах от единиц до нескольких десятков микрон (рис. 1).

Воздействие высокоэнергетического потока электронов на поверхность образца силумина приводит к плавлению поверхностного слоя, перемешиванию элементов в расплаве за счет конвекции и последующей кристаллизации в условиях сверхбыстрого охлаждения с образованием структуры дендритной или ячеистой кристаллизации (рис. 2), размер кристаллитов которой определяется величиной плотности энергии пучка электронов. Толщина модифицированного, в результате плавления алюминия, поверхностного слоя при указанном режиме облучения достигает ~50 мкм.

Многочисленное диспергирование структуры силумина и растворение крупных включений крем-

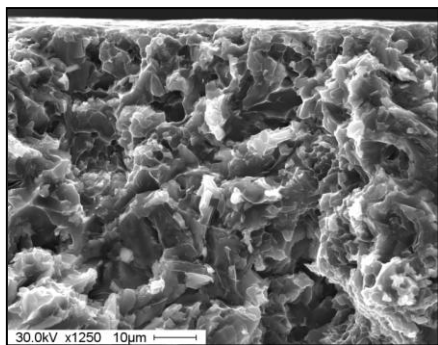


Рис. 1. Структура поперечного излома силумина до обработки импульсным электронным пучком

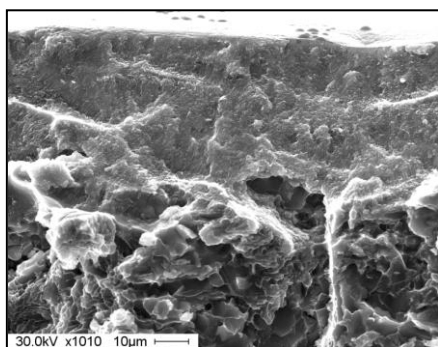


Рис. 2. Структура поперечного излома силумина после обработки импульсным электронным пучком по режиму: 25 Дж/см<sup>2</sup>, 150 мкс, 1 имп.

ния и интерметаллидных фаз приводят к росту предела прочности на изгиб (в  $\sim 1.2$  раза) и на растяжение (в  $\sim 1.4$  раза), увеличению пластичности на изгиб (в  $\sim 1.2$  раза) и при растяжении (в  $\sim 1.8$  раза).

Встречая на своем пути препятствие, трещина может остановиться, изменить направление, разветвиться и т.п. В некоторых случаях на конце трещины может возникнуть пластическая деформация, замедляющая процесс разрушения и, в конечном счете, способствующая росту ударной вязкости и трещиностойкости.

Измерения профиля нанотвердости (нагрузка на индентор 25 мН) выявили, что максимального

значения ( $\sim 5.0$  ГПа) твердость силумина достигает в тонком ( $\sim 3$  мкм) поверхностном слое и в протяженном слое, расположенном на глубине (25–35) мкм. В исходном состоянии микротвердость силумина составляет  $\sim 1.3$  ГПа, то есть электронно-пучковая обработка силумина приводит к увеличению его твердости в  $\sim 3.5$  раза.

Модуль Юнга силумина в подповерхностном слое достигает значений 95–105 ГПа, в то время как в исходном состоянии составляет  $\sim 70$  ГПа. Таким образом, обработка электронным пучком позволяет увеличить модуль Юнга силумина в  $\sim 1.4$  раза. Ранее изменение модуля Юнга силумина было выявлено в [3], что связано, по мнению авторов работы, с изменением концентрации кремния в твердом растворе на основе алюминия в процессе кристаллизации расплава при центрифугировании. При традиционных способах обработки модуль Юнга практически не изменяется [3].

### Заключение

Установлено, что облучение образцов силумина высокоинтенсивными электронными пучками приводит к диспергированию структуры поверхностного слоя вплоть до наноструктурного состояния, увеличению микротвердости поверхностного слоя (по отношению к сердцевине) в  $\sim 3.5$  раза и модуля Юнга в  $\sim 1.4$  раза, увеличению предела прочности и пластичности на изгиб в  $\sim 1.2$  раза, на растяжение в  $\sim 1.4$  раза и  $\sim 1.8$  раза, соответственно.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-08-98084 - р\_сибирь\_a.

### 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. Строганов Г.Б., Ротенберг В.А., Гершман Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием. М.: Металлургия, 1977. 272 с.
3. Волков М.П., Гулин В.Н., Никоноров С.П. и др. // Физика твердого тела. 2005. Т. 47. № 5. С. 886–892.

## HARDENING OF THE SURFACE LAYER OF SILUMIN BY ELECTRON BEAM

Elizaveta Petrikova, Anton Teresov

Institute of High Current Electronics SB RAS,

2/3 Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634055, Russia, elizmarkova@yahoo.com

Wear tests, tensile and deflection tests of silumin with a modified by a pulsed electron beam surface layer have been carried out; investigations of the microstructure of fracture surfaces have been conducted; the structural elements responsible for the destruction of silumin have been revealed. A method of influence a modified thin surface layer on the elastic and plastic properties of the sample as a whole have been suggested, connection the structure and properties of the modified surfaces with exposure parameters have been detected.