

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СПЛАВА Al-Si, ПОДВЕРГНУТОГО ОБЛУЧЕНИЮ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Е.А. Петрикова¹⁾, Ю.Ф. Иванов^{1, 2)}, А.В. Ткаченко²⁾

¹⁾Институт си́лноточной электроники СО РАН,
634055, Томск, Россия, elizmarkova@yahoo.com

²⁾Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Томск, Россия, yufi55@mail.ru

Показано, что обработка сплава Al-Si высокоинтенсивным импульсным электронным пучком сопровождается формированием на поверхности силумина наноструктурированного слоя с градиентной структурой, микротвердость которого в 3 раза превышает микротвердость исходного образца.

Введение

Алюминиево-кремниевые сплавы (силумины), обладающие структурной стабильностью в широком диапазоне температур эксплуатации и приемлемым уровнем физико-механических и коррозионных характеристик, используются во многих отраслях промышленности. Структура силуминов включает в себя эвтектику, а также дендриты α -твёрдого раствора и небольшое количество первичных кристаллов кремния [1, 2]. Небольшие, округлые, равномерно распределенные частицы кремния (эвтектические или избыточные) приводят к высокой пластичности и относительно высокой прочности; в то время как граненые игольчатые кристаллы несколько повышают прочность, но существенно снижают пластичность, сопротивление удару и усталости. Разрушение возникает около частиц кремния, после чего деформируется матрица. Таким образом, измельчение и сфероидизация кристаллов кремния в эвтектике приводит к повышению на 30 – 40% предела прочности и в 2 – 3 раза относительного удлинения [3]. В случае полной сфероидизации кремниевой фазы наилучшая структура достигается у эвтектических силуминов, так как включения кремния в них распределены более равномерно. Такая структура обеспечивает оптимальный комплекс различных свойств [3].

Целью настоящей работы являлось изучение закономерностей диспергирования структуры и увеличения прочностных характеристик приповерхностного слоя силумина эвтектоидного состава, подвергнутого облучению импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия.

Материал и методика исследования

Материалом исследования являлись образцы следующего 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 высокоинтенсивным импульсным электронным пучком на установке «SOLO» (Институт си́лноточной электроники СО РАН). Параметры электронно-пучковой обработки: энергия электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов (10...25) Дж/см², длительность импульса пучка электронов 150 мкс, частота сле-

дования импульсов облучения 0,3 с⁻¹. Облучение проводили в одноимпульсном режиме в среде аргона при давлении газа ~ 0,02 Па.

Фазовый состав и структуру поверхности обработки и приповерхностного слоя анализировали методами оптической (NEOFOT-32, микровизор μ Vizo – MET-221), сканирующей (SEM-515 Philips) и просвечивающей электронной (JEM-2100) микроскопии. Механические свойства приповерхностного слоя характеризовали величинами микро- и нанотвердости (метод Виккерса, прибор PMT-3, нанотвердомер "Nanotest - 100"), испытаниями на растяжение и изгиб (Instron-3369).

Результаты исследования и их обсуждение

В исходном состоянии (состояние, полученное методом литья в кокиль) исследуемый в настоящей работе силумин сформирован областями, преобладающим элементом которых является алюминий, и областями, преобладающим элементом которых является кремний. Согласно данным, полученным с помощью оптической микроскопии, размер включений кремния изменяется в пределах от единиц до нескольких десятков микрометров. В результате обработки импульсным электронным пучком формируется модифицированный поверхностный слой толщиной до 50 мкм, который можно разделить на подслой толщиной (25-30) мкм, формирующийся при высокоскоростной кристаллизации расплава Al-Si, и подслой термического влияния толщиной (15-20) мкм, хорошо различимые при анализе структуры поперечного шлифа (рис. 1).

Анализ дефектной субструктуры силумина, подвергнутого электронно-пучковой обработке, осуществляли методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии фольг. Фольги изготавливали путём ионного утонения пластинок, вырезанных перпендикулярно поверхности облучения (поперечные фольги). Изучали структурно-фазовое состояние модифицированного поверхностного и приповерхностного слоев образцов, обработанных электронным пучком с параметрами: 20 Дж/см², 200 мкс., 0,3 с⁻¹, 1 имп. Выполненные исследования показали, что слой, кристаллизующийся из расплавленного состояния, имеет ячеистую структуру (рис. 2). Форма ячеек изменяется от квазиравноосной (средний

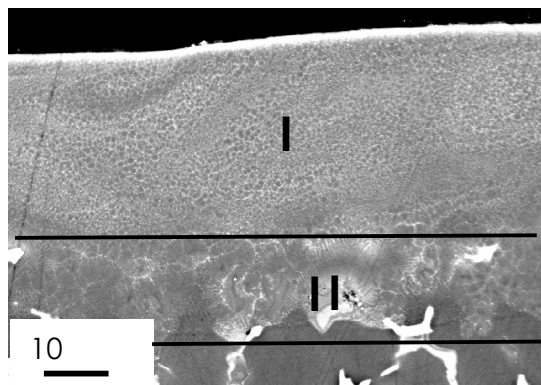


Рис. 1. Морфология поперечного сечения образца силумина, обработанного высокоинтенсивным электронным пучком с плотностью поглощенной энергии 25 Дж/см^2 , 1 импульсом воздействия

размер ячеек $\sim 140 \text{ нм}$ до глобулярной ($L \sim 1 \text{ мкм}$; $h \sim 0,4 \text{ мкм}$). Ячейки равноосной формы располагаются преимущественно в слое, примыкающем к поверхности облучения; ячейки глобулярной формы располагаются на большем удалении от поверхности обработки (рис. 2, 3).

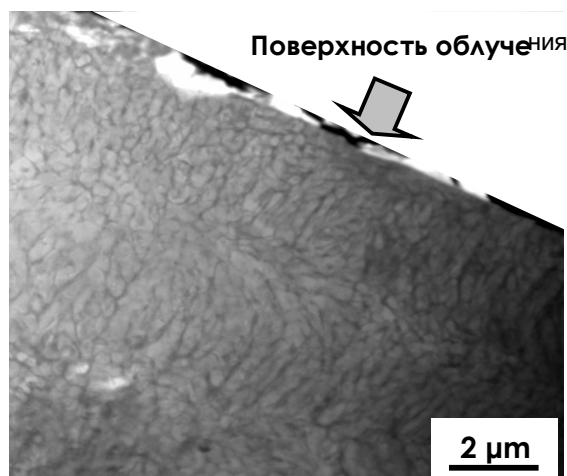


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя силумина, обработанного электронным пучком

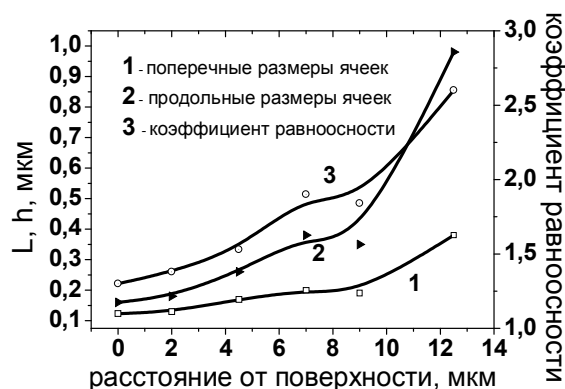


Рис. 3. Зависимость поперечных (1), продольных (2) размеров зёрен и коэффициента равноосности (3) от расстояния от поверхности

Ячейки кристаллизации разделены прослойками второй фазы. Толщина прослоек изменяется в пределах от 40 до 65 нм. Анализ микроэлектроннограмм, полученных с такой структуры, выявил присутствие рефлексов, принадлежащих кристаллическим решеткам алюминия и кремния. Это позволило заключить, что ячейки сформированы твердым раствором на основе алюминия, а прослойки являются кремнием. Принимая во внимания тот факт, что в исходном состоянии пластинки кремния достигали микронных размеров в поперечном измерении, можно заключить, что обработка электронным пучком приводит к многократному измельчению структуры приповерхностного слоя силумина.

Твёрдость поверхности и приповерхностного слоя модифицированного электронным пучком силумина анализировали при нагрузке на индентор 25 мН, что позволило построить профиль твердости (нанотвердости) с минимальным удалением от поверхности облучения (рис. 4, кривая 1).



Рис. 4. Зависимости величины микротвердости (1) и модуля Юнга (2) от расстояния до поверхности слоя облучения силумина электронным пучком

Анализируя результаты, представленные на рис. 4, можно отметить, что максимального значения ($4,5 \dots 5,0 \text{ ГПа}$) величина твердости силумина достигает в тонком ($\sim 3 \text{ мкм}$) поверхностном слое и в протяженном слое, расположенном на глубине (25-35) мкм. Сопоставляя результаты, приведенные на рис. 1 и рис. 4, можно заключить, что второй максимум твердости формируется в переходном слое, отделяющем слой, кристаллизующийся из расплава, от слоя термического влияния. Учитывая, что в исходном состоянии микротвердость силумина составляет $1,3 \text{ ГПа}$, можно констатировать, что электронно-пучковая обработка силумина способствует увеличению твердости материала в $\sim 3,5$ раза.

Несколько иным образом изменяется в зависимости от расстояния до поверхности облучения величина модуля Юнга. А именно, максимальные значения модуля Юнга ($95 \dots 105 \text{ ГПа}$) достигаются в переходном слое, отделяющем слой, кристаллизующийся из расплава, от слоя термического влияния (рис. 4, кривая 2). Принимая во внимание, что модуль Юнга силумина в исходном состоянии $\sim 70 \text{ ГПа}$, делаем вывод, что обработка

электронным пучком позволяет увеличить модуль Юнга силумина в $\sim 1,4$ раза. Отметим, что при традиционных способах обработки модуль Юнга практически не изменяется [4].

Анализ слоя термического влияния выявил протекание в силумине процесса глобуляризации кремния. Кремний, имеющий в исходном состоянии преимущественно пластинчатую структуру, под действием тепла и, по всей видимости, упругих напряжений, формирующихся в материале при высоких скоростях охлаждения, приобретает форму глобул, размеры которых изменяются в пределах десятых-сотых долей микрона (рис. 5).

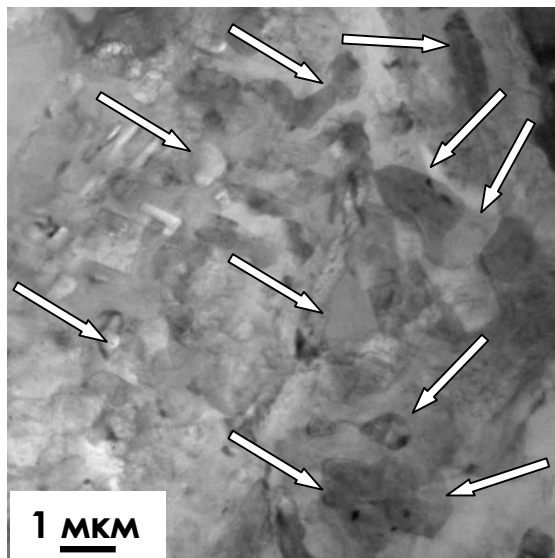


Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение структуры слоя термического влияния силумина, обработанного электронным пучком

Известно [2, 3], что механические свойства силуминов существенным образом зависят не только от состава, но и от распределения и формы кристаллов кремния. Небольшие округлые равномерно распределенные частицы (эвтектические или избыточные) приводят к высокой пластичности и относительно высокой прочности [2, 3]. И действительно, электронно-пучковая обработка в данном режиме привела к увеличению

предела прочности силумина на изгиб в $\sim 1,2$ раза и на растяжение в $\sim 1,4$ раза, при этом пластичность силумина увеличилась в 1,2 раза при испытаниях на изгиб и в 1,8 раза при испытаниях на растяжение.

Заключение

Проведена обработка поверхности силумина высокоинтенсивным электронным пучком.

Установлено, что облучение образцов силумина высокоинтенсивными электронными пучками субмиллисекундной длительности воздействия на установке «SOLO» приводит к формированию модифицированного слоя толщиной до 50 мкм, диспергированию структуры поверхностного слоя вплоть до наноструктурного состояния, увеличению нанотвердости поверхностного слоя (по отношению к сердцевине) при оптимальном режиме облучения (20 Дж/см^2 ; 150 мкс; 1 имп.; 0,3 Гц) в $\sim 3,5$ раза.

Многokратное диспергирование структуры силумина и растворение крупных включений кремния и интерметаллидных фаз в слое толщиной до 50 мкм приводят к увеличению предела прочности на изгиб (в $\sim 1,2$ раза) и на растяжение (в $\sim 1,4$ раза); пластичность силумина увеличилась в 1,2 раза при испытаниях на изгиб и в 1,8 раза при испытаниях на растяжение.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 13-08-00416) и программы Президиума РАН №24 (проект №17).

Список литературы

1. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Горбунов Ю.А., Горбунов Д.Ю., Лопатина Е.С., Соколов Р.Е. // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. – 2006. – №5. – С.233 - 235
2. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства сплавов / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1979. – 640 с
3. Поршневые силумины: Учебное пособие. Колл. авторов. Под научной редакцией В.К. Афанасьева. – Кемерово: Полиграф, 2005. – 161 с.
4. Волков М.П., Гурина В.Н., Никаноров С.П. и др. // Физика твердого тела. – 2005. – Т.47. – №5. – С. 886 - 892

STRUCTURE AND PROPERTIES OF SURFACE LAYER ALLOY AL-SI, SUBJECTED TO HIGH-INTENSITY ELECTRON BEAM TREATMENT

E.A. Petrikova¹, Yu.F. Ivanov^{1,2}, A.V. Tkachenko²

¹Institute of High Current Electronics SB RAS, 634055, Tomsk, Russia, yufi55@mail.ru

²National Research Tomsk Polytechnic University, 634050, Tomsk, Russia

Silumin (Al-Si) is the basis of most modern aluminum casting alloys. The evident shortcoming of silumin is the low strength characteristics, which restrict their range of application. Therefore, the task of finding and developing new promising techniques of modifying silumins is very important. In this work it is shown that high-intensity pulsed electron beam treatment of Al-Si alloy is accompanied by the formation on the surface of nanostructured layer with gradient structure. Nanohardness of this layer is 3 times higher and ultimate strength is 1,4 times than that for of initial samples.