

МОДИФИКАЦИЯ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

М.Е. Рыгина¹⁾, Н.Н. Коваль¹⁾, Ю.Ф. Иванов¹⁾, П.В. Москвин¹⁾,
А.Н. Прудников²⁾, М.С. Воробьев¹⁾

¹⁾Институт сильноточной электроники СО РАН,
пр. Академический 2/3, Томск 634055, Россия,

ryginame@opee.hcei.tsc.ru, yufi55@mail.ru, pavelmoskin@mail.ru, vorobyovms@yandex.ru

²⁾Сибирский государственный индустриальный университет,
пр. Бардина 25, Новокузнецк 654041, Россия, a.prudnikov@mail.ru

В работе представлены результаты механических испытаний образцов заэвтектического силумина до и после модификации импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия в режиме ступенчатой обработки (со снижением плотности энергии пучка электронов) и при постоянной плотности энергии пучка электронов. При воздействии на образец на поверхности в режиме снижения плотности энергии пучка электронов происходит увеличение предела прочности за счет снятия внутренних напряжений и незначительное увеличение деформации при растяжении. В режиме обработки при постоянной плотности энергии деформация при растяжении растет прямо пропорционально плотности энергии и достигает 8.25 %. Отмечается, что режим обработки 15 Дж/см², 150 мкс является недостаточным для растворения первичных кристаллов кремния, так как температура нагревания поверхностного слоя составляет 800 °C.

Ключевые слова: импульсный электронный пучок; заэвтектический силумин; прочность; твердость; износстойкость.

MODIFICATION OF HYPEREUTECTIC SILUMIN BY IMPULSE ELECTRONIC BEAM

М.Е. Рыгина¹⁾, Ю.Ф. Иванов¹⁾, П.В. Москвин¹⁾, А.Н. Прудников²⁾, М.С. Воробьев¹⁾

¹⁾Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
2/3 Akademichesky Ave., 634055 Tomsk, Russia,

ryginame@opee.hcei.tsc.ru, yufi55@mail.ru, pavelmoskin@mail.ru, vorobyovms@yandex.ru

²⁾Siberian State Industrial University,

25 Bardina Ave., 654041 Novokuznetsk, Russia, a.prudnikov@mail.ru

The work presents the results of mechanical testing of samples of hypereutectic silumin before and after modification by the pulsed electronic beam of the submillisecond duration of exposure. The main feature of this type of processing is to melt the surface layer due to large heating rates (up to 10⁹ f/s) and cooling (10⁴ - 10⁹ f/s). Processing was carried out in a stable processing mode (with a decrease in electron energy density) and with a constant density of the energy of the electron beam. When exposed to the surface in the mode of reducing the density of the energy of the beam of electrons, an increase in the strength of the strength due to the relief of internal stresses and a slight increase in the deformation during stretching. In processing mode with really energy density, the deformation during stretching grows directly to the amount of energy and reaches 8.25 %. It is noted that the processing mode is 15 J/cm². 150 μs is insufficient to dissolve the primary silicon crystals, since the temperature of heating the surface layer is 800 C. The hardness of the samples increases and reaches values up to 1.3 GPa. Thus, the pulse electronic bundle can be used to modify the surface of the hypereutectic silumin.

Keywords: impulse electronic beam; hypereutectic silumin; strength; hardness; wear resistance.

Введение

Заэвтектический силумин – сплав на основе алюминия, вторым компонентом которого является кремний [1]. Использующийся для изготовления не тяжелонагруженных деталей машин и механизмов. Из-

за высокого содержания кремния (более 12.2 вес.% Si) данная группа сплавов отличается низким коэффициентом термического расширения (КТР), по сравнению с алюминиевыми сплавами [2]. В совокупности с высокой коррозионной стойко-

стью, высокой твердостью позволяют использовать заэвтектический силумин для изготовления поршней, картеров, подшипников качения, блоков головок цилиндра [3]. Наличие в структуре избыточного кремния приводит к образованию первичных кристаллов кремния, в процессе эксплуатации в парах трения происходит выкрашивание и трещинообразование по границам кристаллов с последующим разрушением деталей машин [4]. Обработка концентрированными потоками энергии приводит к высокоскоростному плавлению и повторной кристаллизации сплава [5, 6]. С образованием структуры размер кристаллитов соответствует микр- и наноразмерному диапазону [7].

Целью работы является исследование механических свойств заэвтектического силумина, обработанного в различных режимах импульсным электронным пучком.

Материалы и методы исследования

В качестве материала исследования использован силумин марки АК20 с содержанием кремния 20 вес.%. Модификация (с двух сторон) рабочей поверхности образцов производилась с использованием вакуумной электронно-пучковой установки «СОЛО» (ИСЭ СО РАН) [5, 6]. Облучение образцов осуществляли двумя различными способами. Первый способ включал в себя 4 ступени по 3 импульса в каждой ($\sum 12$ импульсов), при этом плотность энергии пучка электронов на каждой ступени менялась по схеме, представленной в таблице 1 (А, Б). Время охлаждения поверхностного слоя за счет теплоотвода в интегрально холодный объем образца между ступенями обработки оставалось постоянным и составляло 15 секунд.

Второй способ включал в себя обработку поверхности при постоянной плотности энергии пучка электронов таблица 1 (В-Е). Количество импульсов 12. Условия проведения эксперимента: энергии ускоренных электронов 18 кэВ, частоте следования импульсов 0.3 с^{-1} , длительности импульсов воздействия пучка электронов

150 мкс. При каждом режиме обработки облучение осуществлялось в едином вакуумном цикле.

Табл. 1. Режимы обработки поверхностного слоя заэвтектического силумина импульсным электронным пучком

Режим обра- ботки	Плотность энергии пучка элек- тронов, E_s , Дж/см ²			
	Номер ступени облучения			
	1	2	3	4
А	50	30	15	5
Б	40	30	15	5
В			15	
Г			30	
Д			40	
Е			50	

Измерение микротвердости проводили на приборе ПМТ-3. Испытания образцов до разрушения в условиях одноосного растяжения осуществляли на установке Instron 3369 (скорость растяжения 0.2 мм/с) в соответствии с ГОСТ 1497-84 [8].

Результаты и их обсуждение

В результате взаимодействия электронного пучка с поверхностью заэвтектического силумина происходит переплав поверхностного слоя, приводящий к изменению механических характеристик. Механические характеристики до и после модификации представлены в таблице 2.

Режимы В-Г не приводят к значительному изменению твердости. Это объясняется, что температура, которую достигает поверхность образца ниже температуры плавления кремния (1414 °C) (рис. 1).

Режимы В-Е не изменяют предел прочности при растяжении, по сравнению с исходными образцами, несмотря на то, что толщина расплавленного слоя достигает 170 мкм. Это может быть связано с высокими скоростями кристаллизации, которые способствуют формированию напряжения в кристаллической решетке и охрупчиванию материала.

При ступенчатой модификации (режимы А и Б) удается увеличить предел прочности по сравнению с исходным об-

Табл. 2. Механические характеристики образцов заэвтектического силумина

Режим обработки	Твердость, ГПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %
Исходный	0.8	83.2	2.45
А	1.1	90.7	3.7
Б	1.3	98.3	3.8
В	0.8	84.5	3.3
Г	0.9	82	4.38
Д	0.9	73	5.42
Е	1.3	83.9	8.25

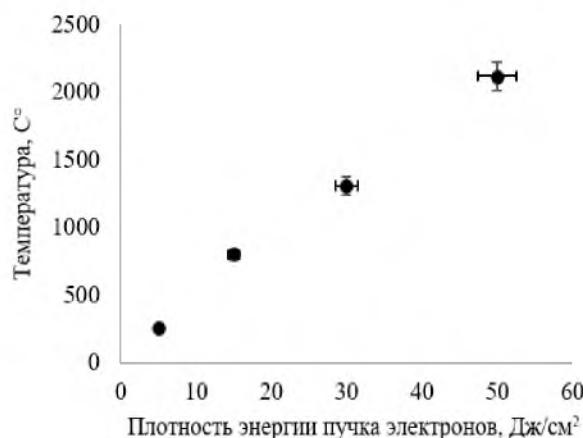


Рис. 1. График зависимости температуры поверхности заэвтектического силумина от плотности энергии пучка электронов Дж/см² (150 мкс, 0.3 Гц)

разцом, что связано с отводом тепла в объем образца и снятию напряжений.

Следует отметить, что при воздействие импульсным электронным пучком на поверхность заэвтектического силумина, не зависимо от режима приводит к увеличению относительного удлинения при растяжении. Режим модификации Е, при котором происходит переплавление кристаллов кремния, и температура расплава, образующегося в поверхностном слое, достигает 2117 °C, позволяет увеличить относительное удлинение при растяжении 3.3 раза.

Заключение

Определено влияние импульсного электронного пучка на механические характеристики заэвтектического силумина. Установлено, что модификация поверхности способствует увеличению твердости и относительного удлинения. При этом ступенчатая обработка со снижением плотности энергии пучка электронов способствует и увеличению предела прочности исследуемых образцов.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда РНФ № 24-69-00074.

Библиографические ссылки

- Белов Н. А., Савченко С. В., Хван А. В. Фазовый состав и структура силуминов. Москва: МИСИС; 2008. 281 с.
- Зильберг Ю.Я., Хрущова К.М., Гершман Г.Б. Алюминиевые сплавы в тракторостроении. М.: Машиностроение; 1971. 151 с.
- Марукович, Е. И., Стеценко В. Ю., Гутев А. П. Силумин с глобуллярным кремнием. Получение, свойства, Применение. Перспективные материалы и технологии: Монография. В 2-х томах. Витебск: Витебский государственный технологический университет; 2017. 467 с.
- Громов В.Е., Коновалов С.В., Аксенова К.В., Кобзарева Т. Ю. Эволюция структуры и свойств легких сплавов при энергетических воздействиях. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2016. 249 с.
- Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке. *Известия вузов. Физика* 2008; 51(5): 60-70.
- Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А., Иванова О.В., Иконникова И.А., Ткаченко А.В. Численное моделирование температурного поля силумина, облученного интенсивным электронным пучком. *Известия высших учебных заведений. Физика* 2015; 58(4): 46-51.
- Рыгина М.Е., Прудников А.Н., Петюкович М.С., Тересов А.Д., Иванов Ю.Ф. Фазовый состав и структура заэвтектического силумина АК20, облученного импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия. *Металлург* 2025; (3): 86-91.
- ГОСТ 1497-84. Металлы. Метод испытания на растяжение. Москва: Изд-во стандартов, 1997. 22 с.