

**СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА,
ПОДВЕРГНУТОГО ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ**

М.Е. Рыгина^{1,2}, А.Д. Тересов², Е.А. Петрикова²

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. Ю.Ф. Иванов^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

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

²Институт сильноточной электроники СО РАН

Россия, г. Томск, пр-т. Академический, 2/3, 634055

E-mail: L-7755me@mail.ru

**STRUCTURE AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF HYPEREUTECTIC SILUMINE
SUBJECTED TO ELECTRON BEAM TREATMENT**

M.E. Rygina¹, A.D. Teresov², E.A. Petrikova²

Scientific Supervisor: Prof., Dr. Yu.F. Ivanov^{1,2}

¹Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, 30, Lenin str., 634050

²Institute of High Current Electronics SB RAS, Russia, Tomsk, 2/3, Akademicheskyy ave., 634055

E-mail: L-7755me@mail.ru

***Abstract.** The irradiation of silumin with the hypereutectic composition (18–20 wt.% Si) by an intense pulsed electron beam in the melting mode of the surface layer was performed. It had been established that the irradiation of surface of a cast hypereutectic silumin specimens with a pulsed electron beam is accompanied by a multiple increase in strength and plastic properties of the material. It had been shown that the main reason for increase in the mechanical properties of silumin is the formation of an extended (up to 100 μm thick) surface layer with a submicro-nanocrystalline structure, as a result of high-speed crystallization, initiated by irradiation with a pulsed electron beam.*

Введение. Сплавы на основе алюминия нашли широкое применение в машино-, авиа- и судостроении. Силумины благодаря хорошим литейным свойствам, малому весу, стойкости к коррозии применяются в основном в до- и эвтектическом составе, то есть содержание кремния в них не превышает 13 вес. % [1]. При увеличении содержания кремния выше эвтектического в литых образцах возникают поры. Еще одним недостатком заэвтектических силуминов является наличие первичных зерен кремния, размер которых может достигать (100-120) мкм. Современные методы легирования и отливки позволяют получить заготовки, в которых заэвтектическая зона характеризуется эвтектическим кремнием со средним размером 4 мкм и кристаллами первичного кремния дисперсностью 18 мкм. Данный метод центробежного литья с использованием воды позволяет получать преимущественно полые заготовки [2].

Как было показано в предыдущих работах [3, 4] использование интенсивного импульсного электронного пучка позволяет получать структуры, находящиеся в нано- и субмикроразмерном диапазоне. а также осуществлять поверхностное легирование материала путем облучения системы «пленка/подложка».

Целью настоящей работы является анализ структуры и свойств силумина заэвтектического состава, разрушенного в результате испытаний на растяжение.

Материалы и методы исследования. В качестве материала исследования были использованы образцы заэвтектического силумина, концентрация кремния в которых изменялась в пределах (18-20) вес. %. Образцы имели форму цилиндра высотой 5 мм, диаметром 30 мм. Из данных образцов заэвтектического силумина были подготовлены лопатки для испытания на растяжения в соответствии с ГОСТ 1497-84 [5]. Испытания на растяжение до разрушения осуществляли на установке Instron. Перед испытаниями часть образцов облучали интенсивным импульсным электронным пучком (установка «СОЛО» [6]). Режим облучения: энергия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов 35 Дж/см², частота следования импульсов 0,3 с⁻¹, длительность воздействия пучка электронов 200 мкс, число импульсов воздействия 20. Режим облучения выбран согласно тепловым расчетам [7]. Образцы исследовали методами оптической (μ Vizo-MET-221) и сканирующей электронной (SEM-515 Philips) микроскопии. Испытания на твердость осуществляли на установке ПМТ-3. Испытание на разрыв производились в соответствии с ГОСТ 1497-84.

Результаты и их обсуждение. В работе [8] было показано, что облучение интенсивным импульсным электронным пучком поверхностного слоя заэвтектического силумина приводит к формированию в поверхностном слое толщиной до 100 мкм структуры высокоскоростной ячеистой кристаллизации. Размеры ячеек твердого раствора на основе алюминия изменяются в пределах (0,4-0,6) мкм. По границам ячеек располагаются частицы кремния и интерметаллиды округлой формы, размеры которых не превышают 100 нм.

На рисунке 1 приведены электронно-микроскопические изображения поверхности разрушения заэвтектического силумина в исходном состоянии (а) и после облучения интенсивным импульсным электронным пучком (б, в).

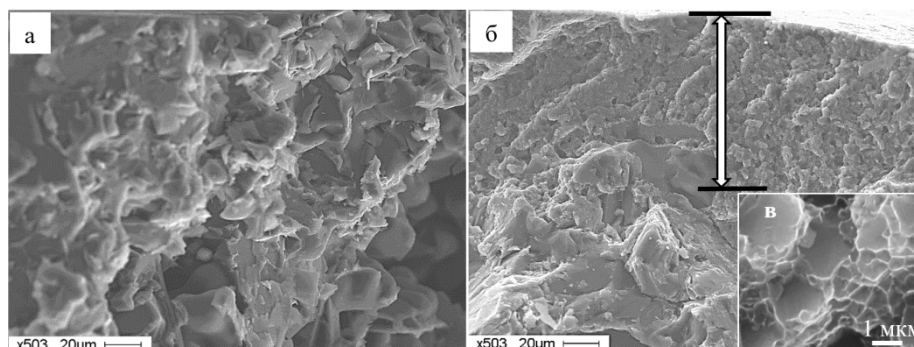


Рис. 1. Структура поверхности разрушения заэвтектического силумина в исходном (литом) состоянии (а) и дополнительно облученного интенсивным импульсным электронным пучком (б, в)

Отчетливо видно, что излом силумина в литом состоянии является преимущественно хрупким (рис. 1, а). Облучение поверхности силумина интенсивным импульсным электронным пучком и последующее разрушение в результате испытания на растяжение сопровождается формированием в поверхностном слое толщиной до 100 мкм (рис. 1, б) ячеек вязкого излома (рис. 1, в). Размеры ячеек изменяются в пределах от 0,5 мкм до 2 мкм. Очевидно, что формирование подобной структуры является следствием высокоскоростной кристаллизации поверхностного слоя силумина, имеющей место при облучении интенсивным импульсным электронным пучком.

Установлено, что облучение литого силумина заэвтектического состава импульсным электронным пучком приводит к увеличению предела прочности материала на разрыв более чем в 70 раз, пластичность облученных образцов увеличивается в ≈ 2 раза по отношению к литому состоянию. Очевидно, что многократное увеличение прочностных и пластических свойств силумина заэвтектического состава обусловлено формированием субмикро- нанокристаллического поверхностного слоя, инициированного облучением интенсивным импульсным электронным пучком.

Заклучение. В результате проведенных исследований установлено, что облучение поверхности образцов литого заэвтектического силумина (содержание кремния (18-20) вес. %) интенсивным импульсным электронным пучком сопровождается многократным увеличением прочностных и пластических свойств материала. Установлено, что основной причиной повышения механических свойств силумина является формирование, в результате высокоскоростной кристаллизации, инициированной облучением импульсным электронным пучком, протяженного (толщиной до 100 мкм) поверхностного слоя с субмикро- нанокристаллической структурой.

Авторы выражают благодарность профессору В.В. Углову (БГУ, Минск) и профессору А.П. Ласковневу (ФТИ НАН Беларуси), предоставившим образцы заэвтектического силумина.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 19-52-04009 Бел_мол_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ласковнев А.П., Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А. и др. Модификация структур и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой. - Минск: Белорусская наука, 2013. - 287 с.
2. Стеценко В.Ю., Баранов К.Н., Гутев А.П. Способ охлаждения отливок из силумина АК15М3 при вертикальном центробежном литье // Литье и металлургия. - - 2013. - №3(72).– С. 116-117.
3. Rygina (Gracheva) M.E., Ivanov Y.F., Laskonev A.P., Teresov A.D., Cherenda N.N., Uglov V.V., Petrikova E.A., Krysina O.V. (2017). Mechanical Properties and Structure of the Hypereutectic Silumin Treated by an Electron Beam. Key Engineering Materials. Vol. 743, pp. 146-150.
4. Rygina (Gracheva) M.E., Ivanov Y.F., Laskonev A.P., Teresov A.D., Cherenda N.N., Uglov V.V., Petrikova E.A., Krysina O.V. (2018). Modification of Hypereutectic Silumin by Ion-Electron-Plasma Method. Key Engineering Materials. Vol. 769, pp. 54-59.
5. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. - М: Стандартинформ. – 2005 – 24 с.
6. Ivanov Yu.F., Petrikova E.A., Ivanova O.V., Ikonnikova I.A., Teresov A.D., Shugurov V.V., Krysina O.V. (2015). Structure and properties of a coating (TiCuN) – substrate (A7) system modified with a high-intensity electron beam. Russian Physics Journal. V.58, Issue 3, pp. 373-379.
7. 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. – Т. 58. – №4. С. 46-51.
8. Рыгина (Грачева) М.Е., Петрикова Е.А., Тересов А.Д. Модифицирование приповерхностного слоя заэвтектического силумина электронно-пучковым методом // Физика твердого тела: сборник материалов XV Российской научной студенческой конференции, Томск, 18-20 Мая 2016. - Томск: ТГУ, 2016 - С. 78-80.