

**МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА,
МОДИФИЦИРОВАННОГО СТУПЕНЧАТО ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ**

*М.Е. РЫГИНА¹, Ю.Ф. ИВАНОВ¹, А.Н. ПРУДНИКОВ², М.С. ПЕТЮКЕВИЧ³, Е.А. ПЕТРИКОВА¹, П.В.
МОСКВИН¹, М.С. ВОРОБЬЕВ¹, О.С. ТОЛКАЧЕВ³*

¹ Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук

² Сибирский государственный индустриальный университет

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет

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

Современное машиностроение требует новых материалов, отличающихся длительным жизненным циклом, хорошей ремонтпригодностью и низкой стоимостью. Алюминиевые сплавы, такие как алькусины, силумины, авиаль и другие за счет комбинации кремния, марганца и меди позволяют упрочнить, увеличить коррозионную стойкость, пластичность алюминия [1].

Силумины – литейный сплав алюминия с кремнием, который отличается высокой коррозионной стойкостью, отсутствие магнитных свойств. Для снижения расхода топлива и уменьшения веса конструкции блоки цилиндров и картеры изготавливают из сплава АК12 [2]. Медистые силумины используются для изготовления деталей мотоциклов [3]. Высокая ремонтпригодность не оставляет сомнений в целесообразности разработки данных сплавов для изготовления деталей машин; применение микрооксидирования позволяет производить восстановление геометрии поверхности [4]. Несмотря на то, что сварка алюминиевых изделий имеет ряд сложностей, таких как склонность к образованию трещин, пористость сварных соединений, наличие тугоплавкой оксидной пленки – для ремонта используется газовая сварка (неответственные изделия толщиной от 0,5 до 10 мм), сварка покрытыми электродами (сплавы АМц и силумины). Так же во время восстановления деталей наплавкой и напылением существует возможность помимо восстановления геометрии повысить долговечность за счет применения материалов с легирующими добавками. Остается возможность использования полимерных материалов: для восстановления корпуса гидромашин типа НШ-У используют состав на основе эпоксидной смолы [4].

При увеличении процентного содержания кремния в силумине и переходе в заэвтектический диапазон снижается коэффициент термического расширения и увеличивается твердость, что делает данный сплав перспективным для изготовления блоков цилиндров, картеров. В то же время увеличивается хрупкость данного сплава из-за выделения избыточного кремния в виде первичных кристаллов. Применение импульсного электронного пучка для модификации поверхности заэвтектического силумина позволяет проводить высокоскоростное плавление поверхностного слоя, нивелируя указанные недостатки структуры.

Материалом для исследования в настоящей работе выбран заэвтектический силумин марки АК20. Данный сплав изготавливали в лабораторной печи. В качестве шихты использовали технически чистый алюминий марки А7 [6] и кремний Кр0 [7]. Сплав изготавливали без модифицирования и рафинирования жидкого металла. Полученные отливки представляли собой прямоугольные пластины размером 55×120×20 мм (без учета прибыли), из которых вырезали образцы размерами 15×15×5 мм для обработки импульсным электронным пучком с целью анализа структурно-фазового состояния и свойств силумина, а также плоские образцы в форме двухсторонних лопаток для испытания на одноосное растяжение в соответствии с ГОСТ 1497-84 [8].

Облучение образцов интенсивным импульсным электронным пучком осуществляли на установке «СОЛО» [9]. В основе работы установки лежит электронный источник с плазменным катодом на основе импульсного дугового разряда низкого давления. Использование катода данного типа позволяет независимо изменять параметры генерации

электронного пучка. Данная установка не требует дополнительной радиационной защиты, так как излучение полностью задерживается стенками камеры. Особенностью режима облучения, использованного в настоящей работе, является ступенчатое снижение плотности энергии пучка электронов, которое позволяет произвести отпуск модифицированного слоя, повысив при этом прочностные характеристики.

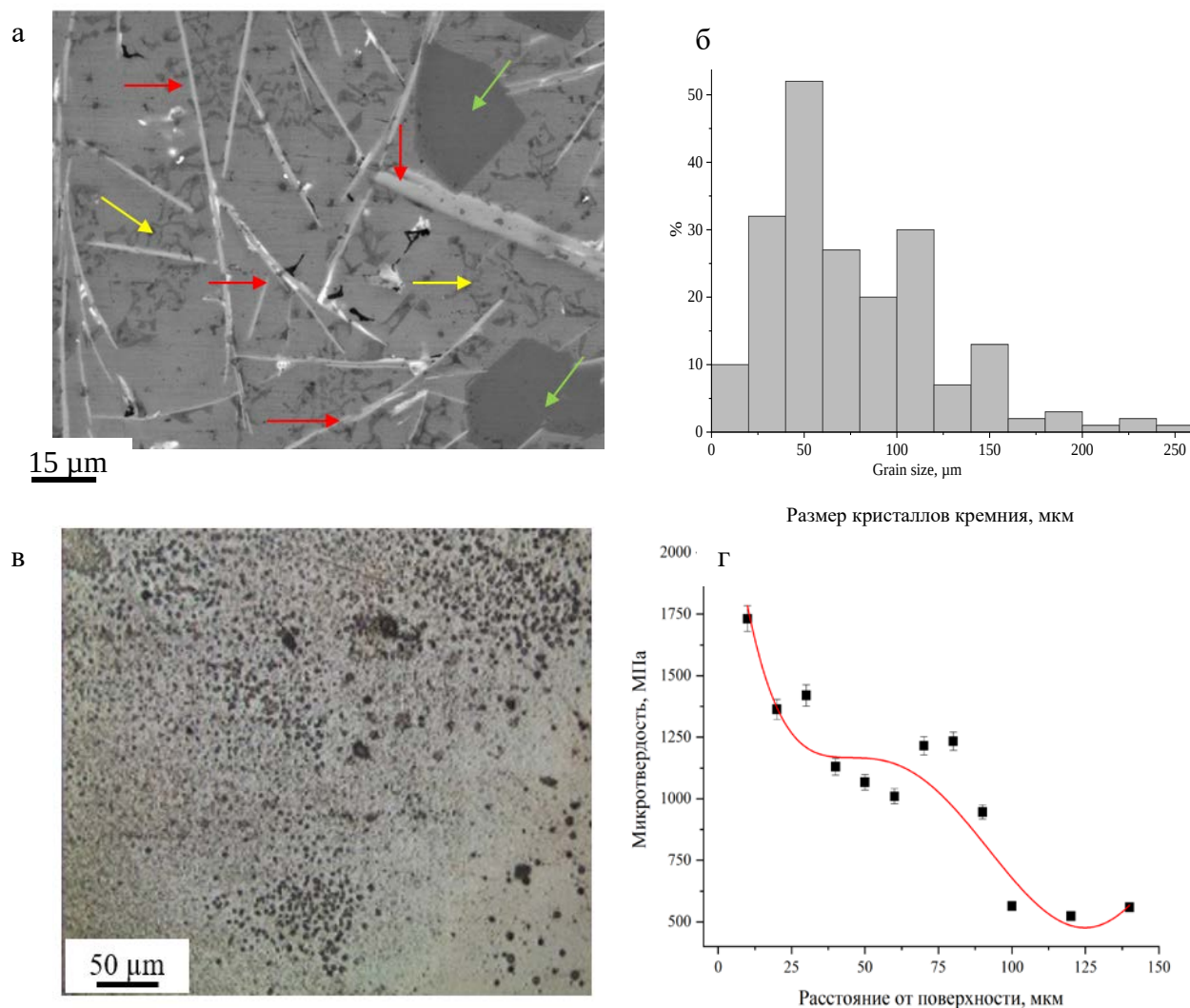


Рисунок 1. Структура заэвтектического силумина до (а) и после (в) модификации импульсным электронным пучком; гистограмма распределения кристаллов кремния по размеру (б); изменение твердости модифицированного образца по глубине (г)

Ступенчатое облучение поверхности образцов проводили в едином вакуумном цикле, в остаточной атмосфере аргона при давлении 0,02 Па по схеме $E_s(50) \rightarrow E_s(30) \rightarrow E_s(18) \rightarrow E_s(9)$ (в скобках указана плотность энергии пучка электронов, Дж/см²). Энергия ускоренных электронов 18 кэВ, частота следования импульса 0,3 с⁻¹, продолжительность одного импульса 150 мкс, суммарное количество импульсов составило 12, т.е. по 3 имп. для каждого значения E_s . Время переключения установки между различной плотностью энергии пучка электронов составляло 15 секунд.

Структура заэвтектического силумина в литом состоянии содержит первичные кристаллы кремния (рисунок 1, а, зеленые стрелки), средний размер которых достигает 120 мкм. Именно первичные кристаллы кремния, имеющие на шлифе форму неправильных многоугольников, приводят к разрушению образца, выступая концентраторами напряжения. Максимальный

размер кристаллов кремния в данном сплаве достигает 250 мкм (рисунок 1, б). Исследуемый сплав характеризуется наличием интерметаллов (рисунок 1, а, красные и желтые стрелки). Облучение сплава импульсным электронным пучком сопровождается высокоскоростным плавлением поверхностного слоя толщиной до 160 мкм (рисунок 1, г). Последующая высокоскоростная кристаллизация сопровождается повторным образованием кристаллов кремния, размер которых не превышает 1–3 мкм (рисунок 1, в). Данные структурные изменения приводят к увеличению износостойкости сплава в 4,4 раза по сравнению с исходным образцом, предел прочности составил 84 МПа. Коэффициент трения незначительно снизился. Среднее арифметическое отклонение профиля поверхности составило $Ra = 0,09$ мкм, высота неровностей профиля по 10 точкам: $Rz = 0,47$ мкм.

Таким образом ступенчатая обработка поверхности заэвтектического силумина импульсным электронным пучком в едином вакуумном цикле приводит к перекристаллизации поверхностного слоя образцов, сопровождающейся многократным (более чем в 100 раз) уменьшением размеров кристаллов кремния и увеличением износостойкости в 4,4 раза по сравнению с исходным материалом. Постепенное снижения плотности энергии пучка электронов в процессе облучения и, как следствие, плавное уменьшению толщины проплавленного слоя, способствует полировке модифицируемой поверхности. Данный метод может быть рекомендован в качестве финишной операции при изготовлении деталей машин и механизмов, таких как поршни и подшипники скольжения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-79-10015-П).

Список литературы

1. Белов Н.А., Савченко С.В., Хван А.В. Фазовый состав и структура силуминов: Справочное издание. – Москва: МИСиС, 2007. – 283 с.
2. Шустов, М.А., Шустов А.В. Выбор современных материалов в автомобилестроении // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы XVIII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции, Екатеринбург, 04–15 апреля 2022 года. – Екатеринбург: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уральский государственный лесотехнический университет", 2022. – С. 521–523.
3. Никулин, Л.В., Журавлев А.И. Медистые силумины для литья под давлением деталей мотоциклов // Литейное производство. – 2009. – № 7. – С. 9–13.
4. Криштал М.М., Ясников И.С., Ивашин П.В., Полунин А.В. О применении технологии микродугового оксидирования для ремонта и восстановления изделий из силуминов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2012. – № 3-3(34). – С. 225–228.
5. Новиков А.Н. Ремонт деталей из алюминия и его сплавов: Учебное пособие для студентов высших учебных заведения по агроинженерным специальностям. – Орел: Орловская государственная сельскохозяйственная академия, 1997. – 57 с.
6. ГОСТ 11069-2001. Алюминий первичный. Марки. – Москва: Изд-во стандартов, 2008. – 6 с.
7. ГОСТ 2169-69. Кремний технический. – Москва: Изд-во стандартов, 2001. – 6 с.
8. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Москва: Изд-во стандартов, 2008. – 6 с.
9. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке // Известия вузов. Физика. – 2008. – Т. 51. – № 5. – С. 60–70.