

## СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОМ СИЛУМИНОВОМ СПЛАВЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОМПРЕССИОННЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ

В.И. Шиманский<sup>1)</sup>, А.Ю. Евдокимов<sup>1)</sup>, Н.Н. Черенда<sup>1)</sup>, Н.В. Бибик<sup>1)</sup>,  
В.М. Асташинский<sup>2)</sup>, А.М. Кузьмицкий<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет,  
пр. Независимости 4, 220030 Минск, Беларусь, [shymanskiv@mail.ru](mailto:shymanskiv@mail.ru)

<sup>2)</sup>Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,  
ул. П. Бровки 15, 220072 Минск, Беларусь, [ast@hmti.ac.by](mailto:ast@hmti.ac.by)

В работе представлены результаты исследования структурно-фазового состояния заэвтектического силуминового сплава, обработанного компрессионными плазменными потоками. В качестве объектов исследования использовались образцы алюминий-кремниевый сплав с содержанием кремния 44.1 ат. %. Воздействие компрессионными плазменными потоками осуществлялось в остаточной атмосфере азота при плотностях поглощенной энергии от 26 до 45 Дж/см<sup>2</sup>. В результате экспериментов установлено формирование модифицированного приповерхностного слоя толщиной от 5 до 20 мкм, в котором происходит растворение крупных (несколько десятков мкм) включений кремния и интерметаллидных включений, а также формирование мелкокристаллической структуры.

**Ключевые слова:** заэвтектический силумин; структура; фазовый состав; компрессионные плазменные потоки; модифицирование.

## STRUCTURE CHANGES IN HYPEREUTECTIC SILUMIN ALLOY AFTER COMPRESSION PLASMA FLOW IMPACT

Vitali Shymanski<sup>1)</sup>, Anton Jevdokimov<sup>1)</sup>, Nikolai Cherenda<sup>1)</sup>, Natalia Bibik<sup>1)</sup>,  
Valiantsin Astashynski<sup>2)</sup>, Anton Kuzmitski<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, [shymanskiv@mail.ru](mailto:shymanskiv@mail.ru)

<sup>2)</sup>A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of national Academy of Science of Belarus,  
15 P. Brovki Str., 220072 Minsk, Belarus, [ast@hmti.ac.by](mailto:ast@hmti.ac.by)

The results of structure and phase composition investigation in hypereutectic silumin alloy treated with compression plasma flow are presented. The research samples were made from aluminum – silicon alloy with silicon concentration 44.1 at. %. The compression plasma flows impact was provided in the residual nitrogen atmosphere at the absorbed energy density changed from 26 to 45 J/cm<sup>2</sup>. In the results of the experiments the formation of modified surface layer with a thickness of 5-20 μm was found. In the modified layer the coarse silicon particles as well as intermetallics are dispersed.

**Keywords:** hypereutectic silumin; structure; phase composition; compression plasma flow; modification.

### Введение

Заэвтектические силуминовые сплавы представляют собой алюминий-кремниевые сплавы, содержание кремния в которых превышает 12 вес. % (эвтектическая концентрация), которая обеспечивает повышенную твердость сплава и, как следствие, особую перспективность для использования в машиностроении и приборостроении (например, для изготовления деталей двигателей внутреннего сгорания или миниатюрных подшипников) [1]. Силумины являются дешевыми сплавами, обладающими хорошей коррозионной стойкостью и литейными свойствами, малым удельным весом. Однако повышение в сплаве концентрации кремния сопровождается увеличением газонасыщения материала, что приводит к росту количества и размеров пор, достигающих нескольких десятков микрометров, и, соответственно, к снижению служебных характеристик изделия. Другим существенным недостатком силуминов заэвтектического состава является наличие крупных (сотни микрометров) кристаллов первичного кремния, охрупчивающего материал. В совокупности, указанные недостатки силуминов заэвтектического состава существенным образом сужают сферу его применения в промышленности.

Обработка силуминовых сплавов доэвтектического состава интенсивными импульсными электронными пучками или потоками компрессионной плазмы, как показали предварительно выполненные исследования, позволяет путем многократного плавления поверхностного (толщиной в сотни микрометров) слоя образца, сформировать плотный поверхностный слой, имеющий субмикро- или наноразмерную структуру с повышенной плотностью, обладающую вследствие этого повышенными служебными характеристиками. Дополнительное легирование приповерхностного слоя материала, осуществляемое путем высокоэнергетической обработки системы «металлическое покрытие/(силумин) подложка», предоставляет возможность сформировать в поверхностном слое высокоплотную многофазную и многоэлементную, субмикро- или наноразмерную структуру, упрочненную наноразмерными включениями вторых фаз (силициды, алюминиды, интерметаллиды). Последнее является дополнительным механизмом повышения служебных характеристик материала. Целью настоящей работы являлось изучение структурно-фазового состояния заэвтектического силуминового сплава, обработанного компрессионными плаз-

менными потоками (КПП) с различной плотностью поглощенной энергии.

### Основная часть

В качестве объектов исследования использовались образцы заэвтектического силуминового сплава в виде пластин размером 1×1 см и толщиной 5 мм. Образцы обрабатывались потоками компрессионной плазмы, генерируемыми магнитоплазменным компрессором компактной геометрии в остаточной атмосфере азота (давление 400 Па) [2]. Длительность импульса воздействия плазменного потока составляло 100 мкс. Обработка происходила при напряжении на системе конденсаторов 4,0 кВ при изменении расстояния между поверхностью обрабатываемого образца и срезом электродов в магнитоплазменном компрессоре от 14 до 6 см. Это позволило варьировать плотность энергии, поглощаемую образцом заэвтектического силуминового сплава от 26 до 45 Дж/см<sup>2</sup>. Воздействие КПП осуществлялось тремя последовательными импульсами, следующими друг за другом с интервалом времени 20 с, что позволяло формировать однородные по структурно-фазовому состоянию приповерхностные слои.

В работе исследовался фазовый состав модифицированных слоев с помощью рентгеноструктурного анализа на дифрактометре Ultima IV Rigaku в геометрии параллельных пучков с использованием медного излучения (длина волны 0,154178 нм). Элементный состав образцов определялся методом рентгеноспектрального микроанализа на установке Oxford MaxN, работающего совместно с растровым электронным микроскопом (РЭМ) LEO 1455 VP, с помощью которого также анализировалась микроструктура поперечных шлифов.

Результаты рентгеноструктурного анализа позволили выявить присутствие двух основных фаз в исходном состоянии заэвтектического силуминового сплава: алюминия (параметр решетки 0,404 нм) и кремния (параметр решетки 0,542 нм). Соответствующие табличные значения параметров решетки равны 0,405 нм и 0,543 нм. Помимо этого, в образцах обнаружено присутствие незначительного количества интерметаллидных соединений.

После воздействия КПП с плотностью поглощенной энергии от 26 до 45 Дж/см<sup>2</sup> (рис. 1) фазовый состав модифицированного слоя сохраняется и параметры решетки алюминия и кремния не изменяются. Это свидетельствует об отсутствии взаимного проникновения атомов кремния и алюминия в кристаллическую решетку друг друга.

Исследование поперечных шлифов заэвтектических силуминовых сплавов позволило обнаружить наличие больших пор размером до 500 мкм (рис. 2). Помимо этого, на изображении микроструктуры присутствуют светлые участки длиной около 100 мкм и толщиной несколько десятком микрометров. Элементный анализ показал, что данные участки содержат преимущественно Fe (0,71 ат. %), Mg (0,54 ат. %), Cu (0,44 ат. %), Ni (0,34 ат. %), в скобках указаны средние концентрации элементов по всему объему сплава.

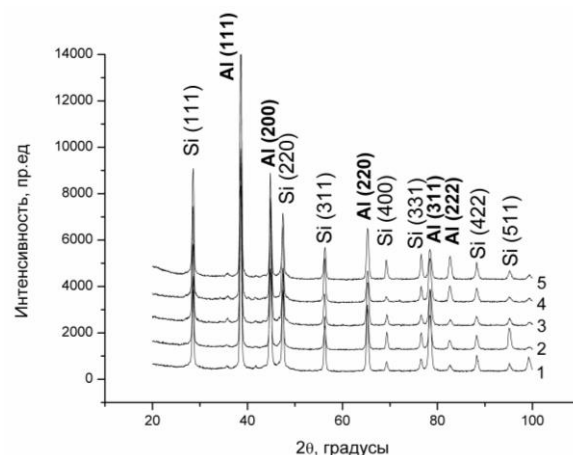


Рис. 1. Рентгенограммы образцов заэвтектического силумина, обработанных КПП при различных плотностях поглощенной энергии

Fig. 1. XRD patterns of the hypereutectic silumin alloys after CPF treatment

Элементный анализ также позволил установить, что среднее содержание кремния в силуминовом сплаве составляет 44,1 ат. %.

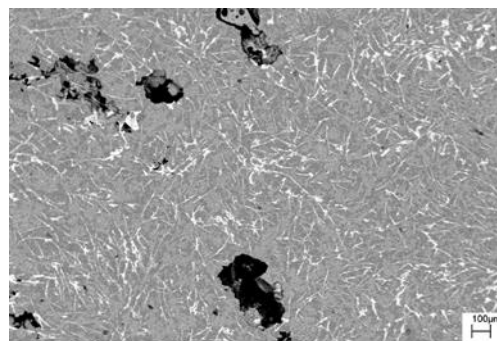


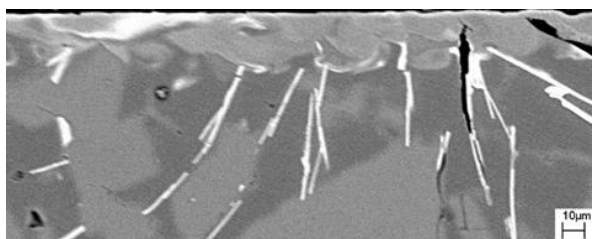
Рис. 2. РЭМ-изображение участка поперечного шлифа заэвтектического силуминового сплава в исходном состоянии

Fig. 2. SEM-image of the as-received hypereutectic alloy

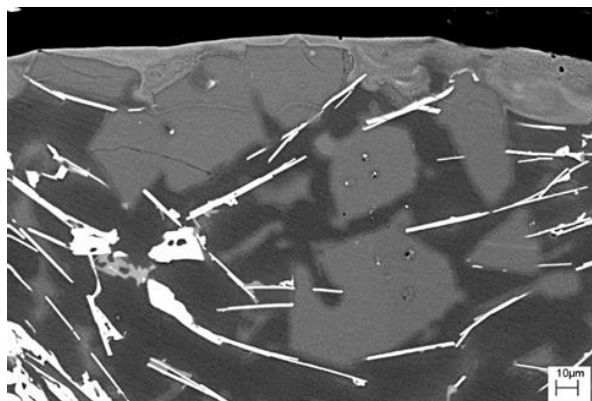
После воздействия КПП с выбранными значениями плотности поглощенной энергии происходит плавление приповерхностного слоя, глубина которого увеличивается с повышением плотности энергии (рис. 3). Так, на РЭМ-изображениях поперечных шлифов заэвтектических сплавов можно заметить приповерхностный слой, в котором произошла гомогенизация элементного состава. Это является результатом жидкофазного перемешивания расплава, обусловленного воздействием плазменного потока. Глубина расплавленного слоя составляет около 5 мкм при плотности поглощенной энергии 26 Дж/см<sup>2</sup> и увеличивается до 20 мкм при плотности поглощенной энергии 45 Дж/см<sup>2</sup>. Следует отметить, что глубина расплавленного слоя не остается постоянной по всей площади образца, что особенно явно проявляется при минимальной плотности поглощенной энергии (26 Дж/см<sup>2</sup>). Это является результатом существенного отличия температур плавления кремния и алюминия, а также хаотическим распределением кремниевых включений.

В исходном состоянии в сплаве наблюдались достаточно крупные включения кремния, размер которых достигал 100 мкм (светлые области в объеме материала). После плавления плазменным потоком происходит взаимное перемешивание кремния и алюминия, однако система остается двухфазной, о чем свидетельствуют результаты рентгеноструктурного анализа.

Также на РЭМ-изображениях поперечных шлифов можно заметить наличие переходного контраста между областями кремния и алюминия, которое характерно для приповерхностной области образца. Появление таких областей является результатом граничного плавления кремния и алюминия, где температура плавления соответствует температуре плавления эвтектики, однако не достигает температуры плавления отдельных компонент.



а(а)



б(б)

Рис. 3. РЭМ-изображение поперечного шлифа заэвтектического силуминового сплава после воздействия КПП с плотностью поглощенной энергии 45 Дж/см<sup>2</sup> (а) и 26 Дж/см<sup>2</sup> (б)

Fig. 3. SEM-image of the hypereutectic silumin alloys after CPF treatment at energy 45 J/cm<sup>2</sup> (a) and 26 J/cm<sup>2</sup> (b)

Также следует обратить внимание на расплавление интерметаллидных включений в модифицированном слое. Ввиду того, что средний состав модифицированного слоя (с учетом металлов) соответствует составу после воздействия КПП, можно сделать вывод о том, что частицы интерметаллидов расплавляются, а их компоненты растворяются в сформировавшихся фазах. Однако ввиду сохранения параметров решетки кремния и алюминия до и после воздействия КПП следует ожидать минимального проникновения атомов металлов в кри-

сталлические решетки кремния и алюминия, а их преимущественное распределение по границам зерен.

Детальное изучение микроструктуры модифицированного в результате расплавления приповерхностного слоя показало наличие мелкокристаллической структуры (рис. 4). В структуре обнаруживаются мелкие включения алюминия (темные области) неправильной формы, между которых расположена кремниевая матрица.

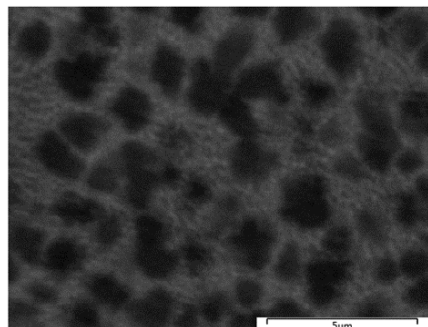


Рис. 4. РЭМ-изображение мелкодисперсной структуры заэвтектического силуминового сплава после воздействия КПП при плотности поглощенной энергии 45 Дж/см<sup>2</sup>

Fig. 4. SEM-image of the dispersed structure hypereutectic silumin alloys after CPF treatment at energy 45 J/cm<sup>2</sup>

### Заключение

Таким образом, в работе проведена модификация приповерхностного слоя заэвтектического силуминового сплава с концентрацией кремния 44,1 ат. % компрессионными плазменными потоками с плотностью поглощенной энергии от 26 до 45 Дж/см<sup>2</sup>. Установлено формирование модифицированного приповерхностного слоя толщиной от 5 до 20 мкм, в котором происходит растворение крупных (несколько десятков мкм) включений кремния и интерметаллидных включений, а также формирование мелкокристаллической структуры.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Т19РМ-091).

### Библиографические ссылки / References

1. Cherenda N.N., Uglov V.V., Laskovnev A.P., Gusakova S.V., Astashynski V.M., Kuzmicki A.M. Modification of Al–20%Si hypereutectic alloy structure by compression plasma flow treatment. *High Temperature Material Processes* 2013;17(2–3):91-99.
2. Shymanski V.I., Cherenda N.N., Uglov V.V., Astashynski V.M., Kuzmitski A.M. Structure and phase composition of Nb/Ti system subjected to compression plasma flows impact. *Surface and Coatings Technology* 2015; 278: 183-189.