

## ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СПЛАВА Al-22Si С ПОКРЫТИЕМ ХРОМА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

Н.Н. Черенда<sup>1)</sup>, С.А. Толкачев<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, Минск 220030, Беларусь,  
cherenda@bsu.by, steptolk2000@gmail.com, bibiknv.bsu.by

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

Исследовано структурно-фазовое состояние и изменение микротвёрдости сплава Al-22%Si с покрытием хрома, подвергнутого воздействию компрессионных плазменных потоков. Плазменное воздействие приводит к формированию модифицированного приповерхностного слоя толщиной до 40 мкм с гомогенным распределением элементов покрытия и подложки. В модифицированном слое образуются хром-содержащие интерметаллиды и силициды, формирующие мелкодисперсную ячеистую и дендритную структуры слоя соответственно. В результате плазменной обработки происходит увеличение микротвёрдости поверхности в 3.5 раза.

**Ключевые слова:** заэвтектический силумин; компрессионные плазменные потоки; хром; растровая электронная микроскопия; рентгеноструктурный анализ.

## CHANGES IN COMPOSITION, STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE Al-22Si CHROMIUM-COATED ALLOY EXPOSED TO COMPRESSION PLASMA FLOWS

N.N. Cherenda<sup>1)</sup>, S.A. Tolkachov<sup>1)</sup>, N.V. Bibik<sup>1)</sup>, V.M. Astashinski<sup>2)</sup>, A.M. Kuzmitski<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus,  
cherenda@bsu.by, steptolk2000@gmail.com, bibiknv.bsu.by

<sup>2)</sup>A.V.Lykov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of sciences of Belarus,  
15 P. Brovka Str., 220072 Minsk, Belarus, ast@hmti.ac.by, antey@hmti.ac.by

The structural-phase state and microhardness changes of the Al-22%Si alloy coated with chromium exposed to compression plasma flows were investigated. Plasma impact led to the formation of a modified near-surface layer with a homogeneous distribution of coating and substrate elements up to 40 microns thick. Chromium containing intermetallic compounds and silicides were observed in the modified layer forming finely dispersed cellular and dendritic structures of the layer, respectively. As a result of plasma treatment, the microhardness of the surface increases by 3.5 times.

**Keywords:** hypereutectic silumin; compression plasma flows; chromium; scanning electron microscopy; X-ray diffraction analysis.

### Введение

Заэвтектические силумины – сплавы алюминия и кремния с концентрацией последнего более 13% являются перспективными конструкционными материалами. Они обладают высокой износо- и коррозионной стойкостью, малыми удельной массой и коэффициентом термического расширения. Однако в заэвтектических силуминах присутствуют крупные включения

кремния, что приводит к высокой хрупкости сплавов.

Добиться диспергирования структуры и уменьшения размеров кристаллов кремния в поверхностном слое можно путём обработки компрессионными плазменными потоками (КПП). Воздействие высокоэнергетических пучков приводит к плавлению поверхностного слоя материала, перемешиванию расплава и его сверхбыстрому

охлаждению, что позволяет диспергировать структуру, а также синтезировать новые метастабильные фазы и интерметаллиды [1, 2].

Нанесение покрытия Cr толщиной 2 мкм на подложку сплава с составом 22.3% Si, 1.3% Fe, 0.8% Mg, 0.6% Cu, 0.3% Ni, ост. Al производилось вакуумно-дуговым методом. Обработка образцов осуществлялась тремя импульсами КПП длительностью 100 мкс в диапазоне изменения плотности энергии, поглощенной поверхностным слоем образца 22-35 Дж/см<sup>2</sup> за импульс. В качестве рабочего вещества использовался азот, его давление в вакуумной камере - 3 Тор. Напряжение на конденсаторной батарее 4 кВ. Рентгеноструктурные исследования проводились на дифрактометре Rigaku Ultima IV с использованием излучения меди ( $\lambda=0.154178$  нм,  $K\alpha_1$ ). Анализ морфологии поверхности был выполнен с использованием растрового электронного микроскопа Carl Zeiss LEO 1455VP с ускоряющим напряжением 20 кВ. Микротвёрдость измерялась на твердометре WilsonInstruments 402MVD при нагрузке 0.25 Н методом Виккерса.

### Результаты и их обсуждение

Воздействие компрессионных плазменных потоков приводит к изменению фазового состава анализируемого слоя. Дифракционные пики от покрытия хрома, наблюдаемые в исходном образце, исчезают после плазменного воздействия. На дифрактограммах обработанных образцов появляются дифракционные пики интерметаллида  $Al_{17}Cr_{20}Si_6$  и силицида  $(Si, Al)_2Cr$ , что говорит о формировании модифицированного поверхностного слоя, легированного атомами хрома.

Анализ морфологии и элементного состава поверхности показал, что при увеличении плотности поглощенной энергии происходит полное растворение покрытия хрома в расплавленном слое. Кроме того, наблюдается уменьшение концентрации хрома в результате эрозии поверхности, достигающей 28 мкг/мм<sup>2</sup> при плотности

поглощённой энергии 30 Дж/см<sup>2</sup>. Определив исходную концентрацию хрома и сопоставив её с концентрацией после плазменного воздействия, было определено, что за счет эрозии удаляется до четверти толщины покрытия. Основными механизмами эрозии являются гидродинамическое течение расплава и испарение [3].

На поверхности образцов, обработанных КПП с плотностью поглощённой энергии 30 и 35 Дж/см<sup>2</sup> формируются преципитаты субмикронного размера с повышенным содержанием кремния. Соотношение хрома и кремния в этих структурах ~ 1:2, что позволяет определить их как  $(Si, Al)_2Cr$ .

Исследование морфологии поперечного сечения исходного образца показало наличие крупных первичных кристаллов кремния размерами до 200 мкм, а также интерметаллидных фаз, содержащих Fe, Mg, Ni и Cu. Воздействие КПП приводит к жидкофазному перемешиванию элементов покрытия и подложки и формированию модифицированного приповерхностного слоя толщиной до 40 мкм, с гомогенным распределением элементов покрытия и силицидной подложки. Легированные элементы сплава также входят в состав данного слоя, и могут образовывать твёрдые растворы с хром-содержащими интерметаллидами и силицидами.

При анализе модифицированного слоя было выделено два типа преципитатов, первый из которых возникает на участках, где в приповерхностном слое отсутствуют первичные кристаллы кремния, формирующийся в виде мелкодисперсных интерметаллических равноосных включений с характерным размером 100-400 нм (рис. 1); и второй тип - дендритные преципитаты силицидов, образованных вследствие плавления первичных кристаллов кремния (рис. 2).

Микротвёрдость модифицированного слоя увеличивается с ростом плотности поглощённой энергии, и составляет 1.1 ГПа для исходного сплава и 3.8 ГПа при воздействии с плотностью поглощенной энер-

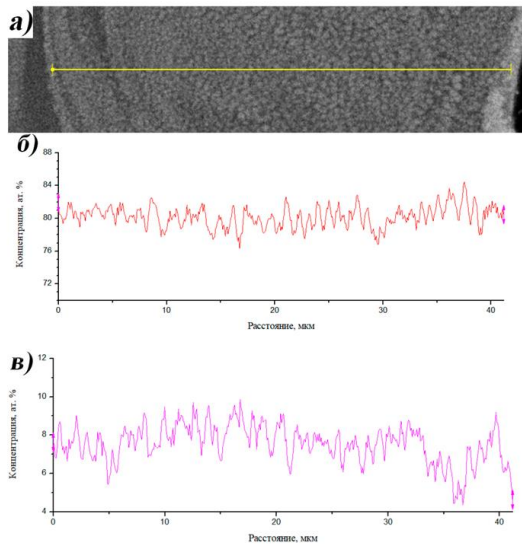


Рис. 1. Морфология поперечного сечения (а), распределение алюминия (б) и хрома (в) по линии для образца после воздействия плазменных потоков при плотности поглощенной энергии 26 Дж/см<sup>2</sup>

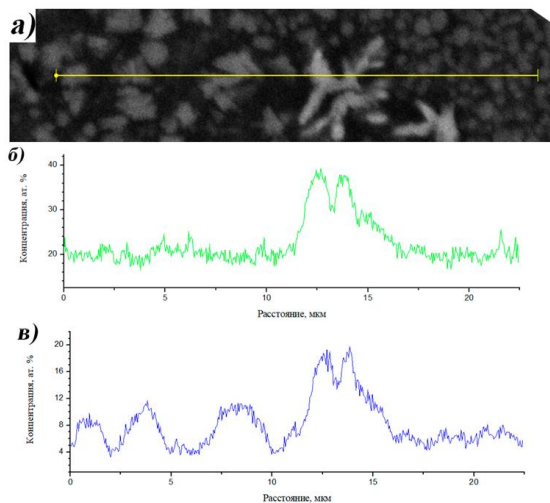


Рис. 2. Морфология поперечного сечения (а), распределение кремния (б) и хрома (в) по линии для образца после воздействия плазменных потоков при плотности поглощенной энергии 35 Дж/см<sup>2</sup>

30 Дж/см<sup>2</sup>. Причинами увеличения микротвёрдости могут быть диспергированные структуры вследствие сверхбыстрой

кристаллизации из расплава, образование интерметаллических соединений и силицидов.

### Заключение

Воздействие компрессионных плазменных потоков с плотностью поглощённой энергии в диапазоне 22-35 Дж/см<sup>2</sup> на заэвтектический силумин с покрытием хрома приводит к плавлению приповерхностного слоя и перемешиванию в нём элементов покрытия и подложки. В результате воздействия формируется модифицированный слой с однородным распределением элементов.

В модифицированном слое наблюдается образование мелкодисперсной ячеистой структуры, содержащей интерметаллид Al<sub>74</sub>Cr<sub>20</sub>Si<sub>6</sub>, и дендритной структуры, содержащей силицид (Si, Al)<sub>2</sub>Cr.

Обработка КПП обуславливает увеличение микротвёрдости до 3.8 ГПа при плотности поглощенной энергии 30 Дж/см<sup>2</sup>.

### Библиографические ссылки

1. Hao Y., Gao B., Tu G.F., Li S.W., Hao S.Z., Dong C. Surface modification of Al-20Si alloy by high current pulsed electron beam. *Applied Surface Science* 2011; 257: 3913-3919.
2. Shymanski V.I., Jevdokimovs A., Uglov V.V., Chereda N.N., Astashynski V.M., Kuzmitsky A.M., et al. Modification of the Structure of the Hypereutectic Silumin Alloy Al-44Si under the Action of Compression Plasma Flows. *Inorganic Materials: Applied Research* 2022; 13(3): 701-709.
3. Черенда Н.Н., Лейви А.Я., Углов В.В., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М., Яловец А.П., Басалай А.В. Механизмы эрозии поверхности металлов при воздействии компрессионных плазменных потоков. *Известия высших учебных заведений* 2015; 58(9/3): 159-16