

### Список литературы

1. Корниенко Е.Е., Муль Д.О., Рубцова О.А., Ващенко С.П., Кузьмин В.И., Гуляев И.П., Сергачёв Д.В. Влияние режимов плазменного напыления на структуру и свойства покрытий из  $\text{Ni}_3\text{Al}$  // Теплофизика и аэромеханика. - 2016. - Т. 23. №6. - С. 957-966.
2. Лашенко Г.И. Плазменное упрочнение и напыление. - К.: Екотехнологія, 2003. – 64 с.
3. Рубцова О. А. Исследования структуры и свойств плазменных покрытий, полученных из порошка ПН85Ю15 = Research of structure and properties of 85Ni15Al plasma coatings / О. А. Рубцова, Е. Е. Корниенко // Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении : сб. тр. междунар. конф., Томск, 9–11 июня 2016 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – С. 161-165.

### ИОННО-ЭЛЕКТРОННО-ПЛАЗМЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ СИСТЕМЫ «ПОКРЫТИЕ ( $\text{TiZrCu}$ ) \ ПОДЛОЖКА ( $(\text{Al}-(22-24)\%\text{Si})$ )»

М.Е. РЫГИНА<sup>1,2</sup>, Ю.Ф. ИВАНОВ<sup>1,2</sup>, Е.А. ПЕТРИКОВА<sup>2</sup>, А.Д. ТЕРЕСОВ<sup>2</sup>, В.В. ШУРУГОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет

<sup>2</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН

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

Силумины-сплав алюминия с кремнием. Заэвтектические силумины содержат кремния более 12 вес. % в своем составе. Данный сплав обладает малым весом, коррозионной стойкостью. Структура заэвтектических силуминов состоит из эвтектики, первичных зерен кремния и интерметаллидов. Первичные зерна кремния имеют большой размер (несколько сотен микрометров), что снижает механические свойства и ограничивает применение материала в машиностроении.

В качестве материала исследования использовали образцы силумина состава  $\text{Al}-(22-24)$  вес. %  $\text{Si}$ . Систему «пленка ( $\text{Zr-5\%Ti-5\%Cu}$ ) / ( $\text{Al}-(22-24)$  вес. %  $\text{Si}$ ) подложка» формировали ионно-плазменным методом при электродуговом распылении катода состава  $\text{Zr-5\%Ti-5\%Cu}$  на установке «ТРИО» (ИСЭ СО РАН) [1]. Толщина пленки 0,5 мкм.

Металлическая пленка, сформированное на поверхности силумина, содержала капельную фракцию; основной элемент капель - цирконий. Размеры капель изменялись в пределах от единиц до нескольких десятков микрометров. Методами рентгеноструктурного анализа установлено, что наряду с фазами, формирующими подложку ( $\text{Al}$  и  $\text{Si}$ ), присутствуют фазы, сформировавшиеся при напылении пленки ( $\text{Ti}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $\text{CuZr}$  и  $\text{SiC}$ ) (рисунок 1).

Обработку системы «пленка-подложка» осуществляли интенсивным импульсным электронным пучком на установке «СОЛО» [2]. Режим облучения соответствовал условиям плавления всех присутствующих в силумине фаз [3]: энергия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов  $40 \text{ Дж/см}^2$ , частота следования импульсов  $0,3 \text{ с}^{-1}$ , длительность воздействия пучка электронов 200 мкс, число импульсов воздействия 20.

Вследствие высоких скоростей нагрева и охлаждения после обработки электронным пучком на поверхности образцов не обнаруживается наличие капельной фракции, происходит легирование поверхностного слоя силумина заэвтектического состава элементами напыленной пленки. Высокоскоростная кристаллизация сопровождается формированием в поверхностном слое силумина толщиной (100-130) мкм поликристаллической структуры с размером кристаллитов (0,5-1) мкм.

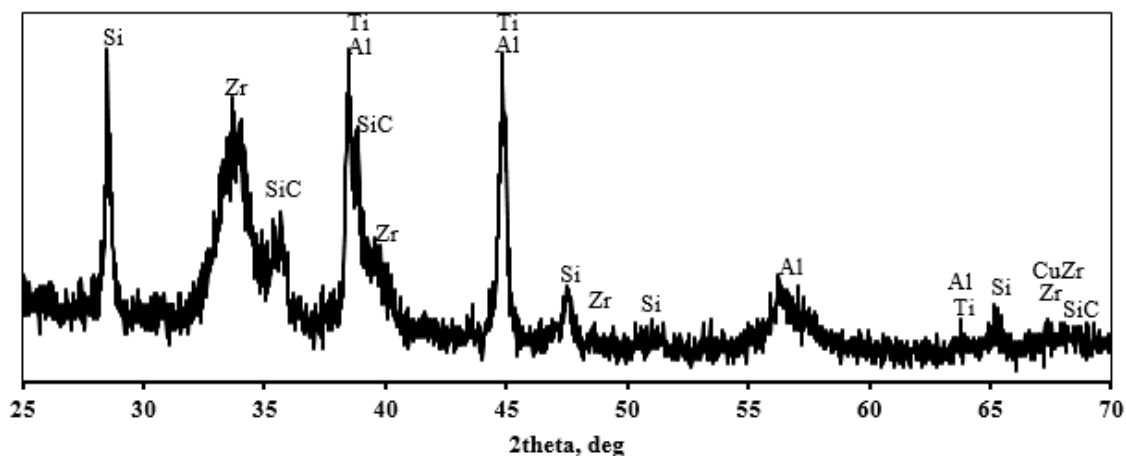


Рисунок 1 – Участок рентгенограммы поверхностного слоя системы «пленка ((Zr-5%Ti-5%Cu) / (Al-(22-24) вес. % Si) подложка»

Рентгенофазовый анализ материала, облученного электронным пучком, показал, что основными фазами поверхностного сплава являются алюминий и кремний (63,5%-Al, 32,1%-Si). Дополнительными фазами, образовавшимися в результате плавления системы пленка/подложка, являются  $\text{Cu}_{9,1}\text{Al}_{31,2}\text{Si}_{0,78}$ ,  $\text{Fe}_3\text{Al}_{0,5}\text{Si}_{0,5}$ , Ti (рисунок 2).

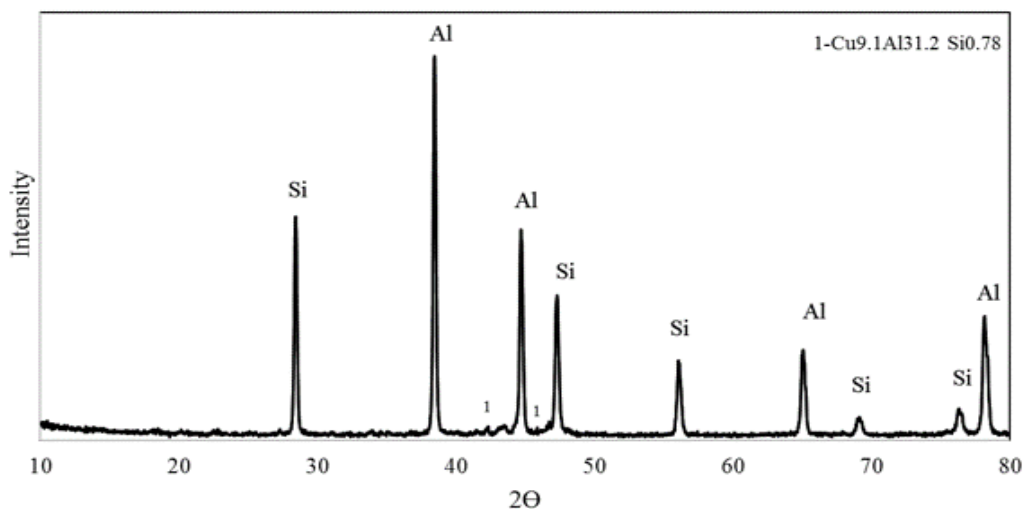


Рисунок 2-Участок рентгенограммы поверхностного слоя системы «пленка ((Zr-5%Ti-5%Cu) / (Al-(22-24) вес. % Si) подложка», облученной интенсивным импульсным электронным пучком (1 –  $\text{Cu}_{9,1}\text{Al}_{31,2}\text{Si}_{0,78}$ )

Формирование системы «пленка ((Zr-5%Ti-5%Cu) / (Al-(22-24) вес. % Si) подложка» приводит к снижению микротвердости поверхностного слоя до 2310 МПа, т.е. в  $\approx 1,5$  раза; коэффициент износа системы «пленка/подложка» равен  $5,8 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$ , что соответствует износостойкости силумина в литом состоянии.

Формирование поверхностного сплава путем плавления системы «пленка ((Zr-5%Ti-5%Cu) / (Al-(22-24) вес. % Si) подложка» интенсивным импульсным электронным пучком сопровождается снижением микротвердости легированного слоя до 2060 МПа, т.е. в  $\approx 1,7$  раза; коэффициент износа силумина равен  $2,1 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$ , что превышает износостойкость исходного литого силумина в  $\approx 2,6$  раза. Коэффициент трения материала составил 0,39, что в 1,1 раза меньше коэффициента трения литого силумина.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект №16-58-00075-Бел\_а). Авторы благодарны профессору А.П. Ласковневу (ФТИ НАН, Республика*

Беларусь) и профессору В.В. Углову (БГУ, Минск, Республика Беларусь) за любезно предоставленные образцы заэвтектического силумина.

#### Список литературы

1. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов / под ред. Н.Н. Ковалья, Ю.Ф. Иванова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2016. – 312 с.
2. 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.
3. 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

#### ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ТИТАН-ТАНТАЛ-ЦИРКОНИЕВЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА, ВЫВЕДЕННОГО В ВОЗДУШНУЮ АТМОСФЕРУ

В.В. САМОЙЛЕНКО<sup>1</sup>, И.А. ПОЛЯКОВ<sup>1</sup>, М.Г. ГОЛКОВСКИЙ<sup>2</sup>, О.Э. МАТЦ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет

<sup>2</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

E-mail: [samoilenko.vitaliy@mail.ru](mailto:samoilenko.vitaliy@mail.ru)

Современный уровень развития химической промышленности выдвигает всё новые требования к материалам, работающим в условиях постоянного воздействия различного рода коррозионных сред. Материалы подобного типа должны обладать высоким комплексом механических и антикоррозионных свойств. Одним из материалов, способных обеспечить перечисленные свойства, является титан. Для титана характерна высокая удельная прочность, пластичность и коррозионная стойкость при низкой плотности самого металла. Недостатком металла является низкая стойкость в горячих кислотах. Воздействие данных сред способствует растворению поверхности с большой скоростью, что не позволяет использовать его в подобных условиях. Поскольку коррозии подвергаются только участки, находящиеся в зоне контакта со средой, то в таком случае создание защитных слоёв с высоким уровнем коррозионной стойкости на поверхности металла позволит решить эту проблему. Кроме того, такой подход позволит сохранить комплекс механических свойств титановой основы.

В работах [1, 2] проблема повышения коррозионной стойкости была решена путём поверхностного легирования титановых заготовок танталом и цирконием. Уровень коррозионной стойкости в кипящих разбавленных растворах соляной кислоты увеличился более чем в 17 раз по сравнению с технически чистым титаном [1]. В кипящих растворах концентрированной азотной кислоты совместная наплавка Та и Zr позволила снизить скорость коррозии в 7 раз [2]. Следует отметить, что во всех случаях строение наплавленного слоя было представлено структурой пластинчатого типа. С точки зрения коррозионной стойкости данная морфология является неблагоприятной, поскольку возможно образование гальванопар между пластинами и пространством между ними. Кроме того, каждая граница пластины будет служить дополнительным концентратором напряжений в формирующейся пленке. По этой причине получение однофазной структуры в Ti-Ta-Zr сплавах является одним из способов увеличения коррозионной стойкости без изменения элементного состава.