

8. G.A. Pribytkov, M.N. Khramogin, V.G. Durakov, and V.V. Korzhova. Coatings produced by electron beam surfacing of composite materials consisting of titanium carbide and a binder of high-speed R6M5 tool steel. *Welding international*. Vol. 22, No. 7, July 2008, pp. 465-467.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЛЕГИРОВАНИЯ СИЛУМИНА ИОННО-ЭЛЕКТРОННО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ

М.Е. РЫГИНА¹, О.В. КРЫСИНА², А.Д. ТЕРЕСОВ², Ю.Ф. ИВАНОВ^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет

²Институт сильноточной электроники Сибирского отделения
Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)

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

OPTIMIZATION OF PROCESSES ALLOYING SILUMIN BY IONIC-BEAM-PLASMA METHOD

M.E. RYGINA¹, O.V. KRISINA², A.D. TERESOV², YU. F. IVANOV^{1,2}

¹Tomsk Polytechnic University

²Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

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

Annotation. The surface morphology, chemical composition, microstructure, nanohardness, and tribological properties of a film silumin on aluminum were investigated. The film (Al-25% Si) / substrate (Al-12% Si) has modified by ion-electron-plasma method. The wear resistance and hardness of a slight increase in 1.3 times.

Введение. Силумины (сплавы алюминий-кремний) занимают ведущие позиции во многих отраслях промышленности, несмотря на значительный прогресс материаловедения в области создания новых сплавов и композитов, превосходящих силумины по свойствам [1]. Это связано с их относительно низкой стоимостью и высокими удельными характеристиками. Основным недостатком силуминов – сравнительно низкие прочностные свойства и повышенная хрупкость, что существенно сужает сферу их применения.

Цель данного исследования заключается в разработке метода формирования поверхностного слоя силумина с повышенными прочностными и трибологическими свойствами.

Материал и методики исследования. На первом этапе обработки на образцы силумина марки АК12 (Al-12%Si) напыляли тонкую (0,5 мкм и 1,0 мкм) пленку силумина методом распыления образца силумина с концентрацией кремния 23 % высокоинтенсивным импульсным электронным пучком, т.е. формировали систему пленка / подложка. На втором этапе систему пленка / подложка облучали высокоинтенсивным импульсным электронным пучком при плотности энергии пучка электронов $E_S = 15 \text{ Дж/см}^2$ и 20 Дж/см^2 , длительности воздействия пучка электронов 150 мкс, количестве импульсов 5, частоте следования импульсов $0,3 \text{ с}^{-1}$ с целью формирования поверхностного сплава на основе алюминия, обогащенного кремнием.

Результаты исследования и их обсуждение. Анализируя результаты, представленные на рис. 1, можно отметить, что облучение системы пленка / подложка электронным пучком приводит к формированию на поверхности силумина морфологически разнообразной многофазной структура. Включения кремния при толщине пленки 0,5 мкм имеют глобулярную форму (рис. 1, а, б); при толщине пленки 1,0 мкм – островковую форму (рис. 1, в, г).

Результаты количественного анализа структуры поверхности системы пленка / подложка, облученной высокоинтенсивным импульсным электронным пучком, представлены в таблице 1. Анализируя представленные в табл. 1 результаты, можно отметить, что электронно-пучковая обработка системы пленка/подложка приводит к формированию поверхностного слоя, концентрация кремния в котором существенным образом зависит и от толщины пленки, и от плотности энергии пучка электронов. При толщине пленки 0,5 мкм концентрация кремния в поверхностном слое несколько ниже концентрации кремния в исходном распыляемом силумине. При толщине пленки 1 мкм реализуется обратная ситуация.

Величина микротвердости модифицированного слоя определяется и концентрацией кремния в поверхностном слое (что и следовало ожидать) и плотностью энергии пучка электронов. Лучшим режимом модифицирования поверхностного слоя силумина АК12, позволяющим увеличить микротвердость в $\approx 1,3$ раза, следует признать режим с параметрами 20 Дж/см², 150 мкс, 5 имп., 0,3 с⁻¹ при толщине напыляемого слоя 1 мкм.

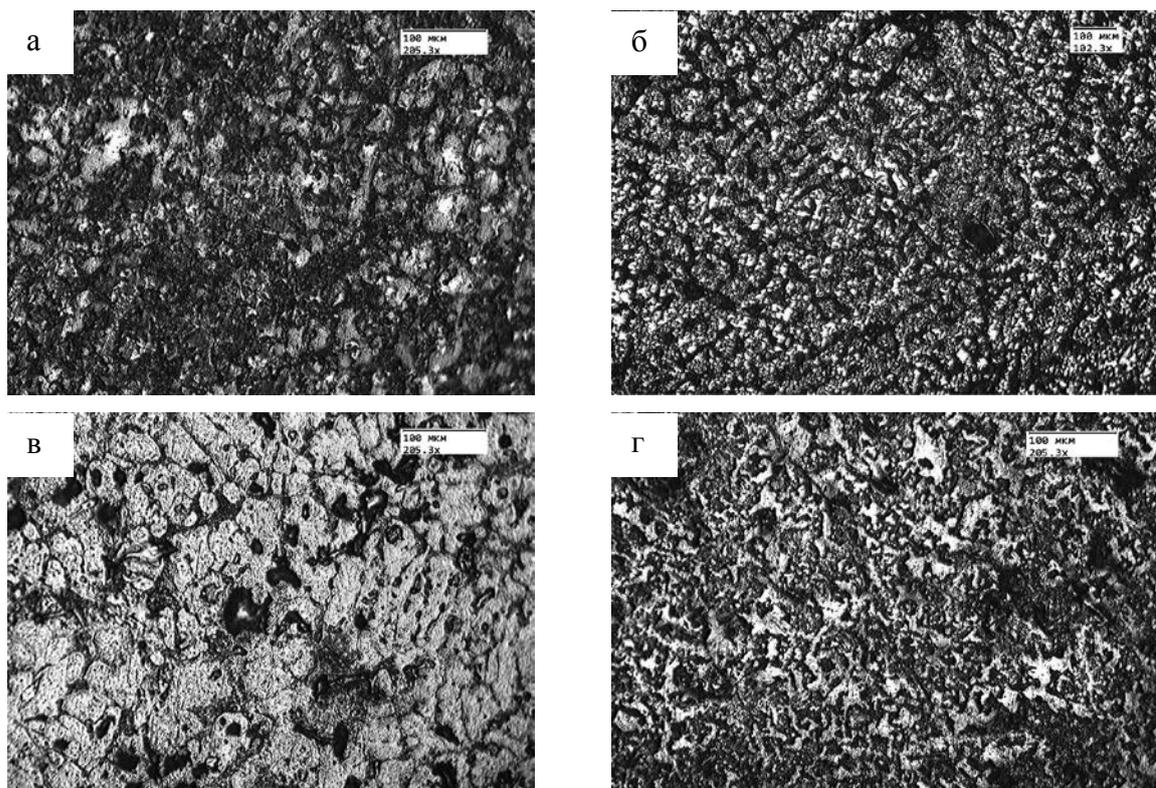


Рисунок 1 - Структура поверхности образцов системы пленка / подложка, облученной импульсным электронным пучком: а) $E_S = 15$ Дж/см², $h=0.5$ мкм, б) $E_S = 20$, $h=0.5$, в) $E_S = 15$, $h=1$, г) $E_S = 20$, $h=1$ (h - толщина покрытия, мкм, E_S - плотность энергии пучка электронов, Дж/см²)

Таблица 1 - Концентрация кремния и величина микротвердости модифицированного электронным пучком поверхностного слоя системы пленка/подложка

Режим обработки образцов системы пленка /подложка	Содержание кремния на поверхности, %	Твердость, кг/мм ²
Подложка, АК 12	12	125
$E_S=15$ Дж/см ² , $h=0.5$ мкм	19,5	84
$E_S=20$ Дж/см ² , $h=0.5$ мкм	20	104
$E_S=15$ Дж/см ² , $h=1$ мкм	39,8	88,7
$E_S=20$ Дж/см ² , $h=1$ мкм	31,8	165

В табл. 2 приведены результаты трибологических испытаний системы пленка/подложка, обработанной электронным пучком. Отчетливо видно, что модифицирование поверхности силумина при всех режимах облучения электронным пучком приводит к снижению скорости изнашивания. Наилучшим следует признать режим облучения 15 Дж/см², 150 мкс, 5 имп., 0,3 с⁻¹, толщина пленки 0,5 мкм, при котором скорость изнашивания снижается в $\approx 1,3$ раза. Сопоставляя результаты, представленные в табл. 1 и табл. 2, можно отметить, что высокая твердость поверхностного слоя, формирующегося при облучении материала электронным пучком по режиму с параметрами 20 Дж/см², 150 мкс, 5 имп., 0,3 с⁻¹ при толщине напыляемого слоя 1 мкм не обеспечивает высокой износостойкости. Можно предположить, что высокая концентрация кремния в поверхностном слое приводит к охрупчиванию материала вследствие выкрашивания частиц кремния. Возможным способом снижения данного эффекта является измельчение включений кремния, т.е. формирование в поверхностном слое субмикро- нанокристаллической многофазной структуры.

Таблица 2 – Скорость изнашивания (V) и коэффициент трения (μ) модифицированного электронным пучком поверхностного слоя системы пленка/подложка. Режим облучения: 150 мкс, 5 имп., 0,3 с⁻¹

E_S , Дж/см ²	h , мкм	V , 10 ⁻⁶ , мм ³ /(Н*м)	V_0/V	$\langle \mu \rangle$	$\langle \mu_0 \rangle / \langle \mu \rangle$
15	0,5	18630	1,31	0.648	0,94
15	1	22228	1,10	0.632	0,97
20	0,5	19416	1,25	0.633	0,97
20	1	21124	1,15	0.628	0,97
Исходный материал		24322		0.612	

Результаты наноиндентирования поверхностного слоя системы пленка/подложка, модифицированной электронным пучком с параметрами 15 Дж/см², 150 мкс, 5 имп., 0,3 с⁻¹ представлены на рис. 2. Отчетливо видно, что фиксируется упрочнение лишь тонкого поверхностного слоя. Однако этого оказывается достаточно для увеличения износостойкости материала.

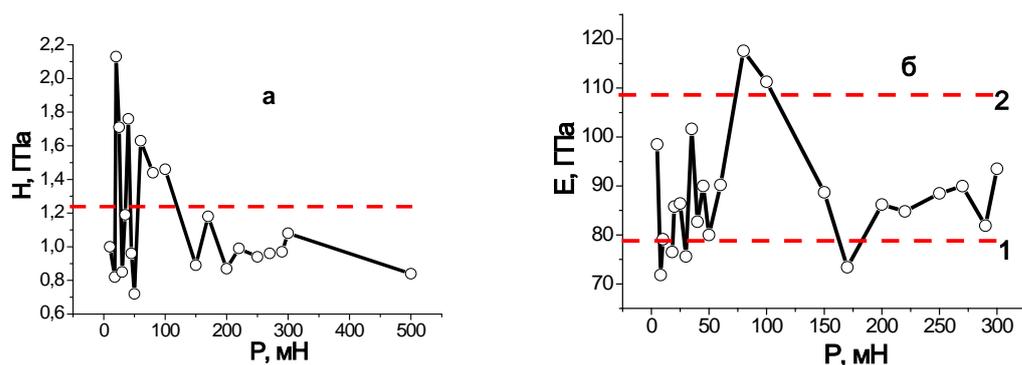


Рисунок 2-Зависимость твердости H и модуля Юнга E от нагрузки на индентор (метод наноиндентирования) поверхностного слоя силумина марки АК12, модифицированного путем напыления силумина (слой толщиной 0,5 мкм) и последующей обработки электронным пучком по режиму 15 Дж/см², 150 мкс, 5 имп., 0,3 с⁻¹. Штрихпунктирными линиями обозначены характеристики исходного силумина марки АК12 (для (б) – 1 – модуль Юнга силумина; 2 – модуль Юнга кремния).

Заключение. В результате выполненных исследований установлено, что ионно-электронно-плазменный метод позволяет осуществлять легирование поверхностного слоя силумина кремнием, переводя силумин эвтектического состава в заэвтектический. Выявлено, что модифицированные поверхностные слои характеризуются повышенными значениями твердости и износостойкости.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 14-29-00091).

Список литературы.

1. Белов Н.А., Савченко С.В., Хван А.В. Фазовый состав и структура силуминов.- М.: МИСИС, 2008.-282 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЛЕГИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЯ С ПОМОЩЬЮ ИОННО-ЭЛЕКТРОННО-ПЛАЗМЕННОГО МЕТОДА

М.Е. РЫГИНА¹, О.В. КРЫСИНА², А.Д. ТЕРЕСОВ², Ю.Ф. ИВАНОВ^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет

²Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)

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

OPTIMIZATION OF PROCESSES ALLOYING ALUMINIUM BY IONIC-BEAM-PLASMA COATING

M.E. RYGINA¹, O.V. KRISINA², A.D. TERESOV², YU.F. IVANOV^{1,2}

¹Tomsk Polytechnic University

²Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

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

Annotation. Modification of titanium (film) / aluminum (substrate) and silumin 25 wt.% (film)/aluminum systems are produced on the "SOLO" high-intensity pulsed electron beam at different modes of treatment. It leads to the formation of nanostructures. The hardness increased in 3 times and wear resistance in 7,5 times.