

Рисунок 2-Зависимость твердости H и модуля Юнга E от нагрузки на индентор (метод нанопрофилирования) 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.

Введение. Легирование - это один из широко применяемых в промышленности способов придания металлу повышенных эксплуатационных, механических и др. свойств. Однако объемное легирование требует большого количества легирующего элемента. Ионно-электронно-плазменный метод, модифицируя сравнительно тонкий (десятки-сотни мкм) поверхностный слой, позволяет сократить количество легирующих элементов. Титан и кремний являются одними из главных добавок, которые используют для повышения твердости и износостойкости алюминия.

Основная цель данной работы – поиск оптимального режима ионно-электронно-плазменной обработки систем «титан (пленка)/алюминий (подложка)» и «кремний (пленка)/алюминий (подложка)», позволяющего кратно повысить твердость и износостойкость материала.

Материал и методики исследования. Материалы для системы «титан (пленка)/алюминий (подложка)»: подложка - алюминий марки А7; распыляли титан марки ВТ1-0. Синтез тонких (0,5 мкм) пленок Ti осуществлялся на специализированной вакуумной установке «ТРИО» в плазме дуговых разрядов низкого давления [1]. Система «кремний (пленка)/алюминий (подложка)»: подложка - алюминий марки А7; распыляли силумин заэвтектического состава (Al - 23 вес. % Si); толщина пленки 0,5 мкм и 1 мкм.

Модификацию системы «пленка/подложка» проводили интенсивными импульсным электронным пучком на установке «СОЛО» [1]; плотность энергии пучка электронов 10 Дж/см² и 15 Дж/см², частота следования импульсов 0,3 с⁻¹, число импульсов облучения изменяли в пределах от 3 до 30; длительность воздействия пучка электронов 50 мкс, энергия ускоренных электронов 18 кэВ.

Исследования элементного и фазового состава, дефектной структуры поверхности модифицирования проводили методами оптической (NEOFOT-32) и сканирующей электронной (SEM-515 Philips) микроскопии, рентгеноструктурного анализа (дифрактометр XRD 6000, съемка осуществлялась в медном отфильтрованном излучении Cu-K α 1; монохроматор СМ-3121). Прочностные свойства материала характеризовали микротвердостью (прибор ПМТ-3, нагрузка на индентор 0,1 Н). трибологические свойства характеризовали величиной износостойкости и коэффициента трения.

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты исследования системы «титан (пленка)/алюминий (подложка)» показали, что наилучшие трибологические характеристики проявляются при режиме обработки с параметрами 15 Дж/см², 3 имп., 50 мкс, 0,3 с⁻¹ (рис. 1, кривая 1) – скорость изнашивания модифицированного слоя снижается более чем в 7,5 раз (относительно алюминия А7). Однако с повышением твердости поверхностный слой показывает заметное снижение износостойкости. Данное явление вызвано особенностями структуры поверхности модифицирования.

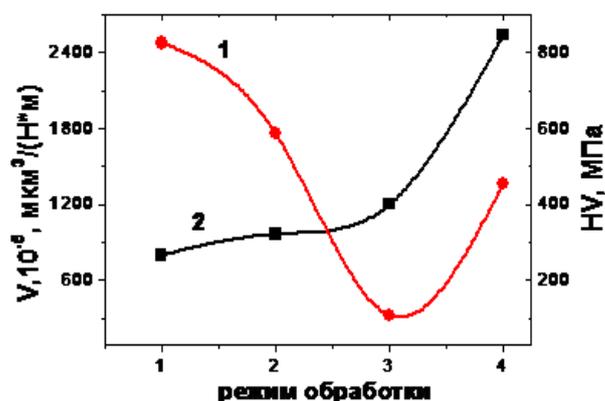


Рисунок 1- Скорость изнашивания (кривая 1) и микротвердость (кривая 2) поверхности технически чистого алюминия А7 (режим 1) и системы «пленка (Ti)/подложка (Al)» при различных режимов обработки электронным пучком с параметрами 2 – 10 Дж/см², 50 мкс, 10 имп.; 3 – 15 Дж/см², 50 мкс, 3 имп.; 4 – 15 Дж/см², 50 мкс, 30 имп.

Характерные изображения структуры поверхности данной системы приведены на рисунке 2. При облучении электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов $E_S=10 \text{ Дж/см}^2$ (10 имп.) и 15 Дж/см^2 (3 имп.) пленка титана, нанесенная на поверхность алюминия, сохраняется, однако фрагментируется микротрещинами (рис. 2, а, б). Размеры фрагментов при $E_S=15 \text{ Дж/см}^2$ в (3-4) раза меньше, по сравнению с образцом, облученным при $E_S=10 \text{ Дж/см}^2$. Объем микротрещин с поперечным размером $\approx 10 \text{ мкм}$ заполняется расплавом алюминия, т.е. пленка титана вплавляется в поверхность образца алюминия. Параметр кристаллической решетки алюминия при $E_S=10 \text{ Дж/см}^2$ $a = (0,4041 \pm 0.0001) \text{ нм}$, что соответствует параметру решетки чистого алюминия; дополнительно к дифракционным максимумам алюминия и титана на рентгенограммах выявляются дифракционные максимумы фазы Al_3Ti ; объемная доля интерметаллида $\approx 20 \%$, титана – 28 %.

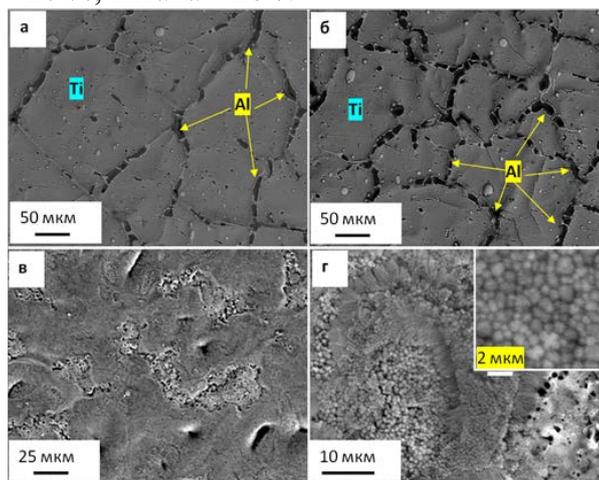


Рисунок 2-Структура поверхности системы пленка/подложка, облученной электронным пучком с параметрами а – 10 Дж/см², 10 имп.; б – 15 Дж/см², 3 имп.; в, г – 15 Дж/см², 30 имп.

Облучение при $E_s = 15 \text{ Дж/см}^2$ (3 имп.) приводит к увеличению параметра решетки алюминия до $a=(0,4050\pm 0.0001) \text{ нм}$, что указывает на формирование сплава Al-Ti. Объемная доля интерметаллида Al_3Ti снижается до $\approx 3 \%$, объемная доля титана практически не изменяется ($\approx 30 \%$). Увеличение количества импульсов воздействия с 3 до 30 при $E_s = 15 \text{ Дж/см}^2$ приводит к формированию структуры островкового типа (рис. 2, в, г). Области алюминия с пониженным содержанием титана имеют зеренную структуру с размерами (1 – 1,5) мкм; в областях, обогащенных титаном, размер зерен (0,3-0,5) мкм.

Анализируя систему «силумин (пленка)/алюминий (подложка)» можно отметить, что наибольшие показатели твердости проявляются при толщине напыляемой пленки 1 мкм и плотности энергии пучка электронов $E_s = 15 \text{ Дж/см}^2$. Увеличение плотности энергии пучка электронов до 20 Дж/см^2 приводит (не зависимо от толщины напыляемого слоя силумина) к снижению микротвердости облученной поверхности. Подобным же образом изменяется и процентное содержание кремния в приповерхностном слое. Следовательно, одним из факторов, ответственных за увеличение микротвердости поверхностного слоя технически чистого алюминия А7 является формирование двухфазной (алюминий-кремний) структуры.

Характерные изображения структуры, полученные при данном эксперименте, приведены на рисунке 3.

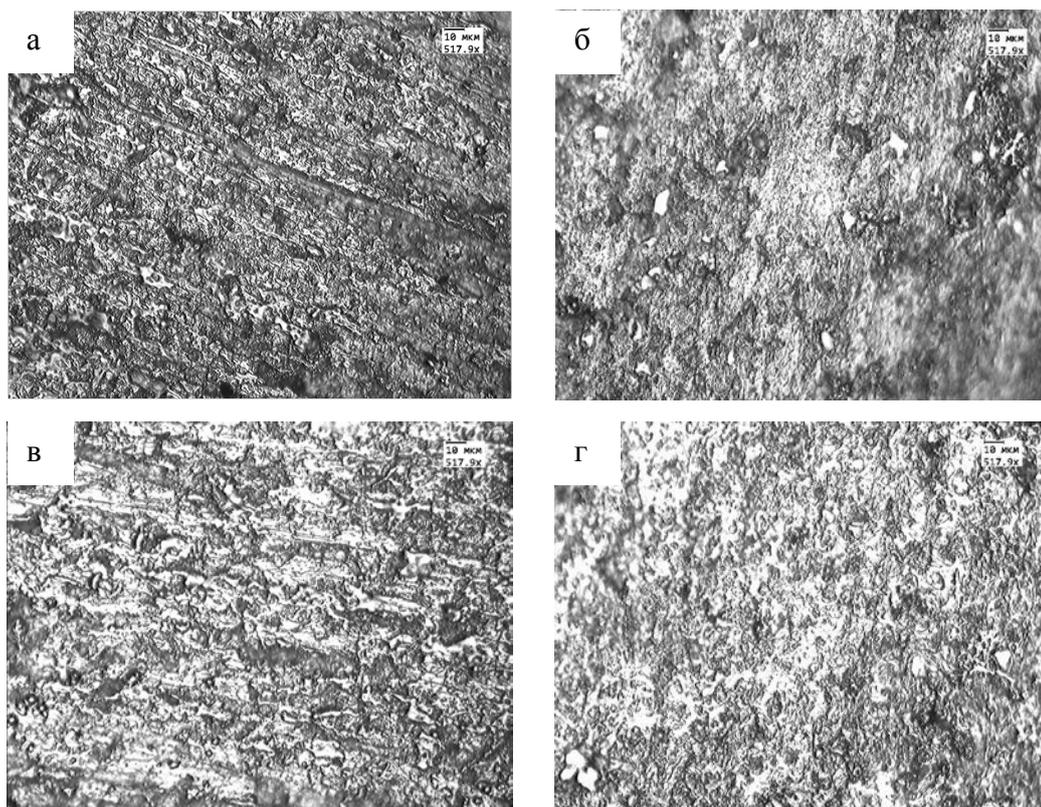


Рисунок 3 - Структура поверхности образцов системы пленка (Al-Si25%)/подложка (А7), облученной импульсным электронным пучком; а) $E_s = 15$, $h=0.5$, б) $E_s = 20$, $h=0.5$, в) $E_s = 15$, $h=1$, г) $E_s = 20$, $h=1$ (h -толщина покрытия, мкм, E_s -плотность потока, Дж/см^2)

Таблица 1-Значение твердости системы «силумин (пленка)/алюминий (подложка)» при разных концентрациях кремния

Режим облучения	Твердость, МПа	Содержание кремния, %
Технически чистый алюминий	250	~0
$E_S = 15 \text{ Дж/см}^2, h=0.5 \text{ мкм}$	425	29
$E_S = 20 \text{ Дж/см}^2, h=0.5 \text{ мкм}$	370	6
$E_S = 15 \text{ Дж/см}^2, h=1 \text{ мкм}$	548	35
$E_S = 20 \text{ Дж/см}^2, h=1 \text{ мкм}$	470	30

Выполнены исследования зависимости твердости и модуль Юнга для образцов системы «силумин (пленка)/алюминий (подложка)» (толщина пленки 1 мкм), обработанной электронным пучком по режиму 20 Дж / см², 150 мкс, 5 имп, 0,3 с⁻¹. Результаты исследований представлены на рис. 4. В табл. 2 приведены трибологические характеристики данной системы.

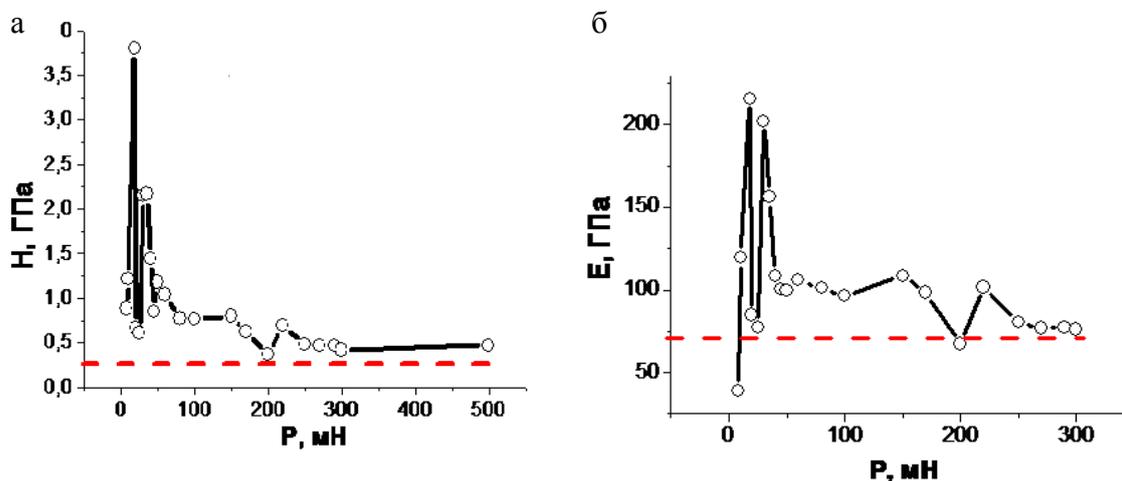


Рисунок 4-Зависимость твердости Н и модуля Юнга Е от нагрузки на индентор (метод нанопрофилирования) поверхностного слоя алюминия, модифицированного путем напыления силумина (слой толщиной 1 мкм) и последующей обработки электронным пучком по режиму 20 Дж/см², 150 мкс, 5 имп., 0,3 с⁻¹. Штрихпунктирными линиями обозначены характеристики исходного алюминия марки А7

Таблица 2-Значение твердости системы «силумин (пленка)/алюминий (подложка)» при разных концентрациях кремния

Режим	$V, 10^{-6}, \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$	V_0/V	$\langle \mu \rangle$	$\langle \mu_0 \rangle / \langle \mu \rangle$
Технически чистый алюминий	7592		0.483	
$15 \text{ Дж/см}^2, 0,5 \text{ мкм}$	6080	1,25	0.385	1,25
$15 \text{ Дж/см}^2, 1 \text{ мкм}$	6566	1,16	0.4	1,21
$20 \text{ Дж/см}^2, 0,5 \text{ мкм}$	5466	1,39	0.353	1,37
$20 \text{ Дж/см}^2, 1 \text{ мкм}$	4790	1,59	0.311	1,55

Анализируя представленные в табл. 2 результаты можно отметить, что скорость изнашивания при оптимальном режиме облучения (20 Дж/см², 150 мкс, 5 имп., 0,3 с⁻¹) модифицированного материала уменьшается в 1,5 раза.

Заключение. Ионно-электронно-плазменный метод позволяет сформировать поверхностные слои, характеризующиеся повышенным значением твердости (более чем в 3) и износостойкости (более чем в 7,5 раз). Выявленный эффект обусловлен формированием многофазной многоэлементной структуры с относительно малым размером зерен.

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

Список литературы.

1. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой / А.П. Ласковнев [и др.]; под ред. А.П. Ласковнева. – Минск: «Беларус. навука», 2013. – 287 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАВОДОРОЖИВАНИЯ НА СКОРОСТЬ СОРБЦИИ ВОДОРОДА ЦИРКОНИЕВЫМ СПЛАВОМ Э110 С НАНЕСЕННЫМ СЛОЕМ НИКЕЛЯ

М.Н. БАБИХИНА

Научный руководитель: ассистент кафедры общей физики В.Н. Кудияров
Томский политехнический университет

E-mail: m.babihina@mail.ru

INVESTIGATION OF HYDROGENATION PARAMETERS INFLUENCE ON THE HYDROGEN SORPTION RATE OF ZIRCONIUM ALLOY E110 COATED BY NICKEL LAYER

M.N. BABIKHINA

Scientific supervisor: assistant of General Physics department V.N. Kudiiarov
Tomsk Polytechnic University

E-mail: m.babihina@mail.ru

***Abstract.** Investigation of temperature and pressure altering influence on hydrogen sorption rate of zirconium alloy E110 coated by nickel layer during hydrogenation at gas atmosphere was done in this work. It was shown that nickel coating on zirconium alloy results in significant hydrogen sorption rate increasing in temperature range 350 - 550 °C. The increasing of hydrogenation temperature from 350 °C to 550 °C at constant pressure 2 atm. leads to the hydrogen sorption rate increasing in 4.45 times for zirconium alloy coated by nickel layer. The increasing of hydrogenation pressure from 0.02 to 0.2 and from 0.2 to 2 atm. at constant temperature 550 °C leads to the hydrogen sorption rate increasing in 49.6 and 4.67 times respectively.*

Введение. Водород оказывает существенное влияние на физико-химические и механические свойства металлов и сплавов. Особенно актуальна эта проблема для циркониевых сплавов, которые эксплуатируются в активной зоне ядерного реактора [1-3]. Для проведения самых различных исследований необходимо подготавливать экспериментальные образцы с различными концентрациями водорода и с его различным распределением по объему материала. Однако при наводороживании циркониевых сплавов важно учитывать, что они покрыты оксидной пленкой, которая