

**ЛЕГИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЯ ТИТАНОМ ПОСРЕДСТВОМ
ОБЛУЧЕНИЯ СИСТЕМЫ Ti (ПЛЕНКА) / Al (ПОДЛОЖКА) ИНТЕНСИВНЫМ
ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ: СТРУКТУРА И СВОЙСТВА**

М.Е. Рыгина, О.В. Крысина, А.Д. Тересов

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. Ю.Ф. Иванов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: 1-7755me@mail.ru

**ALUMINIUM SURFACE ALLOYING THE TITAN BY MEANS OF RADIATION OF Ti SYSTEM
(FILM) / Al (SUBSTRATE), THE INTENSIVE PULSE ELECTRON BEAM: STRUCTURE AND
PROPERTIES**

M.E. Rygina, O.V. Krisina, A.D. Teresov

Scientific Supervisor: Prof., Dr. Yu.F. Ivanov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: 1-7755me@mail.ru

The mixing of system a film (Ti)/substrate (Al) is carried out by an intensive electron beam. The radiation modes allowing to increase microhardness and reduction in the rate of wear of material are revealed. Physical justification of this phenomenon is given.

Интерметаллиды сплава алюминий-титан (TiAl, Ti₃Al, Al₃Ti) обладают уникальным сочетанием свойств: высокими значениями удельной прочности, жаростойкости, жаропрочности, упругих модулей, сопротивления ползучести, аномальной зависимостью механических свойств от температуры [1]. Предполагается, что сплавы с интерметаллидным упрочнением могут конкурировать с жаропрочными нержавеющей стали и никелевыми суперсплавами [2]. Существенный недостаток этих сплавов – низкая пластичность и ударная вязкость, которая может быть устранена уменьшением размера зерен, созданием столбчатой структуры и др. Параллельно с созданием объемных сплава с интерметаллидным упрочнением разрабатываются методы синтеза поверхностных сплавов на основе интерметаллидов Ti-Al с целью улучшения свойств конструкционных материалов, в том числе алюминиевых сплавов [3].

Цель работы – анализ структуры и прочностных свойств поверхностного слоя технически чистого алюминия, легированного титаном путем обработки системы пленка (Ti) / подложка (Al) высокоинтенсивным импульсным электронным пучком.

Материалом исследования являлась система пленка (Ti) / подложка (Al). Синтез тонких (0,5 мкм) пленок Ti осуществлялся на специализированной вакуумной установке «ТРИО» в плазме дуговых разрядов низкого давления [4]. Модификацию системы пленка/подложка проводили интенсивными импульсным электронным пучком на установке «СОЛО» [4]; плотность энергии пучка электронов 10 Дж/см² и 15 Дж/см², частота следования импульсов 0,3 с⁻¹, число импульсов облучения изменяли в

«ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК»

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 CM-3121). Прочностные свойства материала характеризовали микротвердостью (прибор ПМТ-3, нагрузка на индентор 0,1 Н). Исследования скорости износа системы пленка/подложка проводилось в геометрии диск-штифт с помощью трибометра (CSEM, Швейцария) при комнатной температуре и влажности. Объем износа материала определялся после проведения профилометрии образовавшегося трека с помощью лазерного оптического профилометра MicroMeasure 3D Station (Stil, Франция).

Трибологические испытания показали, что наилучшие результаты выявляются при облучении системы пленка/подложка электронным пучком 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 подложки). Анализ микротвердости выявил существенное (более чем в 3 раза) увеличение твердости материала при облучении системы пленка/подложка электронным пучком с параметрами 15 Дж/см², 30 имп., 50 мкс, 0,3 с⁻¹ (рис. 1, кривая 2). Однако одновременно с высоким значением твердости данный поверхностный сплав демонстрирует снижение износостойкости, что, очевидно, обусловлено особенностями формирующейся структуры системы пленка/подложка.

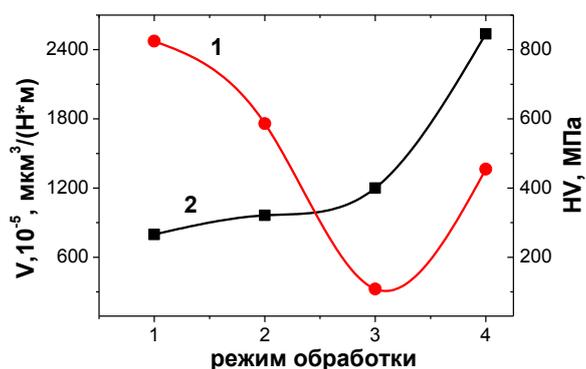


Рис. 1. Скорость изнашивания (кривая 1) и микротвердость (кривая 2) поверхности системы пленка (Ti)/подложка (Al) после различных режимов обработки: 1 – подложка (технически чистый алюминий А7); 2 – 4: система пленка/подложка, обработанная электронным пучком с параметрами 2 – 10 Дж/см², 50 мкс, 10 имп.; 3 – 15 Дж/см², 50 мкс, 3 имп.; 4 – 15 Дж/см², 50 мкс, 30 имп.

Характерные изображения структуры поверхности системы пленка/подложка, облученной интенсивным электронным пучком, приведены на рис. 2. При облучении электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов E_s 10 Дж/см² (10 имп.) и 15 Дж/см² (3 имп.) пленка титана, нанесенная на поверхность алюминия, сохраняется, однако фрагментируется микротрещинами (рис. 2, а, б). Размеры фрагментов при $E_s = 15$ Дж/см² в (3-4) раза меньше, по сравнению с образцом, облученным при $E_s = 10$ Дж/см². Объем микротрещин с поперечным размером ≈ 10 мкм заполняется расплавом алюминия, т.е. пленка титана вплавляется в поверхность образца алюминия. Параметр кристаллической решетки алюминия при $E_s = 10$ Дж/см² $a = (0,4041 \pm 0.0001)$ нм, что соответствует параметру решетки

«ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК»

чистого алюминия; дополнительно к дифракционным максимумам алюминия и титана на рентгенограммах выявляются дифракционные максимумы фазы Al_3Ti ; объемная доля интерметаллида $\approx 20\%$, титана – 28% . 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 ($\approx 30\%$).

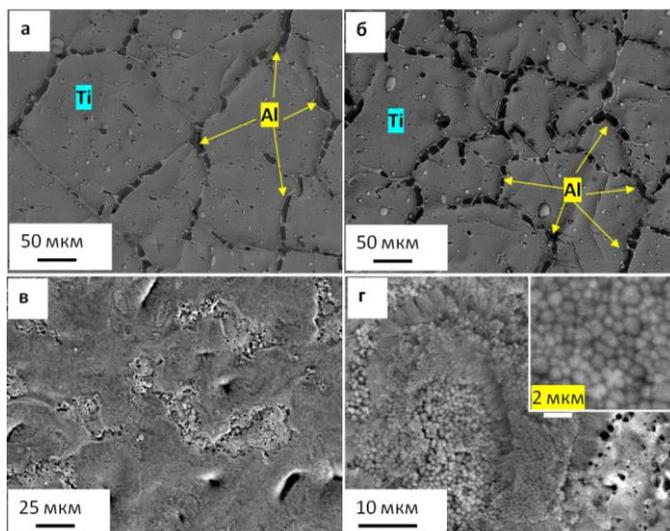


Рис. 2. Структура поверхности системы пленка/подложка, облученной электронным пучком с параметрами а – 10 Дж/см^2 , 10 имп.; б – 15 Дж/см^2 , 3 имп.; в, г – 15 Дж/см^2 , 30 имп.

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). Основной фазой является твердый раствор на основе алюминия ($a = (0,4049 \pm 0,0001) \text{ нм}$); объемная доля интерметаллида $Al_3Ti \approx 9\%$, титана – $\approx 6\%$. Методами микрорентгеноспектрального анализа показано, что атомы титана в поверхностном слое распределены неоднородно. 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.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гринберг Б.А., Иванов М.А. Интерметаллиды Ni_3Al и $TiAl$: Микроструктура, деформационное поведение. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 358 с.
2. Поварова К.Б. Перспективы развития конструкционных сплавов на основе интерметаллидов // Перспективные материалы. – 2007. - №5. – С. 481-489.
3. Курзина И.А., Козлов Э.В., Шаркеев Ю.П. Градиентные поверхностные слои на основе интерметаллидных частиц: синтез, структура, свойства / Отв. ред. В.П. Кривоногов. – Томск: Изд-во НТЛ, 2013. – 260 с.
4. 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.