

# ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

## МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«Физическая мезомеханика.

Материалы с многоуровневой иерархически  
организованной структурой и интеллектуальные  
производственные технологии»

6–10 сентября 2021 г.

Томск, Россия

## ВЛИЯНИЕ ДОЗЫ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНАМИ АЛЮМИНИЯ НА ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ТИТАНА

<sup>1</sup>Никоненко А.В., <sup>2</sup>Попова Н.А., <sup>2</sup>Никоненко Е.Л., <sup>3</sup>Курзина И.А.

<sup>1</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск

<sup>2</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

Применение титана, как конструкционного материала, обусловлено благоприятным сочетанием его высокой механической прочности, коррозионной стойкости, жаропрочности и малой плотности. Повышению прочностных характеристик в титановых сплавах способствует измельчение зерна [1]. Известно, что уменьшение размера зерна титана до субмикрокристаллического (СМК) состояния и дополнительная имплантация приводят к существенному изменению структурно-фазового состояния и формированию дополнительных (вторичных) фаз [1, 2].

Наибольший интерес представляет алюминий в качестве имплантируемых ионов, так как интерметаллидные фазы системы Ti – Al проявляют особые свойства, формирование которых в поверхностных слоях позволяет значительно улучшать физико-механические характеристики имплантированных систем [3].

В качестве исследуемого материала был выбран технически чистый титан ВТ1-0 в СМК-состоянии (размер зерна 0.06 – 0.2 мкм). Для формирования СМК состояния в заготовках сплава ВТ1-0 применяли комбинированный метод многократного одноосного прессования (abc-прессование) [4] с многоходовой прокаткой в ручьевых валках при комнатной температуре и последующего отжига при 573 – 623 К в течение 1 часа.

Полученные образцы подвергались ионной имплантации алюминием на ионном источнике MEVVA-V.RU при различных дозах облучения:  $1 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>,  $5 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> и  $10 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> при температуре 623 К, ускоряющем напряжении 50 кВ, плотности тока ионного пучка 6.5 мА/см<sup>2</sup>, расстоянии 60 см от ионно-оптической системы.

Исследование элементного состава поверхностных модифицированных в условиях ионной имплантации слоев проведено методом электронной ОЖЭ-спектроскопии с помощью спектрометра ОИОС. Необходимо подчеркнуть, что данные ОЖЭ-спектроскопии имеют интегральный характер (суммарный) по всему имплантированному слою.

На рис.1 представлены концентрационные ОЖЭ-профили химических элементов в образцах сплава ВТ1-0 после имплантации с разными дозами.

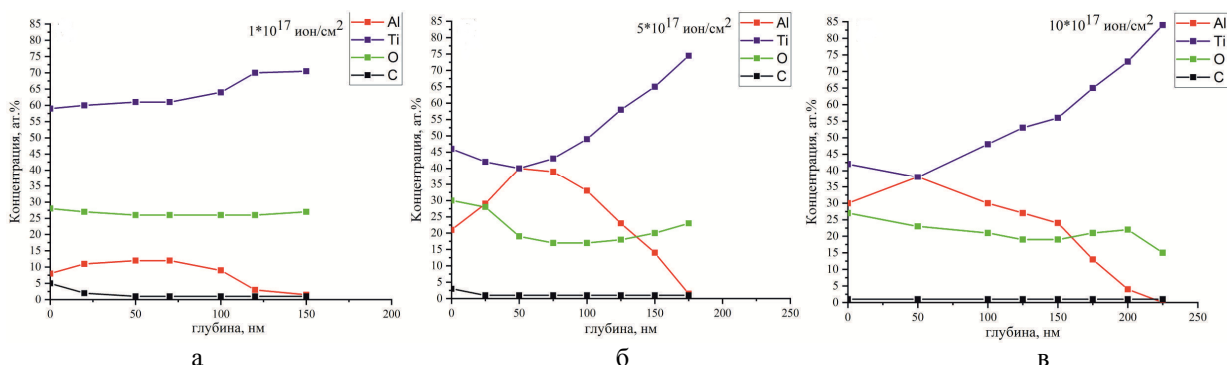


Рис. 1. Профили концентраций химических элементов в образцах сплава ВТ1-0, полученные методом ОЖЭ-электронной спектроскопии, после имплантации с разными дозами:  $1 \times 10^{17}$  ион / см<sup>2</sup> (а);  $5 \times 10^{17}$  ион / см<sup>2</sup> (б) и  $10 \times 10^{17}$  ион / см<sup>2</sup> (в)

Из рис. 1а-1в видно, что во всех имплантированных образцах присутствуют Ti, Al, O и C. При всех дозах облучения концентрационный профиль алюминия имеет один максимум. Имплантация с малой дозой облучения ( $1 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>) привела к тому, что толщина имплантированного слоя оказалась равной ~150 нм, и максимум концентрации Al (12 ат. %)

приходится на глубину ~20-70 нм (рис. 1а). Условно принято, что граница ионно-легированного слоя находится в области, где концентрация внедренных имплантацией ионов алюминия не ниже 1-2 ат.% [5].

Как видно из рис. 1, концентрация кислорода оказывается существенно выше концентрации алюминия. Это объясняется тем, что ионная имплантация выполняется в вакуумной камере, в которой присутствует остаточная атмосфера, что и привело к увеличению концентрации кислорода. Поэтому можно утверждать, что в поверхностном слое, наряду с интерметаллидными фазами  $Ti_3Al$  и  $Al_3Ti$  [1], будут образовываться также оксидные (оксиды титана и алюминия) и карбидные фазы.

После имплантации в исследуемый материал с дозой  $5 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> (рис. 1б) толщина ионно-легированного слоя составляет ~175 нм. При этом максимальная концентрация алюминия составляет уже 40 ат. % и локализуется на глубине 50 нм от обработанной поверхности.

После увеличения дозы до  $10 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> (рис. 1в) толщина ионно-легированного слоя увеличилась до ~225 нм, что несколько больше, чем с предыдущей дозой. При этом максимальная концентрация алюминия и глубина его локализации остается на том же уровне, что и в предыдущем случае. Это объясняется тем, что, согласно теоретическим расчетам [6], средний проективный пробег ионов алюминия в поликристаллическом титане при ускоряющем напряжении 60 кВ и среднем заряде Al-ионов, равным 1,7 Кл, составляет 80–90 нм. Вследствие высокой концентрации границ зерен при уменьшении размера зерна титановой мишени будет наблюдаться повышенная диффузия имплантируемых элементов по глубине материала. Поэтому, в отличие от поликристаллических материалов, дополнительная ускоренная диффузия алюминия по глубине и приводит к повышению толщины имплантированного слоя (до 200 нм). Сравнивая теоретически рассчитанные значения с экспериментальными данными, полученные методом ОЖЭ-спектроскопии [5], можно сказать, что наблюдается хорошее соответствие.

Однако из данных ОЖЭ-спектроскопии следует, что даже на глубине 1 – 2 мкм концентрация алюминия может составлять до 2 ат. %, что значительно превышает проективный пробег ионов алюминия в титане [5]. Можно заключить, что проявляется эффект «дальнодействия» [5], связанный с присутствием внедренной примеси на большую глубину вследствие радиационно-стимулированной диффузии.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 19-08-01041 и № 20-38-90066.*

1. Nikonenko A.V., Popova N.A., Nikonenko E.L., Kurzina I.A. The effect of aluminum ion implantation on the grain size and structure of UFG titanium // Surface & Coatings Technology. 2020. №393. P. 125750.
2. Vorob'ev V.L., Klomova I.N., Kolotov A.A., Bykov P.V., Bayankib V.Ya. Formation of a nickel-aluminum intermetallic during ion-beam mixing // Journal of surface investigation: X-ray, synchrotron and neutron techniques. 2019. №13. P. 1225-1229.
3. Nikonenko A.V., Popova N.A., Kalashnikov M.P., Nikonenko E.L., Kurzina I.A. Influence of the grain size on the dispersion strengthening of VT1-0 alloy implanted with aluminum ions // Advanced Material Research. 2015. №1085. P. 294-298.
4. Zhilyaev A.P., Huang Y., Cabrera J.M., Langdon T.G. Influence of inhomogeneity on mechanical properties of commercially pure titanium processed by HPT // Defect and diffusion forum. 2018. № 385. P.284-289.
5. Дальнедействующие эффекты в ионно-плазменных металлических материалах / А.Н. Диденко, Ю.П. Шаркеев, Э.В. Козлов, А.И. Рябчиков. Томск, Изд.-во НЛТ. – 2004. –328 с.
6. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Эрозионностойкие покрытия для лопаток компрессора газотурбинных двигателей // Электрометаллургия. 2016. С. 23-38.