

**ОСОБЕННОСТИ МОДИФИКАЦИИ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ И  
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВА ТИТАНА, ИМПЛАНТИРОВАННОГО ИОНАМИ  
АЛЮМИНИЯ, В «ПОЛИЗЕРЕННОМ» СОСТОЯНИИ<sup>3</sup>**

А.В. Никоненко<sup>1</sup>, Н.А. Попова<sup>2</sup>, Е.Л. Никоненко<sup>2</sup>, М.П. Калашников<sup>3</sup>

Научный руководитель: доцент, д.ф.-м.н. И.А. Курзина И.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, г. Томск,  
пр. Ленина, 36, 634050;

<sup>2</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, г. Томск  
пл. Соляная, 2, 634003;

<sup>3</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, г. Томск,  
пр. Академический, 2/1, 634021;

E-mail: [kurzina99@mail.ru](mailto:kurzina99@mail.ru)

**STRUCTURAL PHASE STATE AND MECHANICAL PROPERTIES OF TITANIUM ALLOYS  
MODIFIED BY ALUMINUM ION IMPLANTATION**

A.V. Nikonenko<sup>1</sup>, N.A. Popova<sup>2</sup>, E.L. Nikonenko<sup>2</sup>, M.P. Kalashnikov<sup>3</sup>

Supervisor: I.A. Kurzina<sup>1</sup>, DSc, Associate Professor

<sup>1</sup>Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

<sup>2</sup>Tomsk State University of Architecture and Building, Russia, Tomsk, Solyanaya sq. 2, 634003

<sup>3</sup>Institute of Strength Physics and Material Science SB RAS

E-mail: [kursina99@mail.ru](mailto:kursina99@mail.ru)

***Annotation.** The paper presents TEM analysis of microstructure, phase composition, and mechanical properties of commercially pure titanium. These properties of two types of grains are compared before and after modification of titanium by aluminum ions, namely: large grains (1,4  $\mu\text{m}$ ) and small (0,5  $\mu\text{m}$ ) grains. The analysis shows that ion implantation results in a considerable improvement of mechanical properties of both large and small grains throughout their implantation depth. However, with increase of the grain size, the stress in the ion-modified surface layer decreases while in the subsurface layer it increases.*

Изучение процессов фазообразования, которые протекают при имплантации ионами алюминия титановых материалов, находящихся в различных структурных состояниях (на мезо- и микроуровнях), является актуальной задачей. Можно предположить, что в материалах, характеризующихся неоднородным зерненным состоянием, когда присутствуют как мелкие зерна, соответствующие микроуровню (до 0.5 мкм), так и крупные зерна с размером 0.5-5 мкм (мезоуровень), в условиях ионной имплантации могут протекать физические процессы по другим механизмам, отличным от материалов, однородных по размеру зерна.

Цель настоящей работы – анализ и сравнение результатов исследования микроструктуры, фазового состава и прочностных составляющих, входящих в предел текучести, мишени титана, находящегося в полизеренном состоянии, до и после имплантации ионами алюминия. Под полизеренным состоянием

---

<sup>3</sup> Работа выполнена в рамках гос. задания Минобрнауки России № 3.295.2014/К

материала мы понимаем одновременное присутствие в образце микрозерен (до 0.5 мкм) и мезозерен (0.5-5 мкм).

**Материал и методика эксперимента.** Объектом исследования являлись образцы технически чистого титана, полученные и имплантированные методом, подробно описанном ранее. Изучение структуры и фазового состава проведено методом в исходном состоянии (до имплантации) и в двух областях модифицированного слоя: область I на глубине 0-150 нм и область II – на глубине ~300 нм от облученной поверхности.

**Результаты и их обсуждение.** Условия приготовления сплава были такими, что в нем сформировались два типа зерен, которые сохраняются и после имплантации. Зерна первого типа имеют размер в интервале 0.1-0.5 мкм (малые зерна – МЗ). Их средний размер – 0.40 мкм. Второй тип зерен имеет размер в интервале 0.5-4.0 мкм (крупные зерна – КрЗ). Их средний размер – 1.40 мкм. Доля МЗ невелика и составляет 10%, и располагаются они преимущественно в тройных стыках КрЗ.

Ранее нами было установлено, что ионная имплантация алюминием приводит к модификации элементного состава поверхностных слоев титана. Известно, что алюминий (легирующая примесь) распределяется не одинаково как по глубине имплантированного слоя, так и относительно мелких и крупных зерен титана. Алюминий первоначально формирует твердый раствор при этом, чем больше Ti-зерно, тем больше концентрация алюминия в твердом растворе. Мелкие зерна обеднены алюминием относительно крупных зерен. В результате неравномерного распределения легирующей примеси по материалу фазовый состав в МЗ и КрЗ различается.

Исследования показали, что в области I имплантированного слоя оба типа зерен не только сохраняются, но доля МЗ даже возрастает до 30%. Средние размеры МЗ и КрЗ уменьшаются. В области II также присутствует два типа зерен. Доля МЗ такая же, что и в материале до имплантации (10%). Средний размер КрЗ также оказывается на уровне исходного состояния, МЗ – такой же, что и в области I.

Имплантация Al в Ti в КрЗ приводит к образованию вторичных фаз  $Ti_3Al$  и  $TiAl_3$ , суммарное количество которых в области I составляет 3% от объема материала, а в области II – 10%. При этом формирование фазы  $Ti_3Al$  наблюдается по всему объему ионно-легированного слоя, фазы  $TiAl_3$  – только в середине имплантированного слоя по границам зерен. В МЗ эти фазы не образуются. Окислы  $TiO_2$  образуются во всех зернах и по всему объему ионно-легированного слоя.

Таким образом, КрЗ и МЗ отличаются не только составом фаз, но и их количеством. Установлено, во-первых, чем больше размер зерна, тем больше доля выделяющихся фаз, во-вторых, в области II ионно-легированного слоя титана объемная доля выделяющихся фаз всегда выше и, в-третьих, в каждой области ионно-легированного слоя титана и в каждом типе зерен больше всего выделяется частиц  $TiO_2$ .

В КрЗ и МЗ различен не только качественный и количественный фазовый состав, но и дефектная структура. Различия сохраняются как до, так и после ионной имплантации. До ионной имплантации в материале присутствуют дислокации и дислокационные переплетения. С уменьшением размера зерна титана увеличивается плотность дислокаций. После ионной имплантации в поверхностных слоях наблюдается изменение дислокационной структуры. На поверхности скалярная плотность дислокаций уменьшается, а избыточная увеличивается. Дислокационная структура – в основном сетчатая. По мере удаления от облученной поверхности величина скалярной плотности дислокаций возрастает как в КрЗ, так и в МЗ, но с разной интенсивностью и при этом превышает исходное состояние в обеих областях.

Сформированная дислокационная структура создает внутренние напряжения (напряжения сдвига)  $\sigma$ . Оказалось, что, во-первых, по мере удаления от облученной поверхности величина  $\sigma$  возрастает во всем объеме материала. Во-вторых, зависимости  $\sigma$  от размеров зерен аналогичны зависимостям  $\rho$ . В-третьих, МЗ характеризуются большими напряжениями в сравнении с КрЗ.

Сформированная дислокационная структура, наряду со скалярной плотностью дислокаций, характеризуется высоким значением избыточной плотности дислокаций ( $\rho_{\pm}$ ), которая также вызывает высокие внутренние напряжения – моментные (или локальные) напряжения  $\sigma_{\theta}$ . Амплитуда моментных напряжений в КрЗ и МЗ, а также в среднем по каждой области имплантированного слоя различаются. Имплантация привела к формированию упруго-пластических моментных напряжений, амплитуда которых существенно превышает величину скальвающих напряжений предела текучести.

На основании полученных количественных параметров структуры был выполнен расчет предела текучести отдельно для КрЗ и МЗ:  $\sigma = \Delta\sigma_n + \Delta\sigma_{me} + \Delta\sigma_z + \Delta\sigma_{op} + \sqrt{(\Delta\sigma_{\theta}^2 + \Delta\sigma_a^2)}$ . Результаты расчета представлены на рисунке. Подчеркнем, что в исходном состоянии независимо от размера зерна

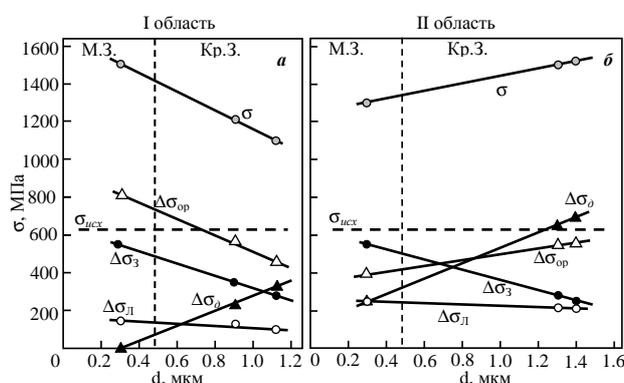


Рис. 1. Зависимость предела текучести  $\sigma$  и вкладов отдельных механизмов упрочнения от размера зерна  $\alpha$ -Ti по глубине ионно-легированного слоя титана: а – I область; б – II область.  $\sigma_{исх}$  – предел текучести исходного материала. Вертикальной пунктирной линией разделены области мелких и крупных зерен

исследуемый сплав является полностью однофазным сплавом –  $\alpha$ -Ti. Поэтому вклад в упрочнение материала, обусловленный наличием вторичных фаз  $\Delta\sigma_{op}$ , отсутствует. Упрочнение дальнедействующими полями напряжений также полностью отсутствует. Составляющие  $\Delta\sigma_n$  (напряжение трения дислокаций в кристаллической решетке  $\alpha$ -Ti) и  $\Delta\sigma_{me}$  (упрочнение твердого раствора на основе  $\alpha$ -Ti атомами легирующих элементов Al, C, O) также вносят в общее упрочнение минимальный вклад, так как, согласно нашим данным ОЖЕ-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа, в твердом растворе исходного сплава углерод и кислород отсутствуют. Поэтому упрочнение материала в исходном состоянии будет определяться  $\Delta\sigma_z$  (упрочнение за счет границ зерен) и  $\Delta\sigma_{\theta}$  (упрочнение дислокациями «леса», которые перерезают скользящие дислокации).

Из рисунка, видно, что как в КрЗ, так и в МЗ ионная имплантация приводит к существенному упрочнению по всей толщине имплантированного слоя. Однако влияние размера зерна на величину  $\sigma$  в областях I и II различно. А именно, вблизи поверхности ионно-легированного слоя (в области I) величина  $\sigma$  по мере увеличения размера зерна уменьшается, а в области II – возрастает.