

УДК 53.08

## **ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ Ti-Nb, СФОРМИРОВАННЫЕ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННО-АССИСТИРОВАННОГО ДУГОВОГО НАПЫЛЕНИЯ**

<sup>1</sup>Р.А.Сурменев, <sup>1</sup>А.А.Иванова, <sup>2</sup>А.К.Мусабекова

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Карагандинский университет имени академика Е.А.Букетова, г.Караганда,  
Казахстан

assel501vremennyi@mail.ru

Титан и сплавы на его основе (TiNi, Ti-6Al-4V) широко применяются в качестве материала для создания имплантатов для замещения костных дефектов [1]. Данные материалы сочетают в себе высокую биологическую инертность и механическую совместимость с костной тканью. Недостатком титановых сплавов является их коррозия в биологических средах, сопровождающаяся выходом ионов тяжелых металлов, которые вызывают неблагоприятные электрохимические реакции в организме и влияют на биосовместимость имплантата с окружающими тканями [2]. Нанесение покрытий на поверхность металлических имплантатов позволяет эффективно решить эту проблему. Материалы биомедицинского назначения должны обладать не только биохимической совместимостью с тканями организма, заключающейся в отсутствии иммунных реакций и воспалительных процессов, но и биомеханической совместимостью, которая определяет функциональную надежность имплантатов. Для этого необходимо, чтобы модуль упругости имплантируемого материала был приближенным к модулю упругости кости (30 ГПа), что позволяет избежать проявления так называемого «stress-shielding effect» (эффект экранировки напряжений), который проявляется в растворении кости в области отсутствия механической нагрузки. Снижение модуля упругости поверхности изделий из титановых сплавов возможно посредством нанесения покрытий на основе Ti-Nb. Известно, что Nb являются  $\beta$ -стабилизирующими элементами.  $\beta$ -фаза титана с объемно-центрированной кристаллической решеткой характеризуется более низкими значениями модуля упругости по сравнению с гексагональной плотноупакованной  $\alpha$ -фазой. Считается, что Ti-Nb сплавы являются наиболее перспективным материалом для прототипирования 3D моделей костных имплантатов с высокой биомеханической совместимостью [3].

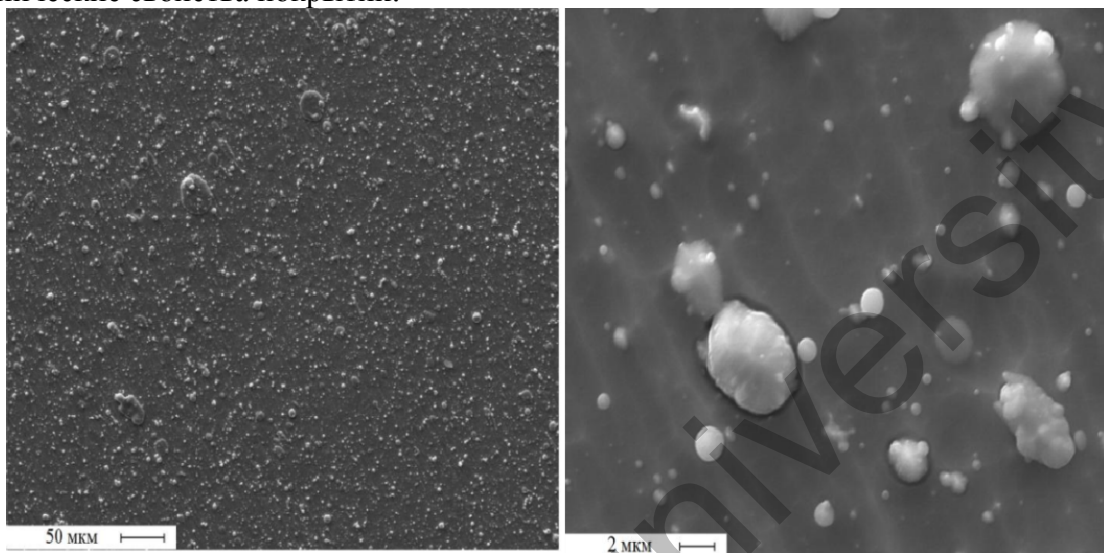
В качестве подложек для нанесения покрытий использовали пластины титана марки ВТ 1-0 (20 20 мм<sup>2</sup>). Образцы были подвергнуты предварительной механической полировке шлифовальной бумагой (зернистость 250 мкм) и последующей полировке алмазной пастой с размером частиц до 3 мкм. После чего пластины были очищены в ультразвуковой ванне с ацетоном и этиловым спиртом.

Для нанесения покрытий плазменно-ассистированным дуговым методом использовали автоматизированную ионно-плазменную установку «ТРИО», которая была разработана в Институте сильноточной электроники (ИСЭ, СО РАН), установка оснащена двумя модернизированными электродуговыми испарителями с усиленным охлаждением испаряемого катода и плазменным источником на основе несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым катодом «ПИНК».

Напыление Ti-Nb покрытий проводили с помощью двух катодов (Ti и Nb) вакуумной дугой в атмосфере аргона при давлении газа 0,2 Па в течение 1 ч. При напылении Ti-Nb покрытий ток разряда Ti дугового испарителя составлял 150 А. Для Ti-Nb, напыление проводилось с током разряда на Nb мишень 100 А, обеспечивающий 40 вес. % Nb в покрытиях. Импульсное напряжение смещения также составляло 50 В.

Характерные изображения поверхности образцов с Ti-Nb покрытиями, приведены на рисунке 1. Толщина Ti-Nb покрытия составила  $5,0 \pm 0,2$  мкм. Профилометрия показала, что параметр шероховатости поверхности  $R_a$  равен  $0,37 \pm 0,05$  мкм.

Метод плазменно-ассистированного дугового напыления покрытий обладает явными преимуществами (высокая степень ионизации плазменного потока, высокая производительность, широкий диапазон параметров), но его основным недостатком остается наличие в плазменном потоке микрочастиц. Считается, что наблюдаемые частицы на поверхности образцов, в силу низкой адгезии, существенно влияют на механические свойства покрытий.



На СЭМ изображении при большем увеличении помимо микрочастиц различима ячеистая структура поверхности, которая является результатом эффекта ионной бомбардировки при плазменно-ассистированном дуговом напылении.

Рисунок 1 – СЭМ изображения морфологии покрытий на основе Ti-Nb (Nb 40%)

Рентгенодифракционный спектр Ti-Nb покрытия представлен на рисунке 2. На дифрактограмме исследуемого образца идентифицируются отражения от плоскостей  $\beta$ -Ti-Nb фазы, которая представляет собой твердый раствор Ti и Nb с ОЦК-решеткой.

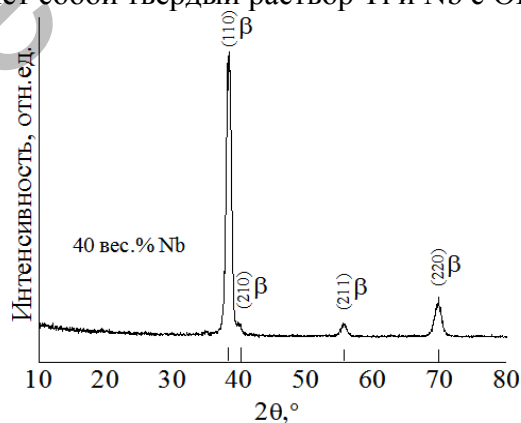


Рисунок 2 – РФА спектр покрытий на основе сплава Ti-Nb с содержанием Nb 40 %

Добавка Nb оказывает стабилизирующий эффект на высокотемпературную фазу титана, благодаря встраиванию атомов Nb в ОЦК структуру Ti в процессе роста пленки. Присутствие четких дифракционных рефлексов указывает на наличие кристаллической структуры покрытия. Следует отметить, что дифракционные рефлексы широкие. Это

обусловлено несколькими причинами: малым размером областей когерентного рассеяния, возникновением в образце напряжения и микродеформацией.

Результаты измерения твердости методом наноиндентирования при максимальной нагрузке 30 мН показывают, что для Ti-Nb покрытия характерно более высокое значение нанотвердости, по сравнению с Ti-Zr и Ti, и составляет  $5,5 \pm 0,01$  ГПа. Полученные результаты наноиндентирования согласуются с данными опубликованными авторами, исследовавшими механические свойства Ti-Nb и Ti-Zr сплавов. Так, например, A. Thoenes и D.V. Lazurenko показали, что высокие значения твердости Ti-Nb покрытия характерны для  $\beta$ -фазы Ti-Nb сплава с ОЦК кристаллической решеткой [4]. Кроме того, результаты наноиндентирования показывают, что модуль упругости Ti-Nb покрытия выше в сравнении с модулем упругости Ti-Zr, ниже модуля упругости титановой подложки и составляет  $123,8 \pm 0,01$  ГПа. Высокое значение модуля Юнга Ti-Nb покрытия по сравнению с Ti-Zr объясняется близким значением атомных радиусов Ti ( $1,475 \text{ \AA}$ ) и Nb ( $1,45 \text{ \AA}$ ), тогда как Zr характеризуется большим атомным радиусом ( $1,616 \text{ \AA}$ ). Следовательно, при легировании титана Nb период решетки  $\beta$ -фазы должен, по крайней мере не уменьшаться, тогда как легирование титана Zr должно способствовать увеличению межатомного расстояния в сплаве, уменьшению силы связи, а, следовательно, уменьшению модуля Юнга.

#### Литература:

1. Elias C., Lima J., Valiev R., Meyers M. Biomedical applications of titanium and its alloys // Jom, 2008. -46–49p.
2. Fallah V., Corbin S.F., Khajepour A. Process optimization of Ti–Nb alloy coatings on a Ti–6Al–4V plate using a fiber laser and blended elemental powders // Journal of materials processing technology, 2010. –2081–2087p.
3. Wen C., Yamada Y., Hodgson P. Fabrication of novel TiZr alloy foams for biomedical applications // Materials Science and Engineering, 2006. -1439–1444p.
4. Alexander Thoenes, Ivan A. Bataev, Natalia S. Belousova, Daria V. Lazurenko. Microstructure and Mechanical Properties of Binary Ti-Nb Alloys for Application in Medicine // IFOST-2016: New Materials and Technologies, 2016.-26–28p.

УДК 533.6

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЛОПАСТИ С АКТИВНЫМ РОТАЦИОННЫМ ЭЛЕМЕНТОМ-ТУРБОДЕФЛЕКТОРОМ

<sup>1,2</sup>Танашева Н.К., <sup>1</sup>Бахтыбекова А.Р., <sup>1</sup>Бурков М.М.

<sup>1</sup>Карагандинский университет имени академика Е.А.Букетова, г.Караганда, Казахстан

<sup>2</sup>Институт прикладной математики, г.Караганда, Казахстан

asem.alibekova@inbox.ru

В сегодняшнее время Республика Казахстан сталкивается со многими проблемами, стремясь удовлетворить свои потребности в энергетическом секторе. Колебания цен на ископаемые топлива, повышенная заинтересованность по поводу безопасности внутренней энергетической инфраструктуры и иностранных источников поставок природного газа, а также неопределенность в отношении выгод от реструктуризации-все это является элементами проблемы энергетической политики.

Казахстан-обширная, но относительно малонаселенная страна, богатая природными ресурсами, расположенная в центре Евразии. В последние годы в стране активно развивается концепция зеленой экономики. В 2013 году в Казахстане была принята “Национальная концепция перехода к зеленой экономике до 2050 года”, в которой изложены принципы зеленой экономики как будущего пути развития. Цель