

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИСТЕМЫ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti-Nb-Zr-Ta

А.П. Волкова<sup>1</sup>, Р.А. Сурменев<sup>1</sup>, Д. Храпов<sup>1</sup>, И.Ю. Грубова<sup>1</sup>,  
А.Д. Тересов<sup>2</sup>, Н.Н. Коваль<sup>2</sup>, А.В. Коптюг<sup>3</sup>, А.И. Тюрин<sup>4</sup>  
Научный руководитель – к.ф.-м.н. М.А. Сурменова

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

<sup>2</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН  
634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/3

<sup>3</sup>Университет Центральной Швеции  
Швеция, г.Остерсунд, Akademigatan, 1

<sup>4</sup>Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина  
392000, Россия, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33, anastasiavolkova17298@gmail.com

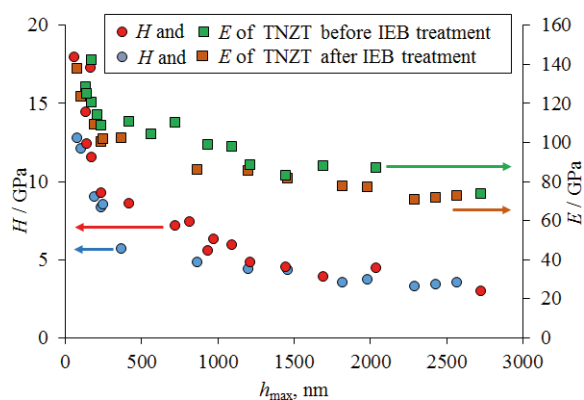
В настоящее время разработанных низко модульных титановых сплавов является перспективной задачей в области биомедицинских применений. На данный момент сплавы системы Ti-35Nb-7Zr-5Ta (TNZT) обладают одним из самых низких модулей упругости, что определяет перспективность их использования для имплантатов для замещения костной ткани [1]. Помимо разработки нового четырехкомпонентного титанового сплава методом электронно-лучевого плавления, цель работы заключалась в проведении оценки влияния пост-обработки импульсным электронным пучком (ИЭП) на физико-механические свойства сплава титана TNZT и получении данных о фундаментальных механизмах влияния фазового состава и микроструктуры поверхности низко модульных сплавов на их механические свойства.

Для изготовления сплавов Ti-35Nb-7Zr-5Ta (вес %) были использованы специально разработанные сферические порошки  $\beta$ -титанового сплава TNZT. Сплав TNZT изготавливался с помощью аддитивных технологий методом электронно-лучевого плавления (ЭЛП) на установке ARCAMA2 EBM® (Швеция), после чего подвергался пост-обработке ИЭП для модификации поверхности образцов с помощью генератора ИЭВ «СОЛО» (ИСЭ СО РАН, Томск, Россия). Морфология и элементный состав TNZT были изучены с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, Quanta 200D и JSM-7000, JEOL, Токио, Япония). Шероховатость поверхности измерялась с помощью контактного профилометра Hommel Tester t1000. Нанотвердость и модуль Юнга поверхности определялись с помощью системы Hysitron Nanotriboindenter TI-950 (HysitronInc., США).

Пост-обработка поверхности титанового сплава TNZT с помощью ИЭП приводит к снижению значений параметров шероховатости поверхности в среднем в 2 раза (таблица 1). Результаты СЭМ также позволяют сделать вывод, что обработка ИЭП значительно снижает значения шероховатости и уменьшает пористость поверхностного слоя сплава титана. Исследование механических свойств образцов показало значения модуля Юнга ( $E$ ) в диапазоне от 85 до 65 ГПа в зависимости от глубины индентирования. Твердость ( $T$ ) при вдавливании для всех образцов находилась в диапазоне от 3,5 до 13 ГПа.

**Таблица 1.** Данные измерения шероховатости сплава TNZT, полученного ЭЛП, до и после обработки ИЭП

Титановый сплав TNZT	$R_{max}$ (мкм)	$R_z$ (мкм)	$R_a$ (мкм)
TNZT до обработки ИЭП	65±10	45±7	12±2
TNZT после обработки ИЭП	42±3	25,4±0,3	8,7±0,1



**Рис. 1.** График зависимости твердости ( $H$ ) и значения модуля Юнга ( $E$ ) от глубины индентирования ( $h$ )

Полученные значения  $E$  и  $T$  сплавов в зависимости от глубины индентирования были представлены на рисунке 1. Полученный  $E$  сплава TNZT (65 ГПа), измеренный с помощью метода наноиндентирования в 2–6 раз превышает таковой для человеческой кости (10–30 ГПа), но его значение меньше, чем у коммерческого

биомедицинского сплава Ti6Al4V (120 ГПа). Следовательно, TNZT можно рассматривать как сплав для биомедицинского применения. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ20-73-10223. Авторы благодарят Иванову Е. (Tosoh SMD Inc., GroveCity, Ohio, USA) за предоставленный порошок TNZT.

### Список литературы

1. *Rechtin J. et al. Fabrication of titanium-niobium-zirconium-tantalum alloy (TNZT) bio-implant components with controllable porosity*

*by spark plasma sintering // Materials, 2018. – Vol. 11. – №2. – P. 181.*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ (Cu–Fe)O ПРОТИВ МОРСКОГО БИООБРАСТАНИЯ

Е.А. Ворнакова<sup>1</sup>, О.В. Бакина<sup>2</sup>, Л.Б. Наумова<sup>1</sup>  
 Научный руководитель – к.х.н., доцент Л.Б. Наумова<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН  
 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, [ovbakina@ispms.tsc.ru](mailto:ovbakina@ispms.tsc.ru)

Морское биообрастание судов и гидротехнических сооружений является мировой проблемой, которая до сих пор эффективно не решена. Для создания эффективных противообрастающих покрытий нужны материалы с низкой токсичностью и высокой эффективностью, которые бы не вызывали бы гибель сопутствующих морских организмов [1]. Основываясь на современных научных данных, можно сделать вывод, что материалы, способные к генерации активных форм кислорода (АФК), могут стать эффективной и экологически безопасной альтернативой покрытиям, содержащим токсичные для окружающей среды вещества [2]. АФК способны повреждать белковые структуры биологических объектов и вызывать их гибель только при непосредственном контакте. Перспективными могут стать сложного состава типа оксид металла-феррит металла, обладающие фотокаталитической активностью и соответственно способностью генерировать АФК [3]. Варьируя фазовый состав и морфологию наночастиц, можно регулировать их фотохимическую активность под действием электромагнитного излучения УФ и видимого диапазона.

В данной работе медом электрического взрыва двух скрученных проволок (ЭВП) железа и меди в кислородосодержащей атмосфере были получены наночастицы, феррит меди и оксид

меди (Cu–Fe)O, исследованы их свойства, антибактериальная и антиобрастающая активность. Наночастицы (Cu–Fe)O получали ЭВП двух скрученных между собой проволок железа и меди в кислородосодержащей атмосфере. Соотношение компонентов в порошках регулировали диаметром проволок. Массовые соотношения металлов Cu/Fe в диспергируемых проволоках составили: 70/30, 34/66, 50/50. Наночастицы исследовали методами просвечивающей электронной микроскопии ПЭМ, рентгено-фазового анализа, седиментационного анализа. Для оценки фотохимической активности наночастиц (Cu–Fe)O было исследовано разложение растворов модельного красителя Конго красного под действием видимого света ( $\lambda = 500$  нм). Антиобрастающая активность наночастиц была определена при введении наночастиц в состав покрытия на основе эпоксидной смолы в отношении естественной морской микрофлоры в Чёрном море (бухта Старо-северная, глубина 2,0 м), время исследования – 46 дней.

При ЭВП образуются наночастицы (Cu–Fe)O, которые независимо от соотношения компонентов имеют близкую к сферической форму, размер частиц от 10 до 200 нм. Cu, Fe и O распределены в частицах равномерно (рис. 1).

Фазовый состав порошков представлен фазами CuO, Cu<sub>2</sub>O, CuFeO<sub>2</sub> (CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, FeO.