

**ФОРМИРОВАНИЕ БИОИНЕРТНЫХ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ  
ТИТАНА, НИОБИЯ И ЦИРКОНИЯ**

А. Майрамбекова<sup>1</sup>, Н.К. Ахметова<sup>2</sup>

Научный консультант: к.т.н., н.с. А.Ю. Ерошенко

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

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

E-mail: [aikol0708@mail.ru](mailto:aikol0708@mail.ru)

**PRODUCTION OF BIOINERT ULTRA-FINE GRAINED ALLOYS BASED ON TITANIUM,  
NIOBIUM AND ZIRCONIUM**

A. Mairambekova<sup>1</sup>, N.K. Ahmetova<sup>2</sup>

Scientific consultant: PhD, senior researcher. A.Yu. Eroshenko

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

<sup>2</sup>Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: [aikol0708@mail.ru](mailto:aikol0708@mail.ru)

**Abstract.** *The results of investigation of microstructure, phase composition, mechanical properties (microhardness) of bioinert binary alloys – low-modulus Ti-40 wt.%Nb (Ti40Nb) and 1 wt.% niobium-alloyed zirconium (Zr1Nb) in ultrafine-grained state are represented. The ultrafine-grained structure was produced by two-stage severe plastic deformation (SPD) method, which included the multiple abc-pressing and multi-pass rolling in grooved rolls and further pre-recrystallizing low-temperature annealing. The ultrafine-grained structure with average structural elements size of 0.32  $\mu\text{m}$  for Ti40Nb and 0,25  $\mu\text{m}$  for Zr1Nb are formed in alloys as a result of SPD. Ultrafine-grained structure provides high level of mechanical properties (microhardness) while elastic modulus initial level retains.*

**Введение.** В настоящее время успешное применение в медицине находят вентильные биоинертные металлы – титан, цирконий, ниобий и их сплавы. В последние годы появилась возможность использовать в медицине сплавы на основе циркония, которые обладают высокой коррозионной стойкостью, прочностью и биоинертностью. Модуль упругости у титана и титановых сплавов медицинского назначения находится в пределах 100-120 ГПа, что значительно выше модуля упругости костной ткани (15-55 ГПа) [1]. Низкий модуль упругости материала имплантата, сопоставимый с модулем упругости для костной ткани, позволяет осуществлять равномерное распределение деформаций и механических напряжений в системы «кость-имплантат». В качестве материала имплантата представляет наибольший интерес применение биоинертных титановых  $\beta$ -сплавов, например, сплавов систем Ti-Nb или Ti-Nb-Zr с низким модулем упругости. Легирование титана ниобием до 40-45 мас. % позволяет уменьшить модуль упругости до 55 ГПа, что сопоставимо с модулем упругости кости, но при этом происходит снижение и прочностных характеристик [2]. Формирование в биоинертных сплавах наноструктурного (НС) и ультрамелкозернистого (УМЗ) состояния методами интенсивной пластической

деформации (ИПД) позволяет решить данную задачу и получать заготовки и изделия со значительно более высокими механическими свойствами.

**Материалы и методы исследования.** В качестве материала исследования были выбраны сплавы – Ti-40 мас. % Nb (Ti40Nb) и Zr-1 мас. % Nb (Zr1Nb). Перед деформационной обработкой заготовки сплава Ti40Nb в литом состоянии отжигали при температуре 1100 С в течение 1 часа в аргоне с последующей закалкой в воду, а образцы сплава циркония предварительно отжигали при температуре 580°C в течение 3 часов в вакууме [3]. После закалки микроструктура сплава Ti40Nb состояла из матричных β-зерен с размерами 120-650 мкм и α'-мартенсита. Распределение микротвердости по объему заготовки сплава Ti40Nb неоднородное. Для зерен β-фазы значения микротвердости находятся в пределах 1300-1900 МПа, а для мартенситной α'-фазы – 2800-3500 МПа. Структура сплава Zr1Nb в отожженном состоянии представлена основной фазой α-Zr с размерами 2-3 мкм и частицами второй фазы β-Nb. Для образцов Zr1Nb распределение микротвердости однородное и среднее значение микротвердости составило 1500 МПа [4].

Для формирования УМЗ структуры в исследуемых сплавах применяли комбинированный двухэтапный метод ИПД, состоящий из многократного абс-прессования и многоходовой прокатки с последующим рекристаллизационным отжигом [3]. В результате прокатки получали заготовки в форме прутков с размерами поперечного сечения (6×6×300) мм. Для снятия внутренних напряжений и повышения пластичности готовые прутки Ti40Nb отжигали при температуре 400 °С, а прутки Zr1Nb – при 350 °С. Отжиги проводили в течение одного часа.

**Результаты эксперимента.** В результате ИПД по всему объему заготовки сплава Ti40Nb было сформировано УМЗ состояние со средним размером элементов структуры (зерна, субзерна и фрагменты) 0,32 мкм (рис. 1а,б).

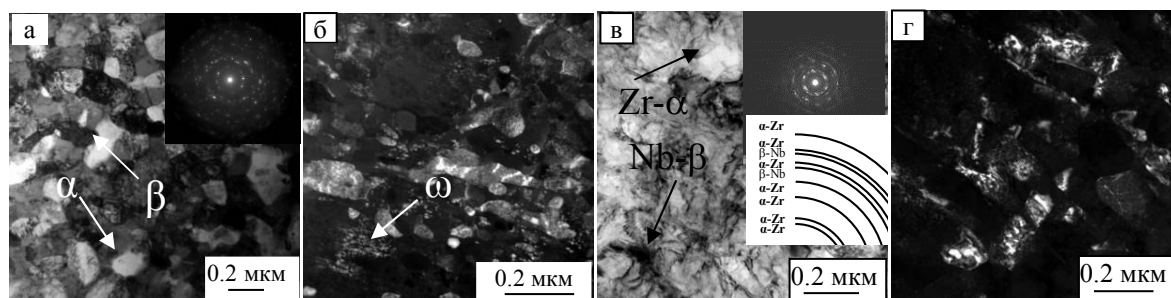


Рис. 1. Светлопольные (а,в) с соответствующими микродифракциями и темнопольные (б,г) изображения сплавов Ti40Nb (а,б) и Zr1Nb (в,г) в УМЗ состоянии

На светлопольном изображении (рис. 1а) хорошо видны субзерна и фрагменты, имеющие форму, близкую к равноосной. Рефлексы на микродифракции расположены по окружностям, что указывает на значительное измельчение исходной структуры и свидетельствует о присутствии высокоугловых границ зерен. При идентификации микродифракции были выявлены группы рефлексов от трех фаз: рефлексы от твердого раствора титана и ниобия (β-фаза) и рефлексы от α-фазы и ω-фазы.

В сплаве Zr1Nb, подвергнутого абс-прессованию и прокатке, формируется УМЗ состояние со средним размером структурных элементов 0,25 мкм. На светлопольном изображении (рис. 1г) в большом количестве присутствуют контура экстинкции, которые локализованы, в основном, по границам субзерен и фрагментов. На микродифракции наблюдается большое количество точечных рефлексов,

расположенных по окружностям с типичным азимутальным размытием, указывающее на присутствие как большеугловых, так и малоугловых разориентаций. Расшифровка микродифракций показала наличие рефлексов высокой интенсивности от основной фазы  $\alpha$ -Zr (ГПУ-решетка) и низкой интенсивности от фазы  $\beta$ -Nb (ОЦК-решетка). Среднее значение микротвердости после ИПД для сплава Ti40Nb составило 3300 МПа, а для Zr1Nb – 2600 МПа. Дополнительно для идентификации фаз применяли метод PCA (рис.2а,б).

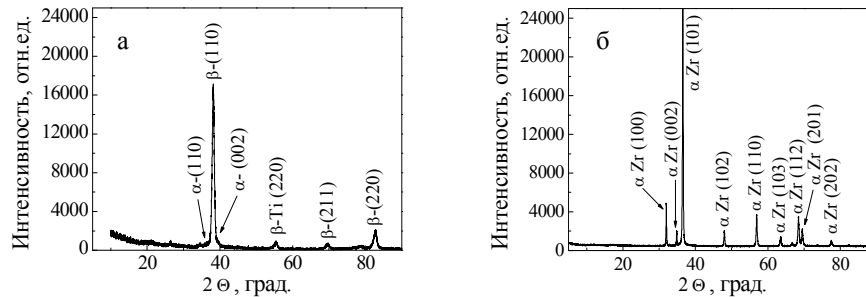


Рис.2. Рентгенограммы УМЗ сплавов: а – Ti40Nb, б – Zr1Nb, сформированные двухэтапной ИПД

На рентгенограмме для УМЗ Ti40Nb присутствуют рефлексы только от основной матричной  $\beta$ -фазы и  $\alpha$ -фазы. Рефлексы от  $\omega$ -фазы на дифрактограммах не обнаружены, вероятно, вследствие нанокристаллического размера данной фазы и ее небольшой объемной доли. Согласно данным (PCA) в УМЗ сплаве Zr1Nb присутствует основная фаза  $\alpha$ -циркония. Рефлексы от второй фазы, частиц  $\beta$ -ниобия, которые были выявлены в результате ПЭМ-анализа, методом PCA не удалось идентифицировать. Значения модуля упругости для УМЗ Ti40Nb находятся в пределах 70-75 ГПа, а для УМЗ Zr1Nb – 50-60 ГПа, которые определяли при измерении нанотвердости.

**Заключение.** Комбинированный метод ИПД, включающий многократное абс-прессование и многоходовую прокатку, приводит к формированию в бинарных сплавах Ti-40 мас. %Nb и Zr-1 мас. %Nb УМЗ структуры со средним размером структурных элементов, равных соответственно 0,32 мкм и 0,25 мкм. Многофазная УМЗ структура в исследуемых сплавах по сравнению с исходным крупнозернистым состоянием обеспечивает значительное повышение механических свойств (микротвердости) при сохранении низкого значения модуля упругости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abdel-Hady Gepreel M., Niinomi M. Biocompatibility of Ti-alloys for long-term implantation // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. V. 20 (2013). P.407-415.
2. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications // Publ. Wiley and TMS, Hoboken, USA, 2014. P.456.
3. Sharkeev Y.P., Eroshenko A.Y., Glukhov I.A., *et al.* Microstructure and mechanical properties of Ti-40 mass % Nb alloy after megaplastic deformation effect. AIP Conf. Proc. New York: AIP Publishing LLC. 2015; 1683: 020206.
4. Шаркеев Ю.П., Ерошенко А.Ю., Данилов В.И., Глухов И.А., Толмачев А.И. Получение биоинертных сплавов в ультрамелкозернистом состоянии // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 2. С. 112-116.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, проект Президиума РАН программа 35.