

**МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ VT1-0 И СПЛАВА Zr-1 МАС.% Nb В РАЗЛИЧНЫХ  
СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЯХ В РЕЖИМЕ ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ**

А.М. Майрамбекова<sup>1</sup>, М.В. Банников<sup>2</sup>, А.С. Грибкова<sup>3</sup>

Научный руководитель: профессор, д.ф.м.н. Ю.П. Шаркеев<sup>4</sup>

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

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

<sup>2</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, Россия,

г. Пермь, ул. Акад. Королева, 1, 614013

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

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

<sup>4</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634055

E-mail: [aikol@ispms.tsc.ru](mailto:aikol@ispms.tsc.ru)

**MECHANICAL CHARACTERISTICS OF VT1-0 AND Zr-1 WT.% Nb ALLOY IN DIFFERENT  
STRUCTURAL STATES DURING GIGACYCLE FATIGUE**

A.M. Mairambekova<sup>1</sup>, M.V. Bannikov<sup>2</sup>, A.S. Gribkova<sup>3</sup>

Scientific Supervisor: Prof., Dr. Yu.P. Sharkeev<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Russia, Perm, av. Acad. Korolev. 614013

<sup>3</sup> National research Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

<sup>4</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russia, Tomsk, pr. Akademicheskii, 2/4, 634055

E-mail: [aikol@ispms.tsc.ru](mailto:aikol@ispms.tsc.ru)

**Abstract.** *In the present study, we performed the microstructural feature and fatigue failure of technically pure titanium VT1-0 and Zr-1 wt.% Nb alloys in different structural states in the gigacycle fatigue regime. Specimens were loaded using a resonance fatigue machine Shimadzu USF-2000 in gigacycle regime. It was shown that the formed ultrafine-grained structure provides high mechanical properties of the alloys and affects the fatigue life. It was found that the formation of the ultra-fine grained structure in VT1-0 and Zr-1 wt. % Nb alloys leads to an increase in the fatigue limit of titanium by 1.3 times and the zirconium alloy by 1.7 times in the gigacyclic region ( $10^9$  cycles) when compared to the fine-grained and coarse-grained states. Analysis of fracture surface morphology has revealed the fractured structure in coarse-grained and ultrafine-grained VT1-0 and Zr-1 wt.% Nb alloy samples. Fractures in ultrafine-grained VT1-0 and Zr-1 wt. % Nb alloy samples exhibit quasi-brittle pattern.*

**Введение.** На сегодняшний день прогнозирования долговечности и разработка методов повышения конструкционных материалов в технике и медицине является важнейшей фундаментальной задачей для различных областей приложений. Одним из наиболее перспективных материалов в медицине являются титан марок VT1-0, VT1-00, Grade 1-4, в том числе титановые  $\beta$ -сплавы, безванадиевые сплавы и Zr-1Nb, Zr-2,5Nb сплавы и др. Они обладают комплексом физико-механических, коррозионностойких и биологических свойств. Широкое применение находят в качестве конструкционных материалов в

атомной энергетике, а также в стоматологии и ортопедическом протезировании. Известно, что методы интенсивной пластической деформации (ИПД), формируя наноструктурной (НС) и/или ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры, значительно повышают пределы текучести и прочности, твердость и микротвердость, предел выносливости и циклическую долговечность. В настоящее время актуальными являются исследования, посвященные влиянию НС/УМЗ состояния на процессы разрушения материалов при циклических нагрузках в широком диапазоне количества циклов не только в  $10^6$  циклов нагружения, но и  $10^9$  циклов и более [1].

Целью настоящей работы является исследование механических характеристик ВТ1-0 и сплава Zr-1 мас.% Nb в различных структурных состояниях в режиме гигацикловой усталости.

**Экспериментальная часть.** Объектом исследования является титан ВТ1-0 и сплав Zr-1% мас. Nb (Zr-1Nb). УМЗ структуру в исследуемых материалах формировали комбинированным двухэтапным методом ИПД, который включал многократное абс-прессование и многоходовую прокатку в ручьевых валках с последующим отжигом [2]. Микроструктуру, фазовый состав и морфологии поверхности разрушения исследовали с помощью оптической, просвечивающей электронной и растровой микроскопии. Результаты были получены на приборе Carl Zeiss Axio Observer, JEOL JEM 2100 и LEO EVO 50 в ЦКП «НАНОТЕХ» ИФПМ СО РАН (ЦКП ТНЦ СО РАН). Испытания на гигацикловую усталость проводили на ультразвуковой резонансной нагружающей машине Shimadzu USF-2000 с частотой циклических колебаний 20 кГц с коэффициентом асимметрии цикла  $R = -1$  [1,3]. Исходное КК и МЗ состояния были получены за счет рекристаллизационных отжигов. Из заготовок ВТ1-0 и сплава Zr-1Nb в УМЗ, КК и МЗ состояниях были изготовлены образцы для усталостных испытаний в виде цилиндрических лопаток. Геометрические размеры лопаток были определены по аналитическим формулам, в зависимости от плотности исследуемого материала и его динамического модуля Юнга [1].

**Результаты.** В таблице 1 представлены механические характеристики исследуемых сплавов в исходном и после комбинированного двухэтапного метода ИПД в УМЗ состоянии.

Таблица 1

Механические характеристики ВТ1-0 и сплава Zr-1 мас. %Nb

Материал	$d$ , мкм	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
ВТ1-0 (КК состояние)	25	400	240	23
ВТ1-0 (УМЗ состояние)	0,2	1000	700	7
Zr-1Nb (МЗ состояние)	1,9	390	230	26
Zr-1Nb (УМЗ состояние)	0,22	780	450	12

На рисунке 1 показаны результаты усталостных испытаний ВТ1-0 и сплава Zr-1Nb для различных структурных состояний. При амплитуде циклических напряжений 175 МПа образец титана в КК состоянии разрушился после  $10^5$  циклов. Переход от КК структуры к УМЗ структуре значительно повышает выносливость ВТ1-0 в области гигацикловой усталости. Предел выносливости ВТ1-0 в КК состоянии на базе испытаний  $10^9$  циклов составил 155 МПа, а в УМЗ состоянии 200 МПа, что выше в 1,3 раза. Сплав Zr-1Nb в МЗ состоянии разрушился на базе  $10^4$  циклов при  $\sigma=160$  МПа. Образец УМЗ сплава Zr-1Nb число циклов нагружения до разрушения составил  $1,5 \times 10^9$  циклов при  $\sigma=170$  МПа. Для МЗ сплава циркония предел выносливости на базе  $10^9$  составил 100 МПа, а для УМЗ состояния в 1,7 раза выше – 170 МПа.

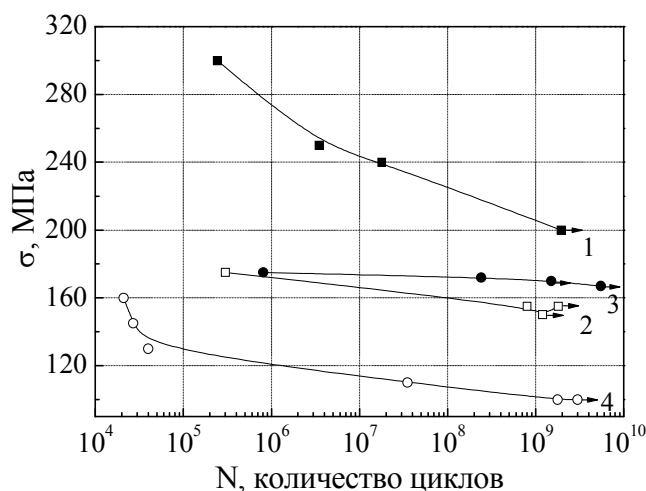


Рис. 1. Зависимость числа циклов до разрушения ( $N$ ) от напряжения ( $\sigma$ ) для образцов в различных состояниях: ■ – титан в УМЗ состоянии, кривая 1; □ – титан в КК состоянии, кривая 2; ● – сплав циркония в УМЗ состоянии, кривая 3; ○ – сплав циркония в МЗ состоянии, кривая 4

Выполнено исследование поверхности разрушения излома образцов ВТ1-0 и сплава Zr-1Nb в различных структурных состояниях. Показано три типичные зоны разрушения. Это зона зарождения трещины, зона ускоренного роста трещины и зона долома. По мере удаления от очага зарождения трещины происходит увеличение шероховатости поверхности исследуемых сплавов в УМЗ состоянии. Наблюдается формирование гладких фрагментов и «язычков» отрыва с областями «ямочного» излома и вторичные трещины. Показано, что разрушение образцов имеет квазихрупкий характер.

**Заключение.** Комбинированный двухэтапный метод ИПД, который включает многократное абс-прессование и многоходовую прокатку в ручьевых валках с последующим отжигом, формируя ультрамелкозернистую структуру, приводит к увеличению предела усталости титана в 1,3 раза, а сплава циркония в 1,7 раза в области гигацикловой усталости при количестве циклов не менее  $10^9$ . Установлено, что для ВТ1-0 и сплава Zr-1Nb в КК и УМЗ состоянии наблюдаются качественно аналогичные признаки морфологии поверхности разрушения. Разрушение образцов имеет квазихрупкий характер.

Работа выполнена в рамках Программ фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2017–2020 годы, Программа Ш.23.2., проект № 23.2.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bathias C., Paris P.C. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice. – Dekker Publisher Co. 2005. – 328 p.
2. Sharkeev Yu.P., Eroshenko A.Yu. and et. al. Microstructure and Mechanical Properties of Nanostructured and Ultrafine-Grained Titanium and the Zirconium Formed by the Method of Severe Plastic Deformation // Russian Physics Journal. – 2014. – Vol. 56. – P. 1156–1162.
3. Bannikov M.V., Naimark O.B., Oborin V.A. Experimental investigation of crack initiation and propagation in high- and gigacycle fatigue in titanium alloys by study of morphology of fracture // Fratturaed Integrità Strutturale. – 2016. Vol. 35, – P. 50–56.