ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

**МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**X МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Химия нефти и газа»**

Томск

Издательский Дом ТГУ

2018

DOI: 10.17223/9785946217408/194

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ТИТАНА ВТ1-0 И СПЛАВА Zr-1 МАС. %Nb В РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЯХ В РЕЖИМЕ ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

¹Майрамбекова А.М., ²Наймарк О.Б., ²Банников М.В., ³Ерошенко А.Ю.,

²Ведерникова А.И., ^{3,4}Шаркеев Ю.П.

¹*Томский государственный университет, Томск, Россия*

²*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия*

³*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия*

⁴*Томский политехнический университет, Томск, Россия*

На сегодняшний день для медицинских приложений научный и практический интерес представляют титановые и циркониевые сплавы. Наиболее широко применяемыми в медицине являются «чистый» титан марок (ВТ1-0, ВТ1-00, Grade 1-4), титановые сплавы (ВТ6, Ti-6Al-4V, Ti-6Al-4VELi) и безванадиевые сплавы (Ti-6Al-7Nb и Ti-6Al-2.5Fe). Циркониевые сплавы Zr-1Nb, Zr-2,5Nb (промышленные сплавы марки Э110, Э125) благодаря высокой коррозионной стойкости находят применение не только в качестве конструкционных материалов в атомной энергетике, а также в дентальной имплантации и ортопедическом протезировании.

Создание объемной наноструктурированной (НС) и/или ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры в металлах и сплавах методами интенсивной пластической деформации (ИПД) позволяет кардинально повысить, прежде всего, механические свойства как пределы текучести и прочности, твердость и микротвердость, предел выносливости и циклическую долговечность и др. Известно, что формирование НС и УМЗ состояния в металлах эффективно повышает предел выносливости области многоциклового усталости (более 10^6 циклов нагружения). В настоящее время актуальными являются исследования, посвященные влиянию НС и/или УМЗ состояния на процессы разрушения материалов при циклических нагрузках, анализу кривой усталости в широком диапазоне количества циклов нагружения, не только для многоциклового усталости, 10^6 циклов, но и для гигациклового усталости, т.е. в случае 10^9 и более циклов нагружения.

В работе были получены образцы технически «чистого» титана ВТ1-0 и сплава циркония Zr-1Nb (Zr-1 мас. %Nb, сплав Э110) в ультрамелкозернистом (УМЗ) состоянии комбинированным двухэтапным методом интенсивной пластической деформации (ИПД), который включал многократное абс-прессование и многоходовую прокатку в ручьевых валках с последующим дорекристаллизационным отжигом [1,2]. Часть образцов титана и сплава циркония в УМЗ состоянии была переведена соответственно в крупнокристаллическое (КК) и мелкозернистое состояния (МЗ) за счет рекристаллизационных отжигов.

Проведено исследование микроструктуры и фазового состава титана и сплава циркония в УМЗ, КК и МЗ состояниях. Средний размер элементов структуры (зерна, субзерна и фрагменты) в УМЗ состоянии составил $0,2 \pm 0,1$ мкм для титана и $0,22 \pm 0,10$ мкм - для сплава циркония. В случае титана в КК состоянии средний размер зерен оказался равным $27,0 \pm 8,0$ мкм, а для сплава циркония в МЗ состоянии - $1,9 \pm 0,4$ мкм. Микроструктура сплава циркония представлена матричными зернами циркония и расположенными по границам и в теле матричных зерен частицами ниобия со средним размером 0,4 мкм.

Выполнены усталостные испытания на ультразвуковой резонансной нагружающей машине ShimadzuUSF-2000 образцов титана и сплава циркония в режиме гигациклового усталости [3]. Установлено повышение усталостной прочности при гигацикловых режимах нагружения для титана и сплава циркония с УМЗ структурой. Формирование УМЗ структуры приводит к увеличению предела усталости титана в 1,3 раза, а сплава циркония в 1,7 раза в области гигациклового усталости при количестве циклов не менее 10^9 .

Проведено экспериментальное исследование и анализ эволюции температурного поля поверхности образцов при циклическом нагружении образцов титана и сплава циркония

Секция 4. Научные основы разработки материалов с многоуровневой иерархической структурой, в том числе для экстремальных условий эксплуатации

методом инфракрасной термографии (ИК) [4,5]. Получены зависимости максимальной температуры на поверхности образцов от времени циклического нагружения или количества циклов. Установлено, что процесс циклического нагружения сопровождается зарождением в рабочей зоне образца очага тепловыделения и его распространением. Приращение максимальной температуры на поверхности УМЗ образцов титана BT1-0 и сплава циркония Zr-1Nb существенно ниже, что свидетельствует о качественном изменении механизма диссипации энергии.

При сопоставлении динамики изменения тепловых полей для трех состояний образцов титана и сплава циркония, а именно, для КК, МЗ и УМЗ состояний, обнаружено, что локализация теплового поля минимальна для УМЗ состояния и максимальна для КК состояния, а для МЗ занимает промежуточное положение между КК и УМЗ состояниями. Выявлено, что механическая энергия в случае циклического нагружения образцов титана и сплава циркония с исходной КК и МЗ структурой соответственно трансформируется во внутреннюю энергию в локальной рабочей области с максимальными напряжениями, тогда как образцы в УМЗ состоянии обладают большими каналами для ее распределения и диссипации, внутренняя энергия достаточно равномерно распределяется по всему образцу.

Исследование морфологии поверхности образцов после разрушения показало, что на поверхности разрушения всех усталостных изломов можно выделить три типичных зоны. Это зона (очаг) зарождения и стабильного роста трещины; зона ускоренного роста трещины; зона долома. По мере удаления от очага зарождения трещины происходит увеличение шероховатости поверхности излома и появление «структурно-грубого» микрорельефа. Показано, что разрушение образцов имеет квазихрупкий характер. Основной особенностью усталостного разрушения титана и сплава циркония в УМЗ состоянии является формирование гладких фрагментов и «язычков» с областями «ямочного» излома.

Обсуждаются механизмы усталостного разрушения образцов титана и сплава циркония в ультрамелкозернистом, мелкозернистом и крупнокристаллическом состояниях.

Литература

1. Sharkeev Y.P. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik / Y. P. Sharkeev A.Y. Eroshenko, K. S. Kulyashova, K. A. Suvorov, S. V. Fortuna, M. Epple, O. Prymak, V. Sokolova, S. Chernousova. 2013. – Vol. 44, – № 2-3 – P. 198. Doi: 10.1002/mawe.201300113.
2. Sharkeev Yu. P., Eroshenko A. Yu., Danilov V. I., Tolmachev A. I., Uvarin P. V., Abzaev Yu. A. 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. M.V. Bannikov, O.B. Naimark, V.A. Oborin Experimental investigation of crack initiation and propagation in high- and gigacycle fatigue in titanium alloys by study of morphology of fracture // Frattura ed Integrità Strutturale – 2016. Vol. 35, – P. 50-56. Doi: 10.3221/IGF-ESIS.35.06.
4. О. Плехов, О. Наймарк, Р. Валиев, И. Семенова, N. Saintier, T. Palin-Luc. Экспериментальное исследование аномалий поглощения энергии в нанокристаллическом титане при циклическом нагружении // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34. Вып. 13 – С. 33-40.
5. Наймарк О.Б., Баяндин Ю.В., Леонтьев В.А. и др. Структурно-скейлинговые переходы и некоторые термодинамические и кинетические эффекты в материалах в объемном субмикро-(нано-)кристаллическом состоянии // Физическая мезомеханика – 2009 – Т. 12. – № 4. – С. 47–59.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-32-50163 «мол_нр».