

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ
КРУПНО- И УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО ТИТАНА VT1-0
ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

А.В. ЕРЕМИН¹, С.В. ПАНИН^{1,2}, Ю.П. ШАРКЕЕВ^{1,2}

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

² Томский политехнический университет

E-mail: ave@ispms.tsc.ru

Согласно исследованиям US Industry Study [1] титан и титановые сплавы имеют широкую перспективу применения в области медицины в качестве материалов для создания имплантатов и протезов, поскольку обладают наилучшей биосовместимостью и необходимыми показателями «базовых» механических свойств.

Имплантаты (стоматологические или опорно-двигательного аппарата) в процессе эксплуатации подвергаются механическим циклическим нагрузкам; при этом невысокие механические свойства технического чистого титана (прежде всего, низкий предел текучести и прочности) не позволяют использовать его для изготовления высоконагруженных изделий. Добавление легирующих элементов позволяет повысить механические свойства, но это приводит к снижению биосовместимости, возможности выделения токсичных легирующих элементов в организм, а также к существенному усложнению процесса производства и повышению себестоимости изделия.

Например, сплав Ti-6Al-4V является одним из широко используемых конструкционных материалов, который обладает хорошими механическими и коррозионностойкими свойствами. Однако при применении в медицине его серьезным недостатком становится выделение токсичных элементов Al и V в организм человека [2], что требует создания дополнительных защитных поверхностных слоев, стойких к истиранию. Альтернативные подходы включают в себя разработку сплавов, содержащих только нетоксичные элементы [3] и повышение механических свойств чистого титана, например за счёт его наноструктурирования методами интенсивной пластической деформации (ИПД) [4, 5].

В работе представлены результаты по статическому и циклическому нагружению технического чистого титана VT1-0 в двух состояниях: крупнозернистом (КЗ) и ультрамелкозернистом (УМЗ). Измельчение зерна в исходном титане выполнялось при помощи метода интенсивной пластической деформации путем многократной прокатки при повышенной температуре с последующим отжигом для снятия остаточных напряжений. Полученные заготовки были в виде полос с размерами $\sim 1,5 \times 8 \times 25$ мм, из которых затем вырезались образцы для проведения испытаний, рисунок 1.

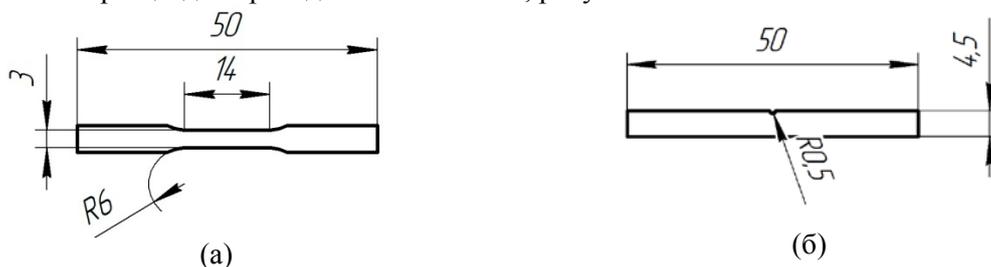


Рисунок 1 – Форма и геометрические размеры образцов для испытаний на статическое (а) и циклическое (б) растяжение

Проведенные микроструктурные исследования позволили определить, что КЗ титан состоит из зерен α -фазы со средним размером 25 мкм, тогда как УМЗ титан имеет размеры структурных элементов менее 0,2 мкм, состоящие из β -фазы.

Основные механические характеристики КЗ и УМЗ титана, представленные в таблице 1, были определены при испытаниях на растяжение со скоростью нагружения

0,2 мм/мин. В процессе нагружения процессы деформации регистрировались *in situ* с использованием акустической эмиссии и корреляции цифровых изображений (КЦИ).

Таблица 1 – Механические характеристики КЗ и УМЗ титана при статическом растяжении

Тип образца	Предел прочности, МПа	Деформация при разрушении, %
Крупнозернистый	419 ± 6	32 ± 2.7
Ультрамелкозернистый	863 ± 16	15 ± 2.3

Сигналы акустической эмиссии имеют достаточный для регистрации уровень амплитуды только в УМЗ титане, что объясняется формированием дислокационных скоплений на границах зерен и, следовательно, более высоким уровнем запасаемой энергии, которая при микроразрушении высвобождается в виде упругой волны с большей амплитудой, чем в КЗ титане, для которого сигналы отсутствовали.

Мониторинг процессов с использованием метода корреляции цифровых изображений позволяет проводить как качественный (по внешнему виду полей деформаций), так и количественный (величина деформаций в области или в отдельных точках) анализ. С использованием данного метода установлено, что в КЗ титане степень вовлечения материала в процессы пластической деформации существенно выше, чем в УМЗ, что связано с возросшей долей границ зерен и других дефектов после ИПД, которые препятствуют движению дислокаций и процессу двойникования, ответственным за пластическое течение материала.

Кроме того, разрушения УМЗ титана происходит по плоскости максимальных касательных напряжений (под углом 45° к оси нагружения), тогда как разрушение КЗ титана имеет вид нормального отрыва. Данные наблюдения, полученные при помощи КЦИ, подтверждаются и исследованиями поверхностей разрушения при помощи растровой электронной микроскопии, рисунок 2. Из представленных изображений видно, что КЗ титан имеет однородную текстуру поверхности разрушения, свидетельствующую о вязком разрушении по механизму нормального отрыва. УМЗ титан имеет три области разрушения, что вызвано изменением доминирующего типа разрушения: нормальный отрыв (центр образца), переходная зона, сдвиг (на периферии).

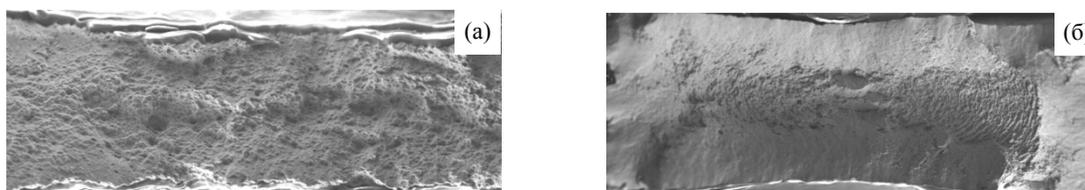


Рисунок 2 – Панорамные изображения поверхностей разрушения: (а) КЗ; (б) УМЗ

Полученные результаты демонстрируют повышение прочностных свойств металлических материалов и сплавов за счет наноструктурирования при статическом растяжении, и снижению пластичности, что обусловлено исчерпанием механизмов релаксации вследствие повышения плотности дефектов после ИПД.

Список литературы

1. Biocompatible Materials. US Industry Study with Forecasts to 2010 & 2015. – The Freedonia Group, 2006. – 264 p.
2. M. Browne, P.J. Gregson Effect of mechanical surface pretreatment on metal ion release // *Biomaterials*. – 2000. – №21. – P. 385-392.
3. M. Niinomi Recent metallic materials for biomedical applications // *Metallurgical and Materials Transactions A*. –2002. – №33. – P. 477-486.
4. R.Z. Valiev Nanostructuring of metals by severe plastic deformation for advanced properties // *Nature Materials*. – 2004. – №3. – P. 51-516.
5. I.A. Ovid'ko, T.G. Langdon Enhanced ductility of nanocrystalline and ultrafine-grained metals // *Reviews on Advanced Materials Science*. – 2012. – №30. – P. 103-111.