

**УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6: КИНЕТИКА И МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ**

<sup>1</sup>Клевцов Г.В., <sup>2</sup>Валиев Р.З., <sup>2</sup>Семенова И.П., <sup>1</sup>Клевцова Н.А., <sup>1</sup>Мерсон Е.Д.,  
<sup>1</sup>Пигалева И.Н., <sup>1</sup>Линдеров М.Л.

<sup>1</sup>Тольяттинский государственный университет,  
г. Тольятти, Россия, E-mail: Klevtsov11948@mail.ru

<sup>2</sup>НИИ Физики перспективных материалов Уфимского государственного  
авиационного технического университета,  
г. Уфа, Россия, E-mail: rzvaliev@yahoo.com

Целью настоящей работы является исследование кинетики и механизма усталостного разрушения наноструктурированного титанового сплава ВТ6 с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, полученной путем РКУП, в сравнении с исходным крупнозернистым (КЗ) состоянием.

Материал и методики исследования. Титановый сплав ВТ6 (5,95 % V; 5,01 % Al; 89,05 % Ti) исследовали в исходном КЗ состоянии и после РКУП в УМЗ состоянии. Исходное состояние сплава получено путем горячей прокатки заготовок. Технология проведения РКУП сплава заключалась в следующем. Заготовку из сплава диаметром 20 мм и длиной 100 мм подвергали гомогенизационному отжигу с целью повышения пластичности. Затем проводили закалку в воду с температуры 960°C (выдержка 1 час), отпуск при 675°C в течение 4 часов, РКУП при 650°C (маршрут Вс, φ = 120°, n = 6 проходов) [1].

Структуру сплава изучали в растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOLJSM-6390 и в просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) JEOLJEM2100. Испытания стали на твердость проводили на твердомере ТН 300. Статическое растяжение круглых образцов диаметром 5 мм проводили на универсальной испытательной машине Н50КТ. Скорость растяжения составляла 5 мм/мин. Усталостные испытания призматических образцов толщиной 10 мм проводили при температуре 20°C по схеме трехточечного изгиба на установке Instron 8802 при ν=10 Гц, R=0,1 и ΔP от 2000 до 4500 Н. Микрофрактографические исследования изломов проводили в РЭМ SIGMA фирмы «ZEISS».

Полученные результаты. Из таблицы 1 видно, что РКУП по вышеуказанным режимам повышает твердость и прочностные свойства сплава ВТ6 примерно в 1,2 раза, однако снижает пластичность в 1,4 раза.

Таблица 1 – Средний размер зерна и механические свойства титанового сплава

Состояние сплава	d <sub>ср.</sub> , мкм	HRC	σ <sub>в</sub> , МПа	σ <sub>0,2</sub> , МПа	δ, %
Исходное состояние	15±5	34	950±20	849±30	11,5±1,5
После РКУП	0,24±0,06	36	1090±30	990±40	8,3±0,3

Результаты усталостных испытаний показали, что при одних и тех же условиях нагружения (ΔP) долговечность образцов (количество циклов до разрушения) из сплава ВТ6 в исходном состоянии выше, чем после РКУП. С уменьшением напряжения цикла, количество циклов до зарождения усталостной трещины уменьшается. Однако состояние сплава на данную характеристику оказывает незначительное влияние.

Прямолинейный участок на кинетических диаграммах усталостного разрушения сплава ВТ6 аппроксимируется уравнением Пэриса:

для КЗ сплава:

$$\frac{dl}{dN} = 7,6 \cdot 10^{-12} \Delta K^{3,63},$$

для УМЗ сплава:

$$\frac{dl}{dN} = 2,5 \cdot 10^{-11} \Delta K^{3,30}$$

При одном и том же значении  $\Delta K$  скорость распространения усталостной трещины в сплаве с УМЗ структурой несколько выше, чем в исходном сплаве. Однако коэффициент  $n$  в уравнении Пэриса для сплава с УМЗ структурой несколько ниже, чем для сплава с КЗ структурой. Следовательно, сплав УМЗ структурой менее чувствителен к перегрузкам [2-4].

На всех полученных изломах образцов из сплава ВТ6 видны две зоны: зона усталостного развития трещины (зона  $I_f$ ) [2-4] и зона долома. Микрофрактографические исследования усталостных изломов сплава в КЗ состоянии показали, что в очаге разрушения зона вытяжки  $\theta$  [4] отсутствует (рис. 1а). Микрорельеф в очаге разрушения можно характеризовать как «чешуйчатый»; видны фасетки циклического скола.

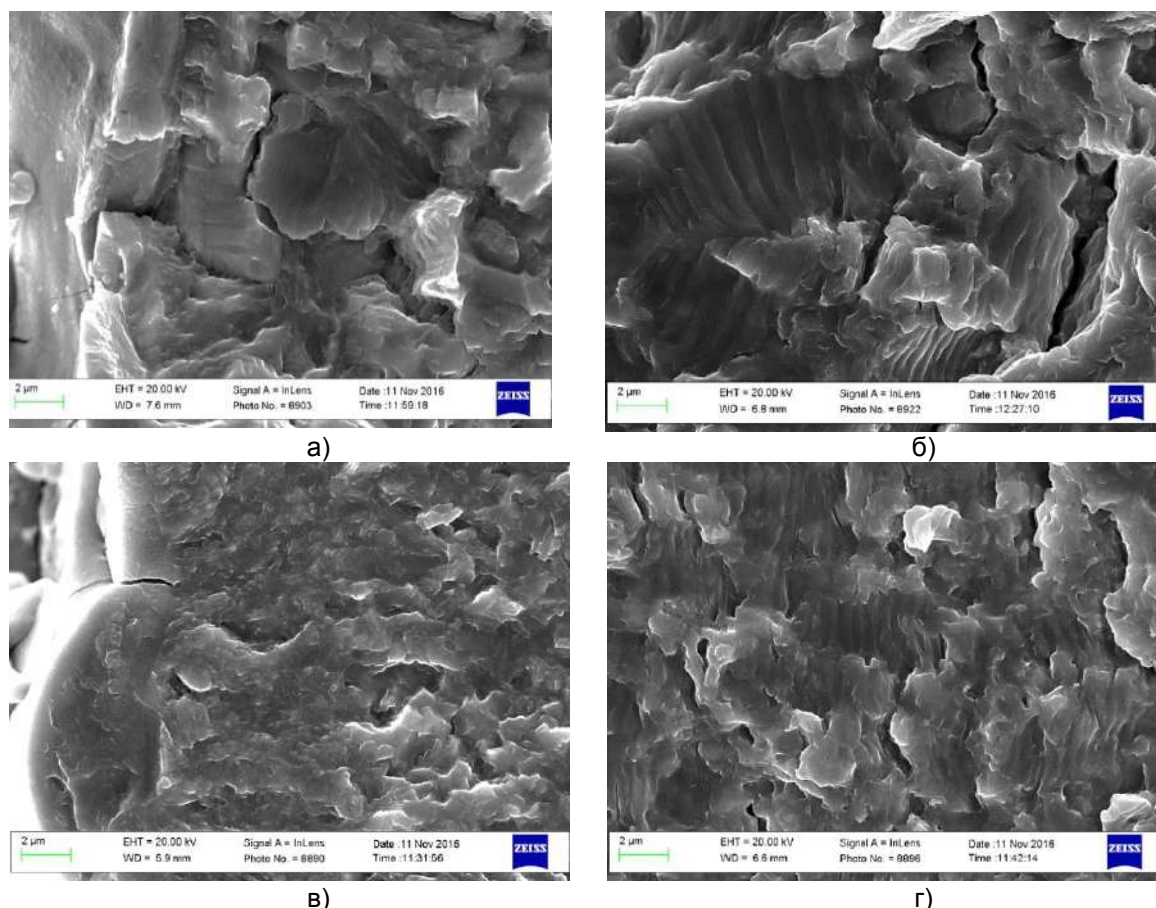


Рисунок 1 – Микрорельеф поверхности усталостного излома сплава ВТ6 в КЗ состоянии (а, б) и в УМЗ состоянии (в, г) в очаге разрушения (а, в) и при длине усталостной трещины  $l = 6$  мм (б, г). Увеличение:  $\times 5000$

Такой же «чешуйчатый» микрорельеф сохраняется на всем протяжении усталостного развития трещины. Вблизи зоны долома на поверхности чешуек можно наблюдать усталостные бороздки (рис. 1 б). Микрорельеф зоны долома состоит из гладких неравномерных ямок.

В очаге разрушения усталостных изломов сплава в УМЗ состоянии можно наблюдать мелкорельефную область длиной 2-5 мкм. Затем формируется «чешуйчатый» микрорельеф (рис. 1 в). Однако в УМЗ сплаве чешуйки более мелкие. Такой микрорельеф, как и в предыдущем случае, сохраняется на всем протяжении развития усталостной трещины. На начальных стадиях развития усталостной трещины чешуйки сравнительно гладкие, однако вблизи зоны долома видны усталостные бороздки (рис. 1 г). В зоне долома микрорельеф состоит из мелких глубоких ямок.

### Выводы

1. При одних и тех же условиях нагружения долговечность образцов (количество циклов до разрушения) из сплава ВТ6 в исходном КЗ состоянии выше, чем после РКУП в УМЗ состоянии. С уменьшением приложенной нагрузки от 4500 до 2000 Н, количество циклов до зарождения усталостной трещины уменьшается с 27 до 21 %. Однако состояние сплава на данную характеристику оказывает незначительное влияние.

2. Прямолинейный участок на кинетических диаграммах усталостного разрушения сплава ВТ6 аппроксимируется уравнением Пэриса: для КЗ сплава  $dl/dN = 7,6 \cdot 10^{-12} \Delta K^{3,6}$ , а для УМЗ сплава  $dl/dN = 2,5 \cdot 10^{-11} \Delta K^{3,3}$ .

3. Микрорельеф в очаге разрушения образцов из сплава в КЗ состоянии характеризуется как «чешуйчатый»; видны фасетки циклического скола. В очаге разрушения образцов из сплава в УМЗ состоянии имеет место мелорельефная область длиной 2-5 мкм. Далее на всем протяжении развития усталостной трещины, независимо от состояния сплава, формируется «чешуйчатый» микрорельеф. На начальных стадиях развития усталостной трещины чешуйки сравнительно гладкие; вблизи зоны долома видны усталостные бороздки. Долом образцов, независимо от состояния сплава, происходит с образованием гладких ямок.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-48-02119 р\_поволжье\_a).*

### Список литературы:

1. Ruslan Z. Valiev. Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications / Ruslan Z.Valiev, Alexander P. Zhilyaev, Terence G. Langdon.–TMS, WILEY, 2014. – 440 p.

2. Клевцов, Г.В. Прочность и механизмы разрушения объемных наноструктурированных металлических материалов: учебное пособие / Г.В. Клевцов, Е.В. Бобрук, И.П. Семенова, Н.А. Клевцова, Р.З. Валиев. – Уфа : РИК УГАТУ, 2016. – 240 с.

3. Клевцов, Г.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций / Г.В. Клевцов, Л.Р. Ботвина, Н.А. Клевцова, Л.В. Лимарь. – М. : МИСиС, 2007. – 264 с.

4. Ботвина, Л.Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов. – М. : Наука, 1989. – 230 с.