

УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТИТАНА И ТИТАНОВОГО СПЛАВА В МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ И СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ СОСТОЯНИЯХ

Целью настоящей работы является изучение влияния размера зерна на механизм усталостного разрушения образцов из титана (Ti Grande 2, K3) с размером зерна α -фазы 240 мкм и 0,15 мкм (150 Нм), а также титанового сплава (Ti-6Al-4V Eh) с размером зерна α -фазы 15 мкм и 0,3 мкм (300 Нм). Показано, что макро- и микростроение всех изломов, кроме изломов образцов из Ti с размером зерна α -фазы 240 мкм, практически не отличаются друг от друга.

Ключевые слова: усталостное разрушение, излом, усталостные зоны, макро- и микрорельеф излома, наноструктурирование, размер зерна β -фазы.

Введение. Титан и титановые сплавы отличаются высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью и хорошей биологической совместимостью. Поэтому данные материалы являются весьма перспективными в медицинской технике для изготовления протезов, крепежной арматуры, имплантантов. Известно, что наноструктурирование металлических материалов повышает их прочность и снижает их пластичность [1-3]. Широкое применение наноструктурированного титана и титановых сплавов в субмикроструктурном состоянии предполагает изучение механизмов разрушения данных материалов при различных видах нагружения.

Целью настоящей работы является изучение влияния размера зерна на механизм усталостного разрушения образцов из титана и титанового сплава.

Материал и методики исследования

В качестве исследуемого материала использовали титан (Ti Grande 2, K3) с размером зерна α -фазы 240 мкм и 0,15 мкм (150 Нм), а также титановый сплав (Ti-6Al-4V Eh) с размером зерна α -фазы 15 мкм и 0,3 мкм (300 Нм). Субмикроструктурное состояние титана и титанового сплава было получено путем равноканального углового прессования (РКУП) [1].

Усталостные испытания цилиндрических образцов с рабочим диаметром 3 мм проводили на изгиб с вращением с частотой нагружения 50 Гц. Микрофрактографические исследования усталостных изломов проводили в растровом микроскопе JSM-2T.

Результаты исследования и их обсуждение. Усталостные изломы образца из Ti с размером зерна α -фазы 240 мкм однородные, блестящие; шероховатые области чередуются с крупными ровными фасетками (рис. 1 а).

Усталостные зоны на поверхности изломов выявить не представляется возможным. Излом относительно плоский, но расположен к оси образца под углом, отличным от 90°.

На поверхности изломов образцов из Ti с размером α -фазы 0,15 мкм можно наблюдать две ярко выраженных зоны: зону усталостного разрушения I_f длиной 2,2 мм и зону долома [4, 5]. Зона I_f бархатистая, матовая, имеет очень малую шероховатость и расположена нормально к оси образца (рис. 1 б). В пределах зоны усталостного разрушения I_f можно выделить зону стабильного роста трещины I_s длиной 1,2 мм, которая отличается более светлым цветом и меньшей шероховатостью. Зона долома мелкозернистая, темная и состоит из фрагментов, расположенных под углом в 45° к плоскости излома (рис. 1 б).

Изломы образцов из сплава Ti-6Al-4V с размером зерна α -фазы 15 мкм (рис. 1 в) содержат две ярко выраженных зоны: зону усталостного разрушения I_f длиной 2,2 мм и зону долома. Зона I_f мелкозернистая, матовая, имеет малую шероховатость, относительно плоская и расположена под очень небольшим углом к оси образца. В пределах зоны усталостного разрушения I_f можно выделить зону стабильного роста трещины I_s длиной 1,3 мм, которая отличается более светлым цветом и меньшей шероховатостью. Зона долома мелкозернистая, темная;

также состоит из фрагментов, расположенных под углом в 45° к плоскости излома (рис. 1 в).

На поверхности изломов образцов из сплава Ti-6Al-4V с размером зерна α -фазы 0,3 мкм (рис. 1 г) также можно наблюдать две ярко выраженных зоны: зону усталостного разрушения l_f длиной 2,5 мм и зону долома. Зона l_f мелкозернистая, матовая, имеет малую шероховатость, выпуклая и расположена под небольшим углом к оси образца. В пределах зоны усталостного разрушения l_f можно выделить зону стабильного роста трещины l_s длиной 1,5 мм, которая отличается более светлым цветом и меньшей шероховатостью. Зона долома мелкозернистая, темная; также состоит из фрагментов, расположенных под углом в 45° к плоскости излома (рис. 1 г).

Микрофрактографический анализ усталостных изломов образцов из Ti с размером зерна α -фазы 240 мкм показал (рис. 2 а) наличие участков циклического скола, чередующихся с вязкими областями. При больших увеличениях (рис. 2 б, в) видны вторичные трещины и участки с борозчатым микрорельефом.

Микрорельеф усталостных изломов образцов из Ti с размером α -фазы 0,15 мкм (150 Нм) представлен на рисунке 3. Видно, что вблизи очага разрушения излом практически бесструктурный, по-видимому, от взаимного воздействия поверхностей изломов в процессе нагружения образцов. Хорошо видны несплошности металла (рис. 3 а). С увеличением длины усталостной трещины в пределах зоны l_s (рис. 3 б, в) увеличивается шероховатость излома.

При переходе в зону ускоренного развития трещины l_f (рис. 3 г) излом становится более вязким; при большом увеличении (рис. 3 д) просматриваются вязкие бороздки. Зона долома (рис. 3 е) полностью вязкая; состоит из мелких и достаточно глубоких ямок.

Микрорельеф изломов образцов из сплава Ti-6Al-4V с размером зерна α -фазы 15 мкм вблизи очага разрушения малорельефный (рис. 4 а). В зоне стабильного роста трещины l_s (рис. 4 б, в) просматриваются усталостные бороздки; при большом увеличении видны вторичные трещины. При переходе в зону ускоренного роста тре-

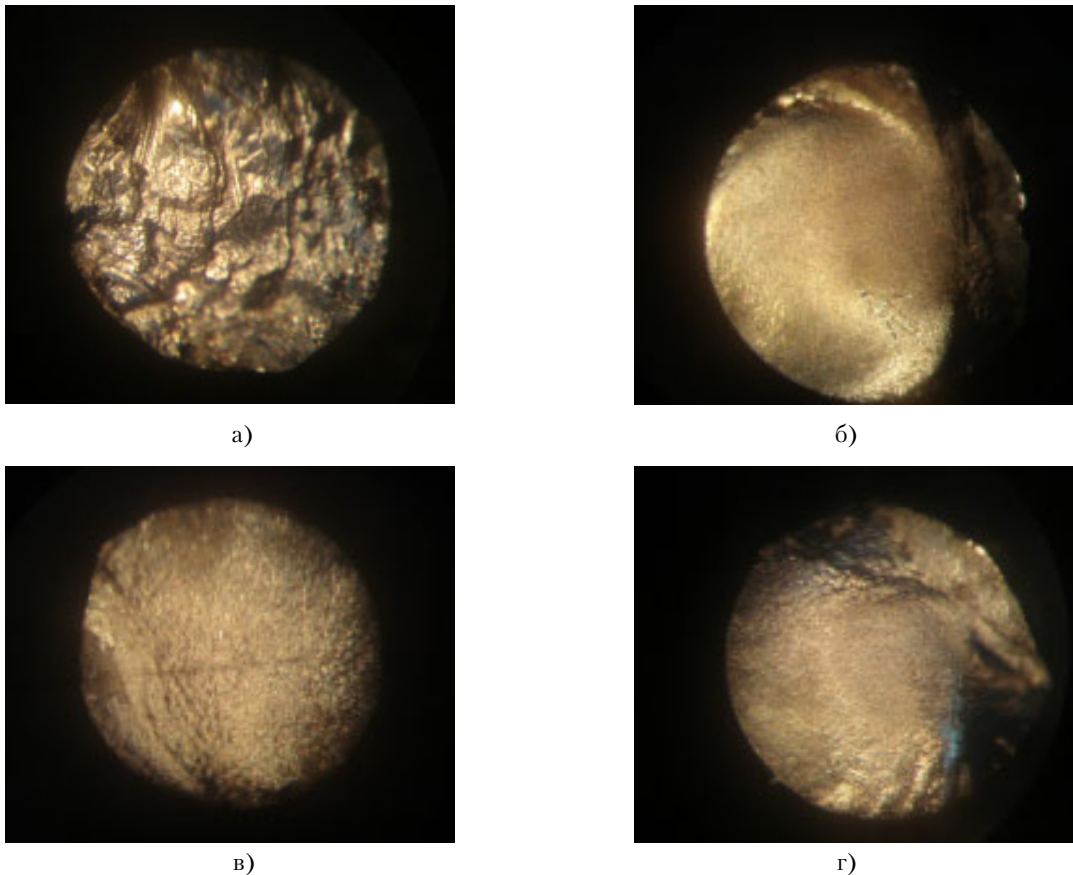


Рисунок 1. Характерный вид усталостных изломов образца из Ti с размером зерна α -фазы 240 мкм (а) и 0,15 мкм (б), а также изломов сплава Ti-6Al-4V с размером зерна α -фазы 15 мкм (в) и 0,3 мкм (г): а, б, в, г – $\times 10$

щины и в самой зоне l_r (рис. 4 г) микрорельеф ямочный. Зона долома состоит из мелких неглубоких ямок (рис. 4 д).

Микрофрактографический анализ излома сплава Ti-6Al-4V с размером зерна α -фазы 0,3 мкм представлен на рисунке 5.

Вблизи очага разрушения микрорельеф практически гладкий со следами коррозии (рис. 5 а). При увеличении длины усталостной трещины в пределах зоны l_s (рис. 5 б, в) микрорельеф становится все более вязким. В зоне ускорен-

ного развития трещины наблюдаются ямочный микрорельеф, вязкие бороздки и вторичные трещины (рис. 5 г, д). Микрорельеф в зоне долома состоит из неглубоких, но ярко выраженных ямок (рис. 5 е).

Заключение

Таким образом, мы видим, что макростроение всех изломов, кроме изломов образцов из Ti с размером зерна α -фазы 240 мкм, практически не отличается: они имеют близкую величину

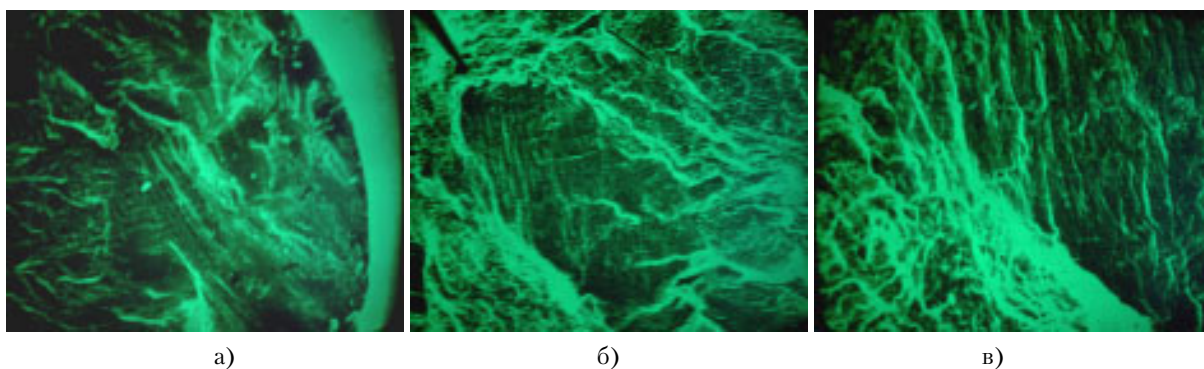


Рисунок 2. Микрорельеф излома Ti с размером зерна α -фазы 240 мкм на различном расстоянии (l) от очага разрушения: а – общий вид; б, в – $l = 1$ мм. а – $\times 100$, б – $\times 350$, в – $\times 1000$

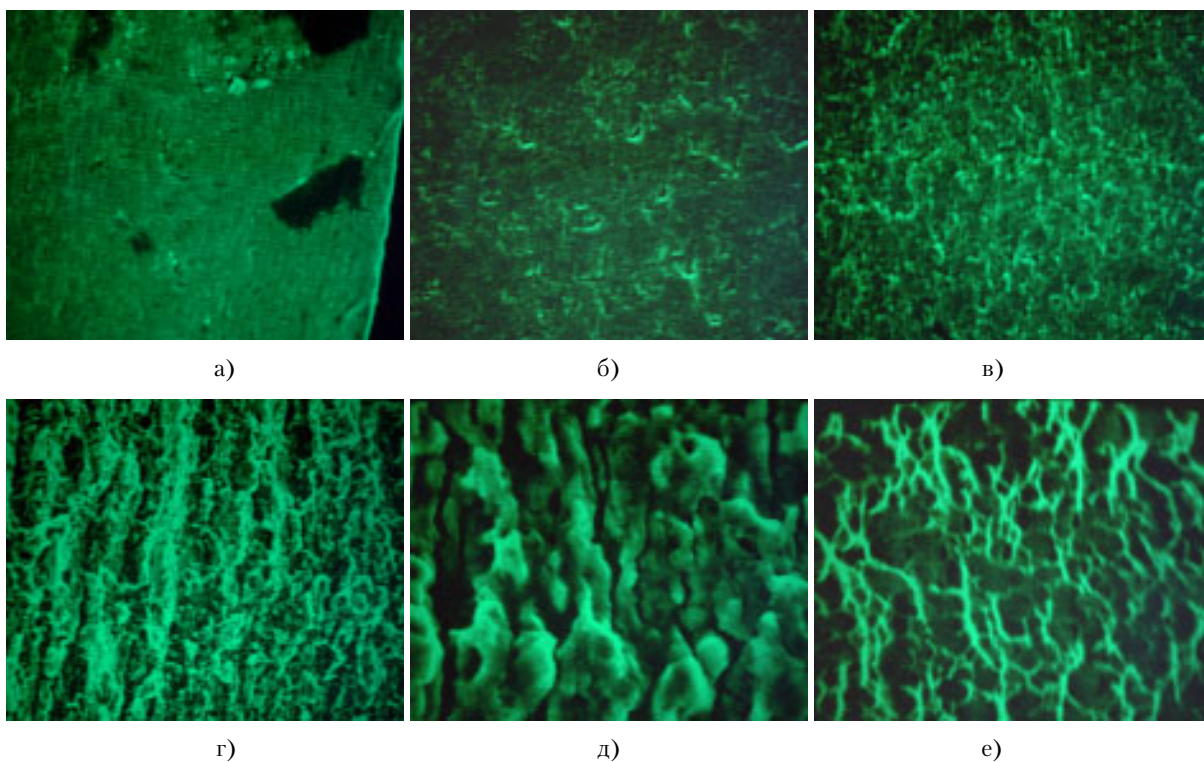


Рисунок 3. Микрорельеф излома Ti с размером зерна α -фазы 0,15 мкм (150 Нм) на различном расстоянии (l) от очага разрушения: а – очаг разрушения ($\times 1000$); б – зона l_s ($l=0,5$ мм) ($\times 1000$); в – зона l_s ($l=1$ мм) ($\times 1000$); г – зона l_r ($l=2$ мм) ($\times 1000$); д – зона l_r ($l=2$ мм) ($\times 5000$); е – долом ($\times 5000$)

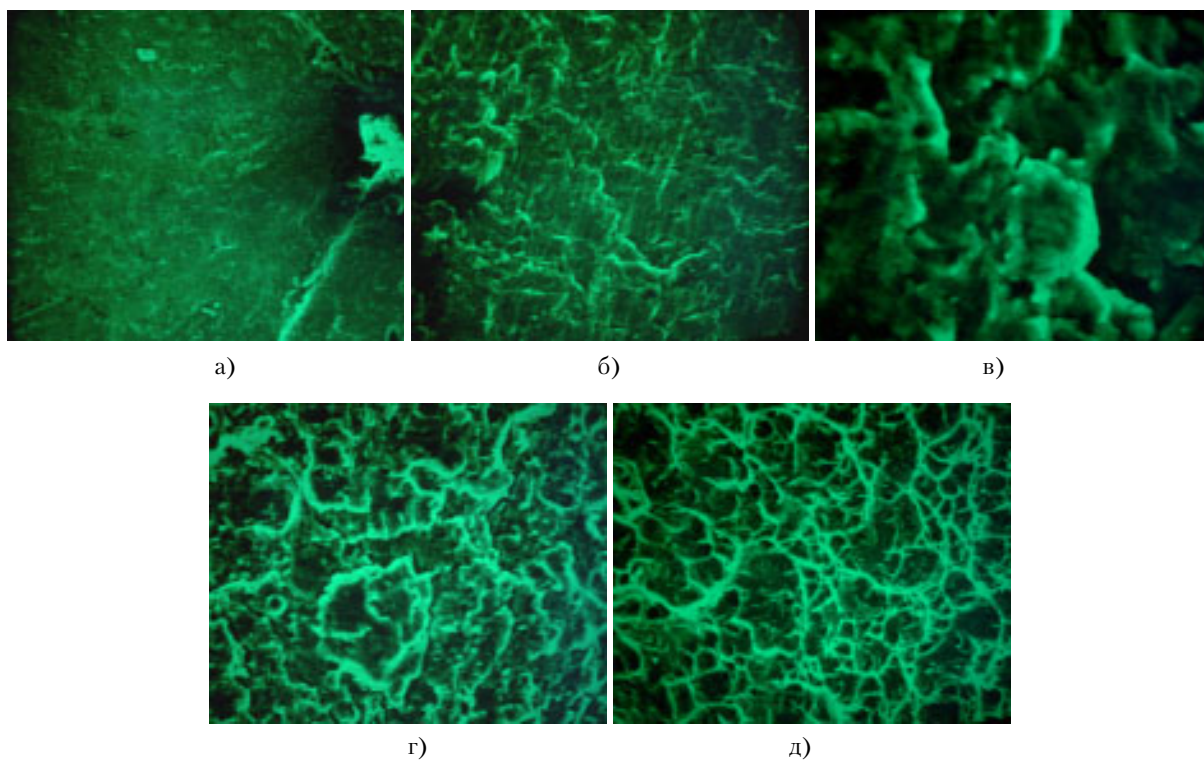


Рисунок 4. Микрорельеф излома Ti-6Al-4V с размером зерна α -фазы 15 мкм на различном расстоянии (l) от очага разрушения: а – очаг разрушения (x350); б – зона l_s (l=0,5 мм) (x1000); в – зона l_s (l=0,5 мм) (x5000); г – зона l_r (l=2 мм) (x1000); д – долом (x5000)

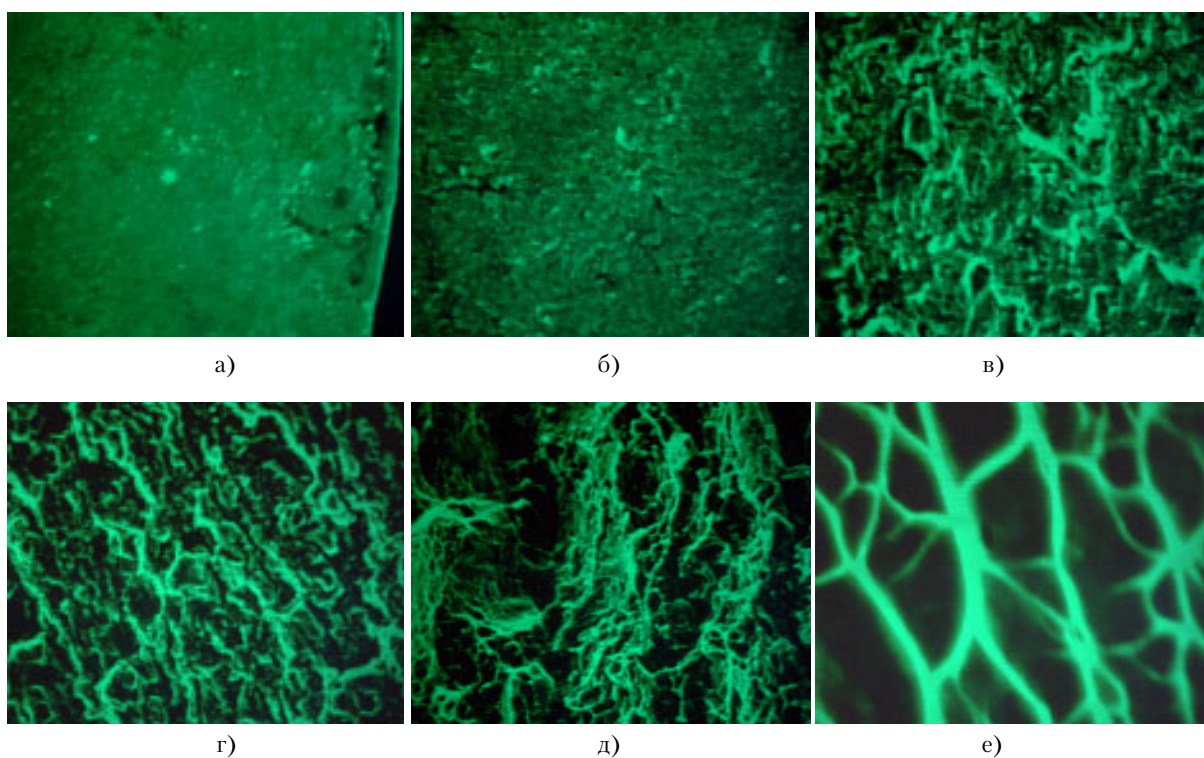


Рисунок 5. Микрорельеф излома сплава Ti-6Al-4V с размером зерна α -фазы 0,3 мкм (300 Нм) на различном расстоянии (l) от очага разрушения: а – очаг разрушения (x350); б – зона l_s (l=0,5 мм) (x1000); в – зона l_s (l=1,0 мм) (x1000); г – зона l_r (l=2 мм) (x1000); д – зона l_r (l=2,5 мм) (x1000); е – долом (x5000)

шероховатости поверхности в зоне усталостного разрушения и профиль данной зоны.

Изломы образца из Ti с размером зерна α -фазы 240 мкм однородные, блестящие; шероховатые области чередуются с крупными ровными фасетками. Усталостные зоны на поверхности изломов выявить не представляется возможным. Микрофрактографический анализ показал наличие участков циклического скола, чередующихся с вязкими областями.

На поверхности остальных изломов можно наблюдать две ярко выраженных зоны: зону усталостного разрушения I_f и зону долома. Зона I_f бархатистая, матовая, имеет очень малую шероховатость и расположена нормально к оси образца. В пределах зоны усталостного разрушения I_f можно выделить зону стабильного роста трещины I_s , которая отли-

чается более светлым цветом и меньшей шероховатостью. Зона долома состоит из фрагментов, расположенных под углом в 45° к плоскости излома.

Микрорельеф изломов тоже схожий: вблизи очага разрушения – практически безструктурный, по-видимому, от взаимного воздействия поверхностей изломов в процессе нагружения. С увеличением длины усталостной трещины увеличивается шероховатость излома, микрорельеф становится ямочным. Иногда просматриваются вязкие усталостные бороздки. Зона долома вязкая с ямочным микрорельефом: мелкими равноосными ямками (Ti с размером зерна α -фазы 0,15 мкм и сплав Ti-6Al-4V с размером зерна α -фазы 15 мкм) и неглубокими, но крупными ямками (сплав Ti-6Al-4V с размером зерна α -фазы 0,3 мкм).

Список использованной литературы:

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
2. Морохов И.Д., Трусов Л.Д., Лаповок В.И. Физические явления в ультрадисперсных средах. – М.: Наука, 1984. – 472 с.
3. Valiev R.Z., Tsenev N.K. – In: Hot deformation of aluminum alloys (ed. By T.G. Langdon, H.D. Merchant, J.G. Morris, M.A. Zaidi). TMS. Warrendale, PA, 1991. P. 319.
4. Ботвина Л. Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов. – М.: Наука, 1989. – 230 с.
5. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А., Лимарь Л.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций. – М.: МИСиС, 2007. – 264 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (проект АБЦП № 1383).

Сведения об авторах:

Клевцова Н.А. доцент кафедры радиофизики и электроники Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, доцент, 460018, пр-т Победы, 13, ауд. 14232, тел.: (3532) 364653, 372457, e-mail: klevtsov11948@mail.ru

Валиев Р.З. директор Института физики перспективных материалов при УГАТУ, доктор ф.-м. наук, профессор, 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, УГАТУ, тел.: (342) 2733422, e-mail: RZValiev@mail.rb.ru

Клевцов Г.В. зав. кафедрой физики металлов и наноструктур Оренбургского государственного университета, доктор технических наук, профессор, 460018, пр-т Победы, 13, ауд. 14232, тел.: (3532) 364653, 372457, e-mail: klevtsov11948@mail.ru

Семенова И.П. с.н.с. Института физики перспективных материалов при УГАТУ, кандидат ф.-м. наук, 450000, г. Уфа, ул. К.Маркса, 12, УГАТУ, тел.: (342) 2733422, e-mail: RZValiev@mail.rb.ru

Фесенюк М.В. – Начальник ЦЗЛ ПО «Стрела», 460005, Оренбург, ул. Шевченко, 26, тел.: 89058914316

**Klevtsova N.A., Valiev R.Z., Klevtsov G.V., Semenova I.P., Fesenyuk M.V.
FATIGUE BREAKDOWN OF TITANIUM AND TITANIUM ALLOY SAMPLES IN MICROCRYSTALLINE AND SUB MICROCRYSTALLINE STATES**

The objective of this work is study of the grain size impact on fatigue breakdown of titanium (Ti Grande 2, K3) with a b-phase grain size of 240 mkm and 0.15 mkm (150 Нм) and also titanium alloys (Ti-6Al-4V Eh) with a b-phase grain size of 15 mkm and 0.3 mkm (300 Нм) samples. It was shown that macro- and microstructure of the all breakings except those of titanium samples with a b-phase grain size of 240 mkm was nearly the same.

Key words: fatigue breakdown, breaking, fatigue zones, macro- and micro topography of breaking, nanostructuring, b-phase grain size.