

УДК 669.295:620.178.38

Канд. техн. наук Д. В. Павленко, Д. В. Ткач, канд. техн. наук В. Л. Грешта

*Запорожский национальный технический университет*

## ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ И ВЫНОСЛИВОСТЬ СПЛАВА VT1-0 С СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

*Приведены результаты испытаний при циклических нагрузках образцов из сплава VT1-0 в крупнокристаллическом и субмикрокристаллическом состояниях при комнатной и повышенной температурах. Показано, что создание субмикрокристаллической структуры приводит к замедлению скорости накопления остаточной деформации при циклическом нагружении, повышению долговечности и предела выносливости в рабочем диапазоне температур сплава.*

**Ключевые слова:** объемные наноматериалы, предел выносливости, титановый сплав, усталость, разрушение, структура, излом.

### 1 Введение

Перспективным методом получения материалов с повышенными механическими свойствами является метод интенсивной пластической деформации. Он позволяет получать сплавы с ультрадисперсной зеренной структурой, что приводит к резкому изменению их механических и физических свойств по сравнению с исходным состоянием [1–3].

При производстве летательных аппаратов и газотурбинных двигателей находят широкое применение сплавы на основе титана, характеризующиеся высокой удельной прочностью. Однако существенным недостатком титановых сплавов является высокая чувствительность к концентраторам напряжений, что приводит к резкому снижению предела выносливости деталей в случае их повреждений или воздействия высокого уровня концентрации напряжений [4].

В настоящее время в технике находят широкое применение объемные наноматериалы, т.е. сплавы в так называемом наноструктурированном и субмикрокристаллическом (СМК) состоянии [1, 2 и др.]. Их широкое применение вызвано, в первую очередь, уникальным сочетанием физических, механических, эксплуатационных и ряда других свойств [5, 6 и др.]. Так, обладая повышенной прочностью, такие сплавы характеризуются и достаточно высокой пластичностью, что делает их привлекательными для изготовления многих ответственных деталей машин.

Широкий круг методов интенсивной пластической деформации [2, 6] позволяет формировать субмикро- и наноструктурное состояние в титановых сплавах, широко используемых в авиадвигателестроении для изготовления деталей ротора и статора компрессора [7]. В литературе уде-

ляется большое внимание свойствам сплавов с СМК структурой при статических нагрузках [2, 6], в то время как их практическое применение для ответственных деталей машин требует изучения комплекса специальных технологических и эксплуатационных свойств, в том числе и прочности при циклических нагрузках.

Существующие публикации указывают на то, что для таких сплавов отмечается повышение предела выносливости в 1,5 раза, что свидетельствует о возможности увеличения ресурса деталей, для которых эти свойства являются критическими, например, для лопаток газотурбинных двигателей [8]. Однако объем исследований, посвященных оценке влияния повышенной температуры на выносливость титановых сплавов в области мало- и многоциклового усталости весьма ограничен.

Целью настоящей работы являлось оценить выносливость титановых сплавов с субмикрокристаллической структурой в диапазоне рабочих температур.

### 2 Материалы и методы исследований

Исследования выполняли на образцах из титанового сплава технической чистоты VT1-0 в исходном (литом) и субмикрокристаллическом состояниях. Литые образцы получены методом вакуумно-дугового переплава. Субмикрокристаллическую структуру в образцах формировали интенсивной пластической деформацией, методом винтовой экструзии в Донецком ФТИ им. А. А. Галкина. [3]. Деформацию исходной заготовки выполняли при температуре 400 °С. С целью накопления больших степеней деформации и получения однородной структуры большее число проходов заготовки через винтовой

канал составляло пять раз, что обеспечивало размер структурных элементов (субзерен) на уровне 200...500 нм [9].

Испытания на малоцикловую усталость выполняли на плоских призматических образцах толщиной 2 мм в условиях жесткого режима нагружения при чистом изгибе на машине ИП-2. Частота нагружения составляла 1 Гц. В процессе испытаний при помощи оптического микроскопа МБС-9 осуществляли непрерывное наблюдение за предварительно подготовленным участком в зоне конструктивного концентратора напряжений образцов, для которого фиксировали число циклов до появления сетки микротрещин, их слияния в магистральную макротрещину и полного разрушения образца. Результаты испытаний для каждой из партий образцов (810 шт.) усредняли.

Испытания на многоцикловую усталость выполняли на призматических образцах при консольном изгибе. Напряжения в опасном сечении образца контролировали по амплитуде колебаний консольного конца с учетом изменения модуля упругости материала при нагреве. Частота нагружения соответствовала первой изгибной частоте образца и находилась в диапазоне 383...400 Гц. Образцы испытывали при температурах 20 °С, 200 °С, 300 °С и 400 °С. Предел выносливости определяли по методике, описанной в работе [10], на базе  $10^8$  циклов.

Образцы для испытаний вырезали эрозионным способом. Микроструктуру образцов исследовали с помощью оптического микроскопа МИМ-8 и растрового электронного микроскопа JSM-T300 во вторичных электронах (темнопольное изображение). Фрактограммы разрушений получены при помощи растрового электронного микроскопа.

Рентгенографические исследования проводили на дифрактометре ДРОН-3М. Применяли характеристическое излучение  $\beta$ -Cu. Использовали несколько (3...5) углов  $\theta$  и 2...5 съемок с одного и того же места образца при каждом из этих углов. Снимали по 3 дифрактограммы при четырех углах. Площадь облучаемого участка на поверхности образца составляла 1...10 мм<sup>2</sup>.

### 3 Результаты исследований и их обсуждение

Микроструктура исходного (литого) образца ВТ1-0 представляла собой крупные зерна претерпевшей распад  $\beta$ -фазы, в пределах которых отчетливо наблюдались более мелкие пластинчатые зерна  $\alpha$ -фазы, собранные в несколько отличающиеся ориентацией пачки (рис. 1, а), что типично для литого  $\alpha$ -титана. В результате деформационного воздействия наблюдалось значительное изменение структуры  $\alpha$ -фазы, которая трансформировалась в кристаллические образования волнистой пластинчатой формы (рис. 1, б), что, очевидно, объясняется особенностями технологии получения данного материала. Как видно из рис. 1, б, интенсивная пластическая деформация привела к утонению структурных элементов с формированием четко выраженной направленности кристаллитов в пределах конкретного локального объема. Границы зерен  $\alpha$ -фазы при использовании обычного травления и малых увеличений выявить не удалось. Исследования на растровом электронном микроскопе ( $\times 5000$ ) показали, что структура является однородной, ориентированной и носит ячеистый характер (рис. 1, в). Средний размер ячеек в поперечной части составляет 400...1000 нм, в продольной — 1–5 мкм.

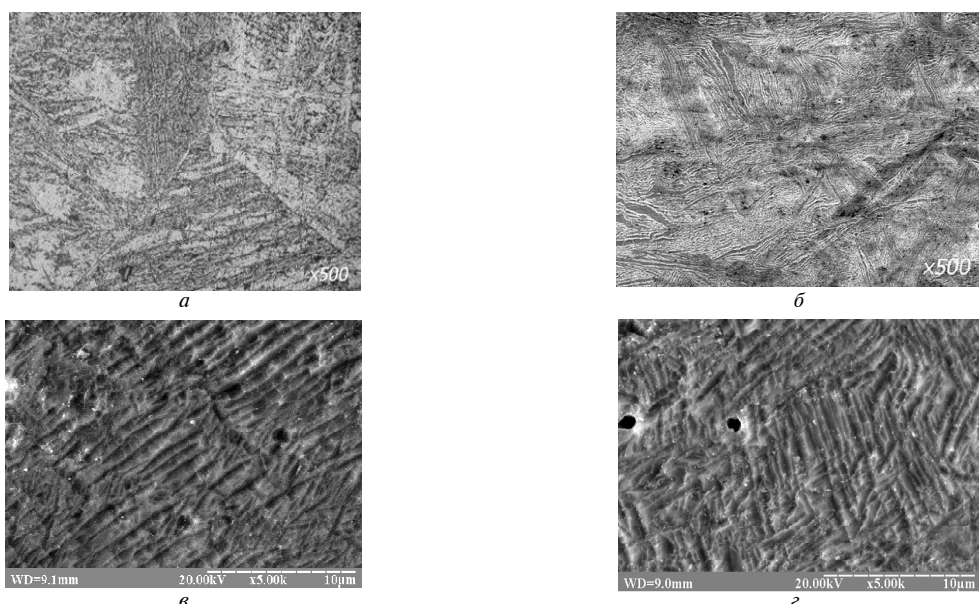


Рис. 1. Микроструктура  $\alpha$ -фазы титана в различных структурных состояниях: а – исходный образец; б, в, з – образцы после винтовой экструзии (направление «прокатки»)

Наличие преимущественной кристаллографической ориентировки было также обнаружено и при сравнительном анализе дифрактограмм литого и деформированного винтовой экструзией материала (рис. 2). В соответствии с которыми на дифрактограммах, полученных от деформированных образцов, имело место перераспределение интенсивностей рентгеновских пиков, что указывает на появление определенной ориентации зерен после винтовой экструзии по отношению к табличным значениям максимумов, характерных для литого состояния.

С целью установления характера взаимосвязей, протекающих в процессе экструзии структурных изменений с механическими и эксплуатационными свойствами, проводились испытания на усталость, в процессе которых определяли величину остаточной деформации после различного числа наработки образцов. По характеру данной зависимости можно судить об изменении механизмов деформации при соответствующем числе циклов.

Для выбора максимальных напряжений циклирования были определены зависимости накопления остаточной микропластической деформации при квазистатическом изгибе от уровня приложенных напряжений (рис. 3).

Для всех исследованных образцов, на зависимостях накопления остаточной деформации от уровня приложенных напряжений можно выделить две стадии – линейную и параболическую. Линейная стадия соответствует пластической деформации отдельных, не контактирующих между собой зерен, а соседние зерна осуществляют упругую аккомодацию.

Начало параболической стадии связано с кооперативной пластической деформацией зерен. На параболической стадии скорость накопления остаточной деформации с увеличением напряжения резко возрастает. В работе [11] на ряде материалов показано, что напряжение перехода от

первой ко второй стадии (макроскопический предел упругости  $\sigma''$ ) примерно соответствует пределу выносливости или, по крайней мере, может характеризовать нижнюю границу значений предела выносливости.

На рис. 4, 5 показаны зависимости накопления остаточной деформации от приложенного напряжения для образцов в исходном состоянии и после винтовой экструзии при температурах 20 °С, 200 °С, 300 °С и 400 °С. Зависимость предела выносливости образцов от температуры показана на рис. 6.

Полученные зависимости для всех исследованных сплавов имеют одинаковый характер. На кривых накопления остаточной деформации можно выделить, по крайней мере, две стадии с различной скоростью накопления остаточной деформации. Визуальное наблюдение за поверхностью образца в процессе циклирования позволяет сказать, что последняя стадия – с максимальной скоростью накопления остаточной деформации – связана с образованием и быстрым распространением магистральной трещины для всех исследованных образцов. В материале, подвергнутом винтовой экструзии, на начальных стадиях накопление остаточной деформации с ростом числа циклов при сравнимых напряжениях циклирования происходит с меньшей интенсивностью. Таким образом, и при циклическом нагружении большей стабильностью обладают образцы, подвергнутые интенсивной пластической деформации.

Результаты испытаний на усталость партий однотипных образцов в исходном и деформированном состоянии на базе  $10^8$  циклов подтвердили результаты испытаний по ускоренной методике и показали (рис. 7), что предел выносливости образцов в субмикроструктуральном состоянии превышает аналогичное значение для образцов в исходном состоянии в 1,3...1,6 раза.

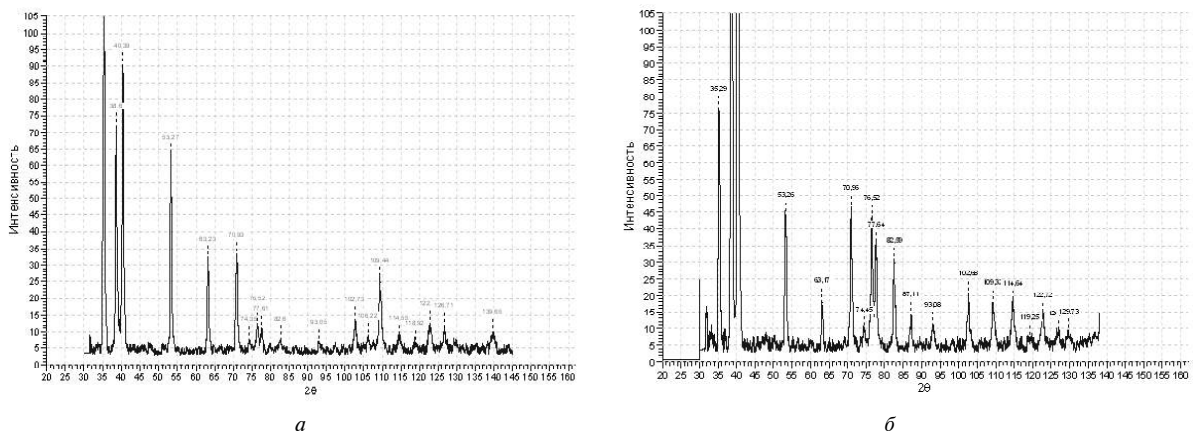
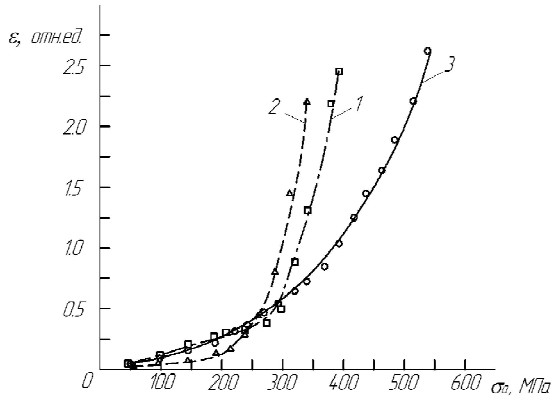
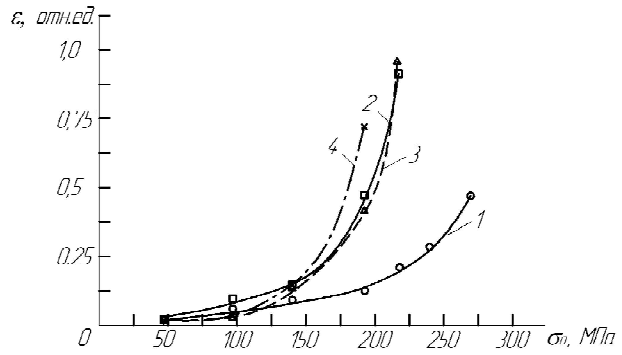


Рис. 2. Дифрактограммы титана в различных состояниях:  
 а – исходный образец; б – образец после винтовой экструзии



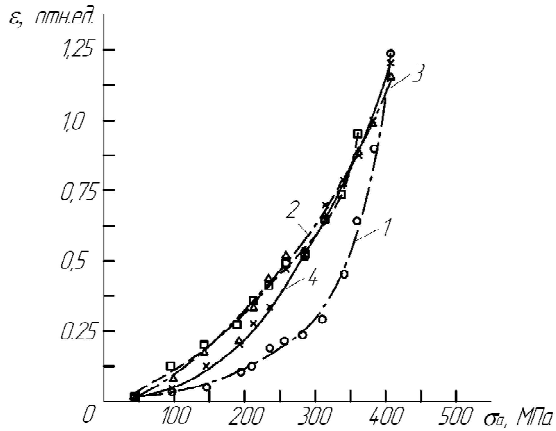
**Рис. 3.** Зависимость накопления остаточной деформации от напряжения циклирования для образцов в исходном состоянии:

1 – в литом состоянии; 2 – в литом состоянии после отжига; 3 – после винтовой экструзии



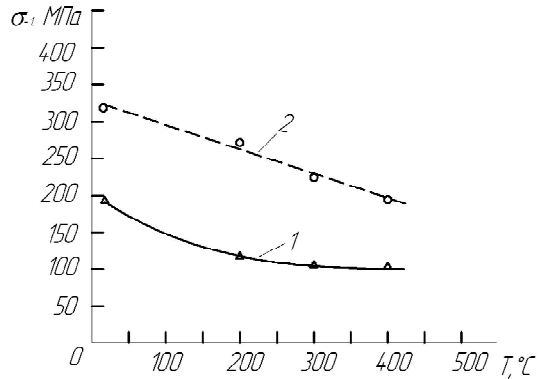
**Рис. 4.** Зависимость накопления остаточной деформации от напряжения циклирования для образцов в исходном состоянии (отжиг) при температурах:

20 °С – (1); 200 °С – (2); 300 °С – (3); 400 °С – (4)

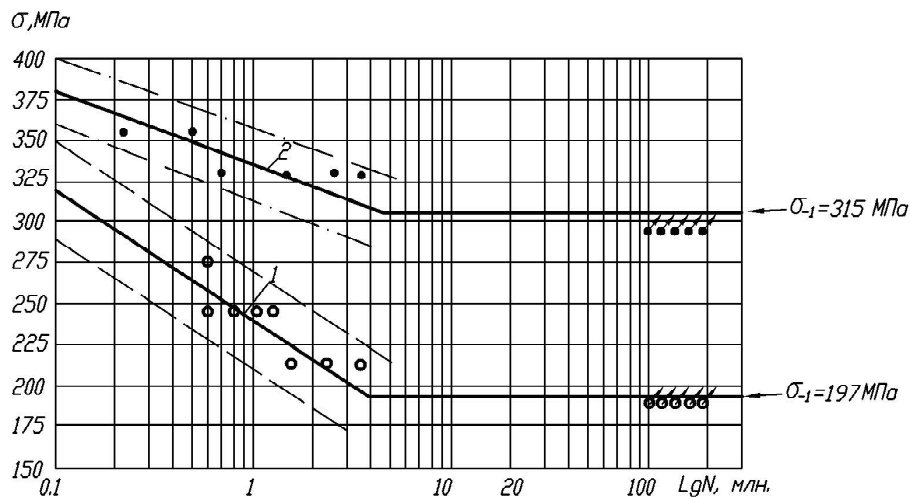


**Рис. 5.** Зависимость накопления остаточной деформации от напряжения циклирования для образцов после винтовой экструзии при температурах:

20 °С – (1); 200 °С – (2); 300 °С – (3); 400 °С – (4)



**Рис. 6.** Зависимость предела выносливости образцов от температуры



**Рис. 7.** Кривые выносливости для образцов с исходной (1) и СМК (2) структурой

С увеличением температуры предел выносливости снижается как в сплаве с СМК структурой, так и в материале с крупнокристаллической структурой. В диапазоне температур 200...220 °С значение предела выносливости для сплава в крупнокристаллическом состоянии стабилизируется, в то время как для сплава с СМК структурой его величина продолжает монотонно уменьшаться в исследованном диапазоне температур (см. рис. 6).

Характер изломов практически одинаков для всех исследованных образцов независимо от исходного структурного состояния (рис. 8, 9). Поверхности усталостного разрушения расположены нормально по отношению к боковым граням. Излом довольно однороден в центральной части образца и в области, подвергавшейся при циклировании растяжению. Область сжатия имеет несколько отличный вид и отделена от остальной поверхности четкой границей, проходящей вдоль всего образца. По-видимому, это зона долома. Ширина этой зоны составляет 25...40 мкм. Характер излома ближе к квазихрупкому. На изломе наблюдается значительное количество вторичных трещин. В соответствии с приведенной информацией можно говорить о сходстве механизмов разрушения.

Для определения влияния структурных фак-

торов на механизмы разрушения при циклических нагрузках с низкой частотой в упругопластической области деформаций проводили испытания на малоцикловую усталость.

Испытания на малоцикловую усталость показали, что образцы с СМК структурой имеют более высокую долговечность (табл. 1). Наблюдение за поверхностью образца показало, что последняя стадия накопления остаточной деформации связана с образованием и быстрым распространением магистральной трещины, которая зарождалась на боковой грани. При этом в образцах с СМК структурой трещины длительное время не наблюдались (более 1000 циклов). Возможно, это является результатом того, что скорость распространения малых усталостных трещин замедляется вследствие формирования при винтовой экструзии развитой субзеренной структуры и увеличением протяженности зернограницных линий, что обуславливает реализацию барьерного механизма распространения магистральной трещины. Однако появление трещин большего размера приводило к быстрому образованию магистральной трещины и разрушению материала, что, в общем, является особенностью как титановых, так и других субмикроструктурных материалов.

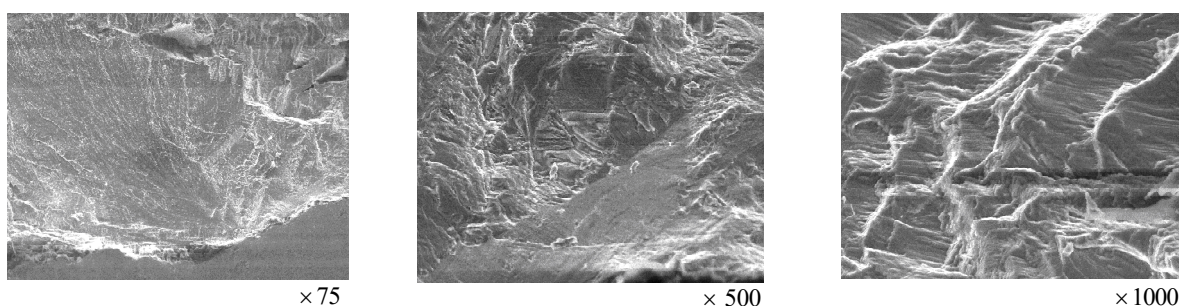


Рис. 8. Фрактограммы очаговой зоны излома образцов в исходном состоянии

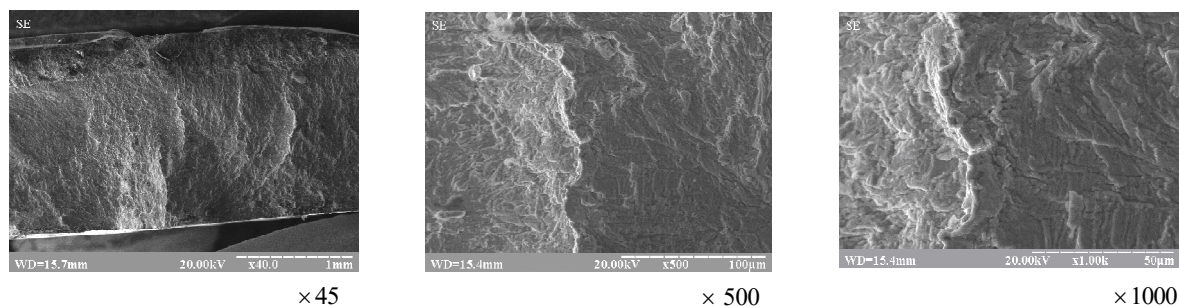


Рис. 9. Фрактограммы очаговой зоны излома образцов после винтовой экструзии

Таблица 1 – Результаты испытаний на малоцикловую усталость

Состояние образцов	Среднее значение числа циклов до разрушения, $N_f$ , циклов	Среднеквадратичное отклонение числа циклов до разрушения
В исходном (крупнокристаллическом, литом) состоянии	1203	158
В субмикроструктурном состоянии	3326	323

Для титана в исходном состоянии характерно зарождение микротрещин в местах тройного стыка и их последующее слияние. Фрактографические исследования образцов в СМК состоянии показали наличие трех типичных для процесса усталости зон (зона зарождения трещины, зона ускоренного развития трещины и зона долома). На первой (припороговой) стадии распространения усталостные трещины распространялись прерывисто (рис. 10, б), при этом наблюдаются участки пластической деформации. Как видно из рис. 10, б, в месте зарождения каждой отдельной трещины образовывался ступенчатый рельеф, что говорит о слиянии в этом месте более мелких трещин в магистральную.

Трещины появлялись на поверхности образца, что можно пояснить неоднородностью структуры после механической обработки, и по объему образца, вследствие резкого увеличения количества дефектов в процессе интенсивной пластической деформации с последующим их скоплением и, соответственно, образованием микротрещин. Вязкие усталостные бороздки (рис. 10, з), расположенные перпендикулярно движению трещины, являются типичными признаками усталостного разрушения.

Излом, отвечающий стадии стабильного распространения трещины (рис. 10, в, з), по-видимому, соответствует вязкому разрушению: наблюдается смешанный характер разрушения (бороздчатый рельеф в сочетании с ямками), что типично для малоциклового усталости. Наличие ямок может свидетельствовать о высокой пластичности.

Полученные результаты показывают, что интенсивная пластическая деформация титана приводит к повышению сопротивления малоциклового усталости. Среднее число циклов до разрушения выросло почти в 3 раза, но при этом для образцов с СМК структурой наблюдается рост среднеквадратического отклонения количества циклов до разрушения в 2 раза. Различные структурные состояния исследуемого материала приводят к изменению механизмов зарождения микротрещин вследствие различия структурных факторов. Таким образом, следует отметить значительное влияние таких структурных факторов как общая протяженность зернограницных линий, энергетическое состояние границ, субзерненное строение на механизм зарождения микротрещин и характер разрушения в целом.

#### 4 Выводы

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Предел выносливости титановых сплавов в субмикроструктурном состоянии в многоциклового области превышает аналогичное значение для сплава в исходном (крупнозернистом) состоянии в диапазоне температур 20...400 °С в 1,3...1,6 раза.

2. Повышение температуры испытаний приводит к снижению предела выносливости сплава ВТ1-0 как в крупнокристаллическом, так и в субмикроструктурном состоянии.

3. Для сплава в субмикроструктурном состоянии наблюдается монотонное снижение пре-

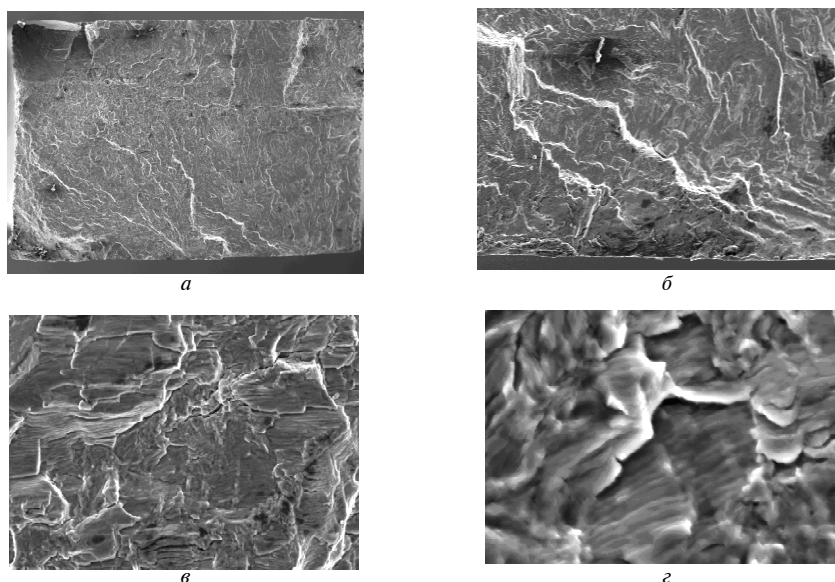


Рис. 10. Топография поверхности разрушения образцов с СМК структурой после испытаний на малоциклового усталость:

а – общий вид излома (× 30); б – место зарождения усталостной трещины (× 100); в – зона распространения усталостной трещины (× 1000); з – усталостные бороздки (× 5000)

дела выносливости по мере увеличения температуры.

4. Долговечность образцов из сплава в субмикроструктурном состоянии в малоцикловой области в 3 раза выше аналогичного значения для сплава в исходном состоянии.

#### Перечень ссылок

1. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 416 с.
2. Валиев Р. З. Наноструктурные материалы, полученные методом интенсивной пластической деформации / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М. : Логос, 2000. – 272 с.
3. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации / [Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, Д. В. Орлов, С. Г. Сынков]. – Донецк : Фирма ТЕАН, 2003. – 87 с.
4. Исследование геометрических параметров пазов диска компрессора типа «ласточкин хвост» и определение их оптимального сочетания / [Н. В. Гончар, Д. В. Павленко, М. А. Трубников, В. М. Чернецов] // Вісник двигунобудування. – 2007. – № 1. – С. 160–165.
5. Влияние холодной пластической деформации на структуру, деформационное поведение и механические свойства ультрамелкозернистого титана / [Г. П. Грабовецкая, Ю. Р. Колобов, К. В. Иванов, О. В. Забудченко] // Физическая мезомеханика 7, спец. вып., Ч. 2(2004). – С. 22–25.
6. Объемные наноструктурные материалы и сплавы с уникальными механическими свойствами для перспективных применений / [Р. З. Валиев, Д. В. Гундеров, М. Ю. Мурашкин, И. И. Семенова] // Вестник УГАТУ. – 2006. – Т. 7, № 3(16). – С. 23–24.
7. Скубачевский Г. С. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей : учебник для вузов / Г. С. Скубачевский; Г. С. Скубачевский. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Машиностроение, 1965. – 451 с.
8. Практические аспекты применения титановых сплавов с нанокристаллической структурой / [В. А. Салищев, С. В. Жеребцов, С. П. Малышева и др.] // Сб. тр. Международной конференции Ti-2007 в СНГ. – 2007. – С. 235–242.
9. Павленко Д. В. Формирование субкристаллической структуры в сложнолегированных титановых сплавах / [Д. В. Павленко, А. В. Овчинников, А. Я. Качан и др.] // Перспективные материалы. – 2009. – № 7. – С. 240–244.
10. Павленко Д. В. Экспериментально-статистическая методика определения пределов выносливости материалов / Д. В. Павленко // Титан-2008: производство и применение : сб. тезисов докладов первой науч.-техн. конф. молодых ученых и спец. 1-2 октября 2008 г., Запорожье / отв. ред. Ю. Н. Внуков. – Запорожье : ЗНТУ, 2008. – С. 80–82.
11. Дударев Е. Ф. Микропластическая деформация и предел текучести поликристаллов / Е. Ф. Дударев. – Томск : Изд-во Томского университета, 1988. – 256 с.

Поступила в редакцию 24.06.2010

#### Павленко Д.В., Ткач Д.В., Грешта В.Л. Деформаційна поведінка і витривалість сплаву BT1-0 з субмікроструктурною структурою

*Наведено результати випробувань при циклічних навантаженнях зразків із сплаву BT1-0 в крупнокристалічному і субмікроструктурному станах при кімнатній і підвищеній температурах. Показано, що створення субмікроструктурної структури призводить до уповільнення швидкості накопичення залишкової деформації при циклічному навантаженні, підвищення довговічності та межі витривалості в робочому діапазоні температур сплаву.*

**Ключові слова:** об'ємні наноматеріали, межа витривалості, титановий сплав, втома, руйнування, структура, лам.

#### Pavlenko D., Tkach D., Greshtha V. Deformation behaviour and endu fatigue limit of alloy BT1-0 with submicrocrystalline structure

*The results of tests at cyclic loadings of samples from alloy BT1-0 in largecrystalline and submicrocrystalline conditions at the normal and raised temperatures are presented. It is shown, that creation of submicrocrystalline structure leads to delay of speed of accumulation of residual deformation at cyclic loads, to increase of durability and an fatigue limit in a working range of temperatures.*

**Key words:** bulk nonmaterials, fatigue limit, titanic alloy, weariness, destruction, structure, break.