

**РОЛЬ ЛОКАЛЬНОЙ КРИВИЗНЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ  
ПОЛИКРИСТАЛЛОВ ТИТАНА В ЗАРОЖДЕНИИ И РАЗВИТИИ  
УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ**

*В.Е. Панин, Т.Ф. Елсукова, Ю.Ф. Попкова, Ю.И. Почивалов*

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

*E-mail: elsukova@yandex.ru*

В многоуровневом подходе физической мезомеханики исследована фундаментальная роль локальной кривизны кристаллической структуры в нелинейном поведении и разрушении при циклическом нагружении титана ВТ1-0, имеющего полиморфные превращения ГПУ-ОЦК. Получено экспериментальное подтверждение механизма развития усталостных трещин при разрушении твердого тела как структурно-фазового распада его кристаллической структуры в зонах локальной кривизны макромасштабного уровня, где неравновесный термодинамический потенциал Гиббса оказывается больше нуля.

**ВВЕДЕНИЕ**

Многоуровневый подход физической мезомеханики [1–3] рассматривает деформируемое твердое тело как нелинейную иерархически организованную систему, в которой поверхностные слои являются важной функциональной подсистемой. В условиях знакопеременного изгиба ниже предела текучести материала основная пластическая деформация сосредоточена в поверхностных слоях в сопряжении с упругонагруженной подложкой. Пластические сдвиги в поверхностном слое развиваются в сопряженных направлениях максимальных касательных напряжений. Упругонагруженный объем материала создает моментные напряжения на зоны пластических сдвигов поверхностного слоя. Возникающие при этом поворотные моды деформации и формирование в поверхностном слое зон сильной кривизны обуславливают зарождение и развитие поверхностных усталостных трещин. Микроскопия высокого разрешения позволяет исследовать кинетику этого процесса как структурно-фазового распада материала [4].

Для экспериментального исследования кинетики структурно-фазового распада материала на стадии его предразрушения очень информативны исследования механизма усталостного разрушения при знакопеременном изгибе технического титана. При его знакопеременном изгибе сильно выражены стесненность поворотных мод деформации в поверхностных слоях и возникновение в них зон локальной кривизны. Эти факторы усиливаются полиморфизмом титана, который приводит к облегчению развития потоков деформационных дефектов. Кроме того, эти факторы мы усиливали или ослабляли наводороживанием или наноструктурированием поверхностного слоя титана.

**1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ**

В качестве материала исследования выбран технический титан ВТ1-0, деформация и разрушение которого хорошо изучены и представлены в литературе [5–7 и др.]. В его ГПУ-структуре пластические сдвиги развиваются в базисных плоскостях скольжения. При распространении трещин поперечного сдвига аккомодационное базисное скольжение должно создавать сильные поворотные моменты. В поверхностных слоях такие поворотные моменты могут вызвать сильную локальную кривизну, развитие которой можно контролировать внешними воздействиями. Так, наводороживание поверхностного слоя образцов титана должно интенсифицировать их базисное скольжение и тем самым способствовать развитию локальной кривизны. Наноструктурирование поверхностного слоя ударной обработкой ультразвуком должно диспергировать структуру базисных плоскостей и блокировать базисное скольжение. Это должно затруднить формирование локальной кривизны в наноструктурированном поверхностном слое, а тем самым и развитие аккомодационных поворотных мод при распространении усталостных трещин. Таким образом, следовало ожидать понижение усталостной долговечности титана при наводороживании его поверхностных слоев и ее возрастание при наноструктурировании. Эксперимент должен был выявить многоуровневые механизмы этого влияния.

В эксперименте использовали плоские образцы в виде двойной лопатки с размерами рабочей части 37×8×1 мм, изготовленные методом электроискровой резки. Образцы предварительно отжигали в вакууме при 800 °С в течение 1 ч для снятия наклепа. Размер зерен в отожженных образцах составлял 50 мкм. Нагружение осуществляли знакопеременным изгибом в режиме многоциклового усталости. Этот параметр используется в качестве количественной характеристики циклической долго-

вечности материала (зная частоту нагружения, его можно перевести в единицы времени). Подготовку поверхности образцов для структурных исследований проводили методом электролитической полировки. На полированную поверхность образцов наносили координатную сетку. Это позволяло анализировать развитие сдвиговых и поворотных составляющих деформации, а также распределение деформации на поверхности поликристаллов. Для изучения кинетики самосогласованного взаимодействия деформирующихся зерен на большом участке образца применяли метод фотомонтажей. Структурные исследования выполняли на различных этапах циклического нагружения методами световой микроскопии. Трехмерную картину формирующейся на поверхности образца мезоскопической субструктуры получали с использованием микроскопа Axiovert 25CA, снабженного устройством DIC, и интерференционного профилометра New View 6200.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1. УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ИСХОДНОГО ТИТАНА

На рис. 1 приведена схема развития полос локализованной пластической деформации в зоне максимальной амплитуды знакопеременного изгиба. Их распространение вдоль сопряженных направлений максимальных касательных напряжений  $\tau_{\max}$  обеспечивает чередование пластических сдвигов растяжения – сжатия при знакопеременном изгибе. Усталостная магистральная трещина развивается зигзагообразно вдоль макрополос локализованной деформации. Мезомеханика ее распространения описана в [8] при усталостном разрушении двухслойного композита А999/А7. В этом композите фольга высокочистого алюминия А999 деформировалась пластически, имитируя поверхностный слой, а плоский образец технического алюминия А7 деформировался упруго, имитируя подложку.

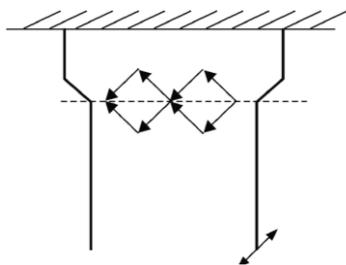


Рис. 1. Схема развития по сопряженным направлениям  $\tau_{\max}$  поперечных макрополос локализованной пластической деформации в образцах титана в зоне максимальной амплитуды знакопеременного изгиба

Раскрытие усталостной трещины MN при знакопеременном изгибе титана вызывает развитие аккомодационных поворотных мод в прилегающем материале (рис. 2,а). На поверхности видны три зерна: А, В и С. Все они испытали аккомодационные поворотные моды в виде сложного гофрирования (см. рис. 2,б,в).

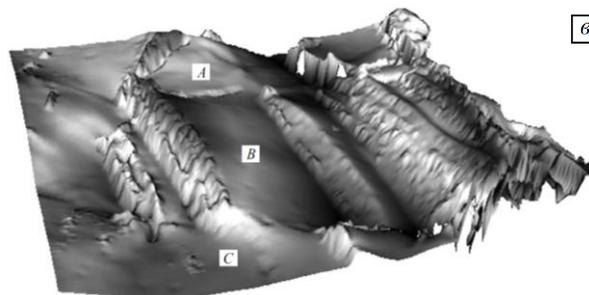
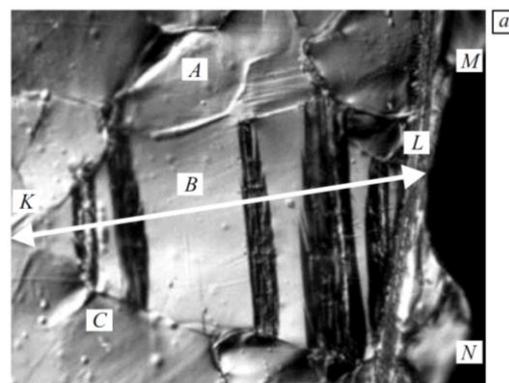


Рис. 2. Аккомодационное гофрирование зерна В поверхностного слоя при раскрытии усталостной магистральной трещины MN Ti VT1-0: оптическое изображение  $\times 500$  (а); профиль гофрирования вдоль KL (б); объемное изображение гофрированного зерна В, интерференционная профилометрия,  $\times 700$  (в);  $N = 4 \cdot 10^5$  циклов

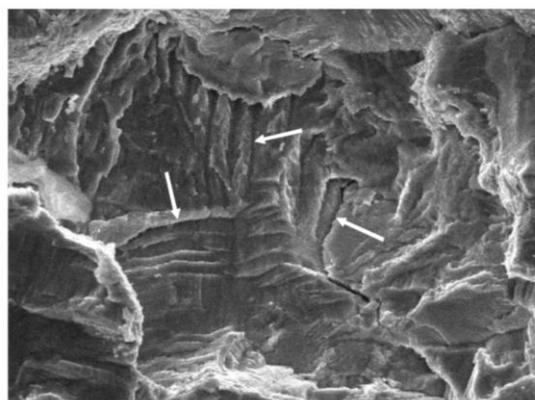


Рис. 3. Фрактограмма усталостного разрушения Ti VT1-0 при распространении магистральной трещины; растровая электронная микроскопия,  $N = 6,5 \cdot 10^5$  циклов,  $\times 550$

При этом отдельные зоны поверхности зерна В (типа ab, см. рис. 2,б) сохранили исходный плоский характер и испытали поворот по часовой стрелке. А

смежные зоны сильной кривизны подверглись фрагментации и испытали поворот против часовой стрелки. Зерно *B* получило зигзагообразный профиль (см. рис. 2,б).

На рис. 3 приведена фрактограмма усталостного разрушения титана. Видно, что при разрушении распространялась магистральная трещина поперечных сдвигов, которые в отдельных зонах (указаны стрелками) сопровождалась локальным расслоением материала.

## 2.2. УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ТИТАНА С НАВОДОРОЖЕННЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ СЛОЕМ

При усталостном разрушении титана с наводороженным поверхностным слоем также распространяется трещина поперечных сдвигов (рис. 4). Однако эффекты расслоения материала в зонах поперечных сдвигов выражены очень сильно. Расслоение материала на ламели сопровождается их фрагментацией.

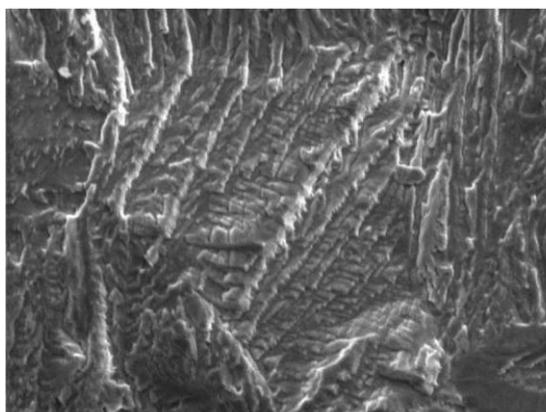


Рис. 4. Фрактограмма усталостного разрушения  $Ti-H_2$ ; растровая электронная микроскопия,  $N=1,8 \cdot 10^5$  циклов,  $\times 350$

Аккомодационные поворотные моды в наводороженном поверхностном слое, обусловленные распространением магистральной усталостной трещины, проявляются в виде сильного гофрирования и локального расслоения материала (рис. 5). Плоских участков поверхности исходных зерен в приграничной с усталостной трещиной зоне уже не наблюдается.

Очень важный вопрос связан с механизмом интенсивного гофрирования наводороженного поверхностного слоя. Трансляционно-инвариантный кристалл не может реализовать макрокривизну, показанную на рис. 5. Интерференционная профилограмма зоны наводороженного поверхностного слоя вблизи усталостной трещины показывает, что сильная кривизна зерна *C* является многоуровневой и создается в иерархии масштабов: развитием полос сдвига (shear bands) *ab*, *cd*, *ef* и др., смещением ламелей материала между полосами сдвига, фрагментацией ламелей при их сдвиге.

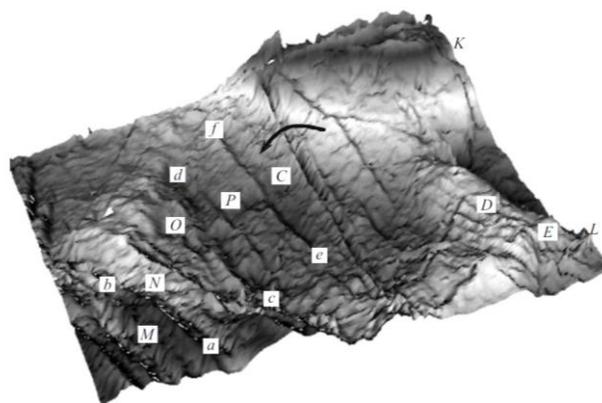


Рис. 5. Объемное изображение поверхностного слоя зерна *C* в области распространения магистральной трещины *KL* усталостного разрушения  $Ti-H_2$ ; интерференционная профилометрия,  $N = 1,1 \cdot 10^5$  циклов,  $\times 750$

Следует отметить, что все указанные механизмы формирования кривизны проявляются и в нижележащих зернах *D*, *E* поверхностного слоя. В условиях кривизны в поверхностном слое генерируется новый механизм деформации – развитие полос сдвига (shear bands, *ab*, *cd*, *ef* и др. см. рис. 5), в ядрах которых происходит нанофрагментация материала, вызывающая пластические ротации в зонах сильной кривизны. Другими словами, в ядрах полос сдвига формируется двухфазное наноструктурное состояние, в котором нанокристаллы окружены квазиаморфной прослойкой [9]. Это ротационный механизм мезомасштабного уровня, который позволяет генерировать пластические ротации и формировать кривизну в широких пределах. При закритической кривизне в ядрах полос сдвига происходит структурно-фазовый распад конденсированного состояния материала в виде образования трещины.

Вопрос о механизме формирования микропор в зонах локальной кривизны и их определяющей роли в распространении трещин является особенно актуальным в теории усталостного разрушения. Отметим, что в литературе данный вопрос обсуждался в проблеме межзеренного разрушения при высокотемпературной ползучести и усталости, когда интенсивно развиваются диффузионные процессы. В настоящем исследовании усталостное разрушение развивается при  $T = 0,2 T_{пл}$  титана, когда процессы диффузии подавлены. Однако при этом сильно выражены эффекты кривизны в наводороженном поверхностном слое титана. Их определяющая роль показана на рис. 6, где отчетливо видно, что усталостная трещина распространяется не по границе *ABC* конгломерата зерен *O*, испытывающего поворот, а через зоны глубокой интрузии *a* и *b* приграничной зоны конгломерата, в которой сформировалась сильная кривизна. В то же время трещина не прошла через зоны локальной экструзии *cd* и *ef*, где материал оказывается в более равновесном состоянии. Дискретная пористость возникает и в зонах локальной интрузии материала на участке *BC*

границы конгломерата зерен *O*. Однако траекторию трещины определил структурно-фазовый распад в зонах *a* и *b* сильно выраженной интрузии. Это приводит к важному заключению, что в условиях низких температур деформации структурно-фазовый распад материала с формированием микропористости происходит не в границах зерен поликристалла, а в границах поворотного типа, где возникают сильная кривизна и растягивающие нормальные напряжения.

Наводороживание поверхностных слоев титана приводит к снижению усталостной долговечности (таблица).

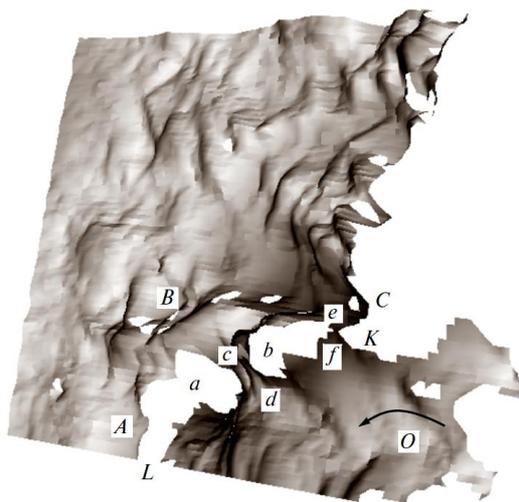


Рис. 6. Интерференционная 3D-картина фрагмента поверхности вблизи усталостной трещины Ti-H<sub>2</sub>. Прерывистый характер развития трещины KL путем коагуляции микропор в зонах сильной кривизны,  $N = 1,1 \cdot 10^5$  циклов,  $\times 350$

### 2.3. ВЛИЯНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТИТАНА

Ударная обработка ультразвуком поверхностных слоев поликристаллов формирует в них вихревую наноструктуру [10]. При такой обработке титана, имеющего ГПУ-структуру, следует ожидать диспергирования базисных плоскостей скольжения и затруднения пластических сдвигов в поверхностных слоях образцов титана при их циклическом нагружении. Это полностью подтвердил эксперимент.

На рис. 7 показана гофрированная ударной обработкой ультразвуком поверхность образца титана после его усталостного разрушения. Никаких следов пластической деформации на этой поверхности не обнаруживается, хотя образец испытал  $N = 1,9 \cdot 10^6$  циклов знакопеременного изгиба. Radикально изменился и механизм усталостного разрушения: оно происходило при распространении трещины нормального отрыва, а поверхность разрушения представляет собой типичный ямочный излом (рис. 8). Локальное расслоение материала практически отсутствует.

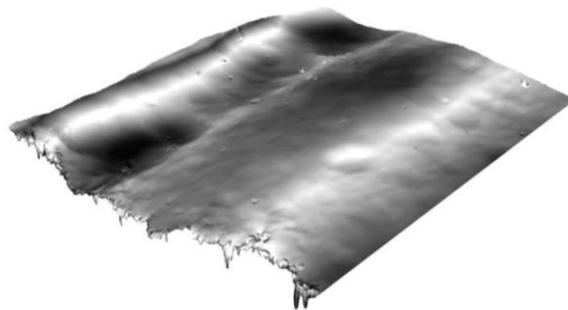


Рис. 7. Фрагмент поверхности наноструктурированного поверхностного слоя титана, испытавшего усталостное разрушение; интерференционная профилометрия,  $N = 1,9 \cdot 10^6$  циклов,  $\times 300$

Наноструктурированный поверхностный слой проявил аномально высокий эффект обратимой неупругости. Это и обусловило радикальное изменение механизма усталостного разрушения титана. Как следствие, его усталостная долговечность возросла в 4 раза (см. таблицу).

Усталостная долговечность образцов титана при различном структурном состоянии поверхностного слоя

Состояние поверхностного слоя	Число циклов до разрушения
Исходное	$4,4 \cdot 10^5$
Наводороженное	$1,2 \cdot 10^5$
Наноструктурированное	$19 \cdot 10^5$

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При распространении трещин поперечного сдвига поворотные моды при раскрытии трещины обеспечиваются поперечными пластическими сдвигами. В ГПУ-титане поперечные сдвиги развиваются по базисным плоскостям скольжения. На первой стадии усталостного разрушения данные процессы развиваются в поверхностных слоях. Их сопряжение с упругодеформирующейся подложкой обуславливает возникновение на поверхности локальной складчатой структуры большой кривизны. Такая структура способствует развитию усталостного разрушения, обеспечивая аккомодационные поворотные моды в поверхностном слое, необходимые для раскрытия магистральной усталостной трещины.

Эффект фрагментации поверхностного слоя исходного титана в зонах сильной кривизны (см. рис. 2), который способствует усталостному разрушению, еще более ярко выражен на фрактограмме разрушенного образца (рис. 9), где *AB* – полоса излома слоя *D* материала. Следующий излом произошел вдоль полосы *EF*, и движение трещины продолжалось вдоль поверхности *G*. Поверхности всех изломов имеют микропористую структуру. Трещина в своей вершине создает кривизну, куда перемещаются вакансии кривизны. В полосе *AB* концентрация вакансий кривизны столь высока, что они формируют микропористость. В этой зоне происходит излом материала, и движение трещины продолжается вдоль поверхности *D*.

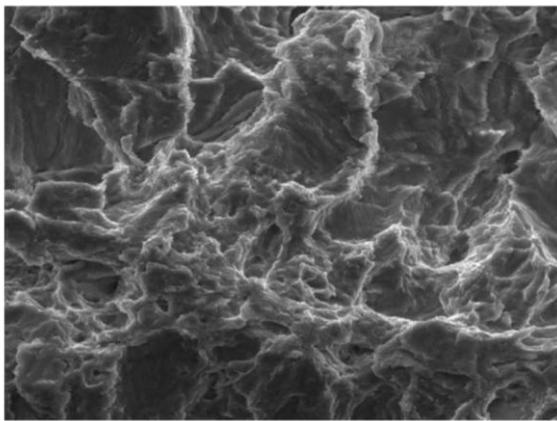


Рис. 8. Фрактограмма усталостного разрушения Ti с наноструктурированным поверхностным слоем; растровая электронная микроскопия,  $N = 1,9 \cdot 10^6$  циклов,  $\times 540$

Данный результат убедительно иллюстрирует роль вакансий кривизны, возникающих в вершине трещины, в образовании микропористости и развитии структурно-фазового распада конденсированного состояния материала как механизма его разрушения.

В зоне расслоения *D* очень много фрагментов микронного размера, которые возникли в изломе *AB* и перемещались градиентом напряжений перед вершиной трещины при ее распространении расслоением вдоль поверхности *D*.

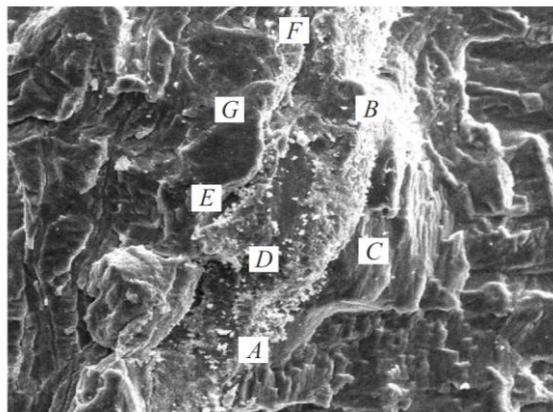


Рис. 9. Фрактограмма поверхности усталостного разрушения; распространение трещины нормального отрыва в зоне долома Ti BT1-0; локальные изломы *AB*, *EF* слоев поверхности разрушения; растровая электронная микроскопия,  $N = 6,5 \cdot 10^5$  циклов,  $\times 360$

Аккомодационные поворотные моды в наводороженном поверхностном слое титана развиваются во всей иерархии масштабов: макро, мезо, микро и нано, что наглядно показано на рис. 5. Это обуславливает сильное расслоение материала при распространении магистральной трещины (см. рис. 4).

Особого внимания заслуживает обсуждение влияния наноструктурированного поверхностного

слоя на механизмы усталостного разрушения, которые обуславливают существенное возрастание усталостной долговечности титана.

Прежде всего, требует объяснения отсутствие видимых следов пластической деформации на поверхности наноструктурированных слоев вблизи зоны усталостного разрушения. Раскрытие магистральной усталостной трещины в исходном титане, и особенно в условиях его наводороженного поверхностного слоя, вызывало сильные эффекты кривизны на поверхности образцов вблизи зоны разрушения. Отсутствие таких аккомодационных эффектов поворотного типа на поверхности с наноструктурой свидетельствует о ее деформационном упрочнении.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Раскрытие магистральной усталостной трещины как поворотной моды деформации происходит в условиях развития аккомодационных поворотных мод пластической деформации в прилегающих к ней зонах образца, особенно в поверхностных слоях. Структурное состояние поверхностного слоя сильно влияет на механизмы усталостного разрушения и циклическую долговечность титана.

При знакопеременном изгибе исходного титана его усталостное разрушение происходит по механизму распространения трещины поперечных сдвигов, в которых происходит слабое расслоение материала. В поверхностных слоях развивается зигзагообразное гофрирование: плоские участки поверхности исходного образца испытывают поворот одного знака, они чередуются с пластически деформированными зонами, имеющими наклон противоположного знака.

Наводороживание поверхностных слоев титана обуславливает при знакопеременном изгибе развитие гофрирования поверхности, которое осуществляется широким спектром масштабов пластических сдвигов. Усталостное разрушение происходит также распространением трещины поперечных сдвигов с сильно выраженным расслоением материала. При этом долговечность титана снижается в 3 раза.

Наноструктурирование поверхностных слоев титана в сопряжении с упругодеформируемым объемом исключает их пластическую деформацию при циклическом нагружении. Такие поверхностные слои проявляют большие эффекты обратимой неупругости при раскрытии магистральной трещины. Усталостное разрушение происходит распространением трещины нормального отрыва. На фрактограммах разрушения наблюдается ямочный излом. При этом долговечность возрастает в 4 раза.

Делается общее заключение о целесообразности наноструктурирования поверхностных слоев конструкционных материалов и их сварных соединений для повышения их усталостной долговечности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов*. В 2-х т. / Под ред. В.Е. Панина. Новосибирск: «Наука», 1995, т. 1, 298 с.; т. 2, 320 с.
2. В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин. Солитоны кривизны как обобщенные структурные носители пластической деформации и разрушения // *Физическая мезомеханика*. 2013, т. 16, №3, с. 5-20.
3. В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин. Деформируемое твердое тело как нелинейная иерархически организованная система // *Физическая мезомеханика*. 2011, т. 14, №3, с. 7-26.
4. V.E. Panin. Fracture Mesomechanics of a Solid as a Nonlinear Hierarchically Organized System // *Proc. Eur. Conf. Fracture 19, Kazan, Russia, 2012*. Kazan: Kazan Sci. Center RAS, 2012 (электронный ресурс).
5. У. Цвиккер. *Титан и его сплавы* / Пер. с немецкого. М.: «Металлургия», 1979, 512 с.
6. Е.В. Коллингз. *Физическое металловедение титановых сплавов* / Пер. с англ. М.: «Металлургия», 1988, 223 с.
7. А.В. Панин, В.Е. Панин, И.П. Чернов, Ю.И. Почивалов, М.С. Казаченок, А.А. Сон, Р.З. Валиев, В.И. Копылов. Влияние состояния поверхности субмикрористаллических титана и  $\alpha$ -железа на их деформацию и механические свойства // *Физическая мезомеханика*. 2001, т. 4, №6, с. 87-94.
8. В.Е. Панин, Т.Ф. Елсукова, Ю.Ф. Попкова. Физические основы мезомеханики развития усталостной трещины в двухслойном композите // *Доклады РАН*. 2012, т. 443, №1, с. 40-43.
9. В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин. Атом-вакансионные состояния в твердых телах // *ФММ*. 2010, т. 110, №5, с. 487-496.
10. В.Е. Панин, Е.Н. Каблов, Ю.И. Почивалов, С.В. Панин, Н.И. Колобнев. Влияние наноструктурирования поверхностного слоя алюминий-литиевого сплава 1424 на механизмы деформации, технологические характеристики и усталостную долговечность. Повышение пластичности и технологических характеристик // *Физическая мезомеханика*. 2012, т. 15, №6, с. 107-111.

Статья поступила в редакцию 23.01.2015 г.

## РОЛЬ ЛОКАЛЬНОЇ КРИВИЗНИ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ПОЛКРИСТАЛІВ ТИТАНУ В ЗАРОДЖЕННІ І РОЗВИТКУ ВТОМЛЕНОГО РУЙНУВАННЯ

*В.Є. Панін, Т.Ф. Елсукова, Ю.Ф. Попкова, Ю.І. Почівалов*

У багаторівневому підході фізичної мезомеханіки досліджено фундаментальну роль локальної кривизни кристалічної структури в нелінійній поведінці і руйнуванні при циклічному навантаженні титану ВТ1-0, який має поліморфні перетворення ГПУ-ОЦК. Одержано експериментальне підтвердження механізму розвитку втомленості тріщин при руйнуванні твердого тіла як структурно-фазового розпаду його кристалічної структури в зонах локальної кривизни макромасштабного рівня, де нерівноважний термодинамічний потенціал Гіббса є більше нуля.

## ROLE OF CURVATURE OF THE SURFACE LAYER OF TITANIUM POLYCRYSTALS IN GENERATION AND DEVELOPMENT OF FATIGUE FRACTURE

*V.E. Panin, T.F. Elskova, Yu.F. Popkova, Yu.I. Pochivalov*

The multilevel approach of physical mesomechanics was used to study the fundamental role of curvature of the crystal structure in nonlinear behavior and fracture under cyclic loading of titanium VT1-0, which has polymorphic transformation hcp-bcc. Experimental confirmation of the mechanism of fatigue cracking at fracture of a solid as structural-phase decomposition of the crystal structure in local curvature zones of macroscale level where a non-equilibrium thermodynamic Gibbs potential is higher than zero, was obtained.