

6. С.В. Панин, Л.А. Корниенко, Т. Нгуен Суан, Л.Р. Иванова, М.А. Корчагин, С.В. Шилько, Ю.М. Плескачевский. Износостойкость композитов на основе полимер-полимерной матрицы СВМПЭ-ПТФЭ. Часть 1. Механические и триботехнические свойства полимер-полимерных композиций СВМПЭ-ПТФЭ // Трение и износ, 2015 (36), № 3, с. 325-333

## ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТИТАНА НА ЕГО УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ И МЕХАНИЗМЫ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ

*М.Ю. ГРОШЕВА<sup>1</sup>, Т.Ф. ЕЛСУКОВА<sup>2</sup>, Ю.Ф. ПОПКОВА<sup>2</sup>,*

<sup>1</sup>Томский политехнический университет,

<sup>2</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: [vip.january@mail.ru](mailto:vip.january@mail.ru)

## EFFECT OF STATES IN NEAR-SURFACE LAYERS OF TITANIUM ON ITS FATIGUE LIFE AND FATIGUE FRACTURE MECHANISMS

*M. YU. GROSHEVA, T. F. ELSUKOVA, YU. F. POPKOVA*

<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University,

<sup>2</sup> Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS

E-mail: [vip.january@mail.ru](mailto:vip.january@mail.ru)

*Annatation. Changes of structural states in near-surface layers of titanium strongly affect its fatigue life and fatigue fracture mechanisms. In titanium subjected to alternate bending a sliding mode crack develops, result in gin slight delamination of the material. Hydrogenation of titanium surface layers preserves their sliding mode cracking but greatly enhances their delamination. The fatigue life of the material after surface hydrogenation decreases three times, and after surface nanostructuring, it increases four times.*

### 1. Введение

В настоящее время одна из главных задач материаловедения – изучение усталостного разрушения, в связи с тем, что от сопротивления усталости зависит рабочий потенциал изделий и конструкций в машиностроении. Поэтому проблема усталостного разрушения является весьма актуальной.

В перспективном подходе физической мезомеханики в деформируемом твердом теле необходимо рассматривать две самостоятельные подсистемы: 3D-кристаллическую и 2D-планарную [1]. Причем ведущую функциональную роль в пластической деформации играет планарная подсистема, т.к. с ней связаны первичные пластические сдвиги и генерация всех деформационных дефектов. Поэтому для решения проблемы усталостной долговечности твердых тел необходимо анализировать процессы, происходящие в их планарной подсистеме.

В этой связи настоящая работа посвящена исследованию влияния состояния поверхностного слоя титана на его циклическую долговечность при знакопеременном изгибе.

### 2. Материалы и методы исследования

В качестве материала исследования использовали технический титан марки ВТ1-0 с разным состоянием поверхностного слоя: исходный, наводороженный и об-

работанный ультразвуком. Вследствие полиморфности титана при высоких прочностных характеристиках объема в его поверхностных слоях во время нагружения можно ожидать облегченное перестроение из одной кристаллической решетки в другую кристаллическую решетку.

Испытания на усталость были проведены в режиме многоциклового усталости при комнатной температуре знакопеременным изгибом. Микроскоп Axiovert 25CA был использован для получения трехмерной поверхностной картины субструктуры, сканирующий интерференционный микроскоп New View 6200 - для трехмерного анализа структуры поверхности.

### 3. Результаты исследования

На рис. 1, а показано, что раскрытие магистральной усталостной трещины MN при циклическом нагружении титана сопровождается развитием аккомодационных поворотных мод деформации в прилегающем материале. На поверхности видны три зерна А, В и С. Все они испытали аккомодационные повороты в виде сложного гофрирования, рис. 1, б и в.

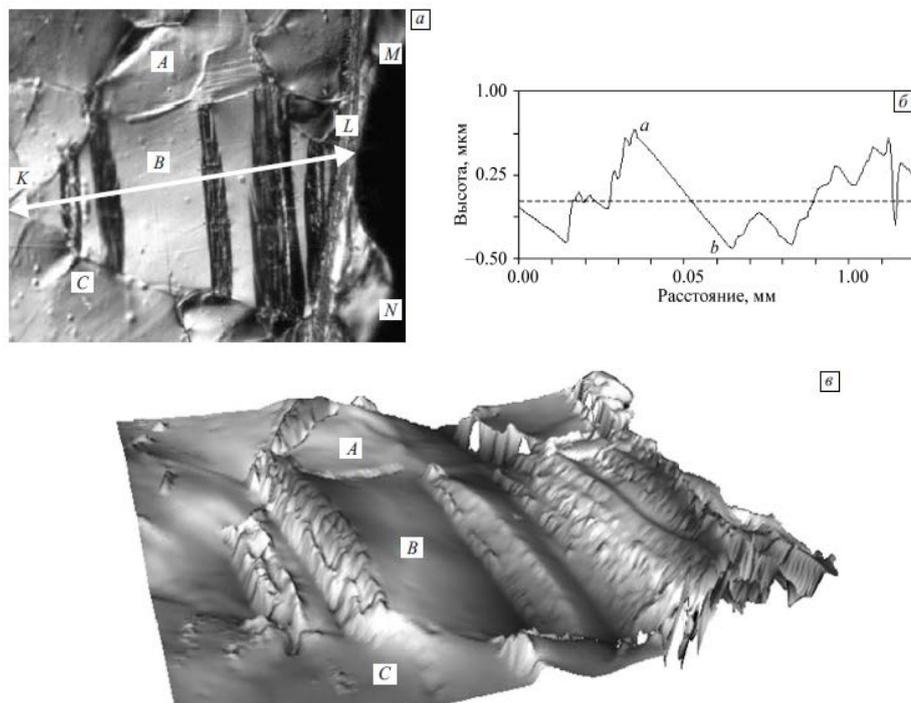


Рисунок 1 - Ti VT1-0. Характер гофрирования зерна В поверхностного слоя при раскрытии магистральной трещины MN: оптическое изображение  $\times 700$  (а), профиль гофрирования вдоль KL (б), объемное изображение гофрированного зерна В  $\times 1300$  (в). New View

При этом отдельные зоны зерна В (ab на рис. 1, 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 В получило зигзагообразный профиль (рис. 1, б).

На рис. 2 приведена фрактограмма усталостного разрушения образца исходного титана. Видно, что при разрушении распространялась магистральная трещина поперечных сдвигов, которые в отдельных зонах (указаны стрелками) сопровождались локальным расслоением материала.

При усталостном разрушении наводороженного титана с наводороженным поверхностным слоем также распространяется трещина поперечных сдвигов, рис. 3. Однако эффекты расслоения материала выражены значительно сильнее, чем в исходном титане. Расслоение материала на ламели сопровождается их фрагментацией.

Аккомодационные повороты в наводороженном поверхностном слое титана проявляются в виде сильного гофрирования и локального расслоения материала, рис. 4. Плоских участков поверхности исходных зерен в приграничной с трещиной зоне не наблюдаются.

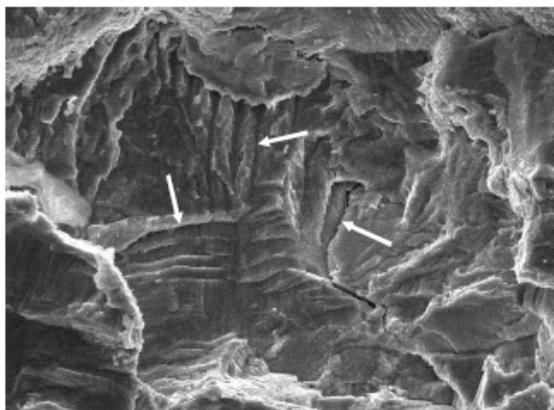


Рисунок 2 - Фрактограмма усталостного разрушения при распространении магистральной трещины поперечных сдвигов; исходный титан, РЭМ,  $\times 1300$

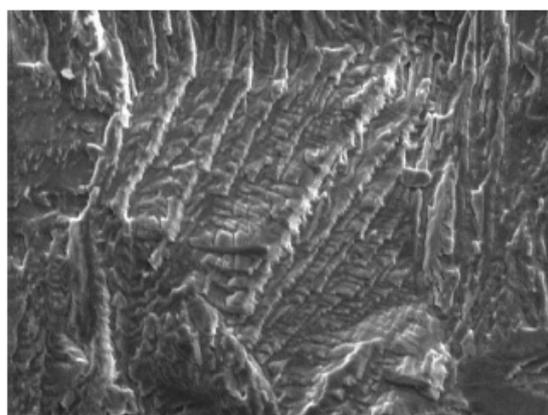


Рисунок 3 - Ti-H<sub>2</sub>. Фрактограмма усталостного разрушения, РЭМ,  $\times 800$

Наводороживание поверхностных слоев титана приводит к существенному снижению его усталостной долговечности (таблица 1).

На рис. 5 показана обработанная ультразвуком поверхность титана после его усталостного разрушения. Никаких следов пластической деформации на этой поверхности не обнаруживается, хотя образец испытал  $N=2 \times 10^6$  циклов знакопеременного изгиба.

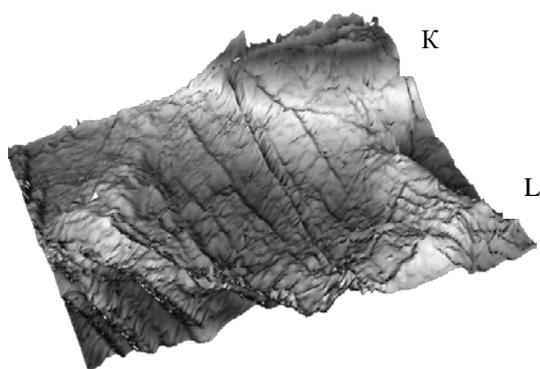


Рисунок 4 - Ti-H<sub>2</sub>. Объемное изображение поверхностного слоя вблизи магистральной трещины KL, New View,  $\times 1300$

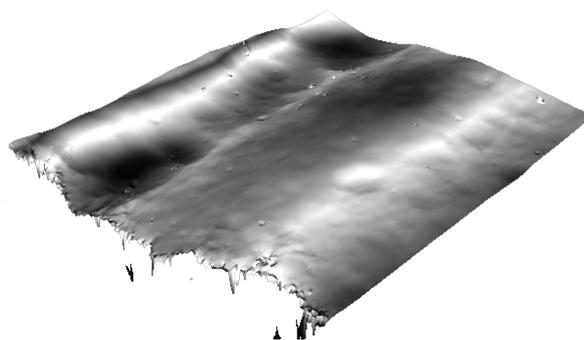


Рисунок 5 - Фрагмент поверхности титана, предварительно обработанного ультразвуком; New View,  $N_p \sim 2 \times 10^6$  циклов,  $\times 600$

Разрушение происходило при распространении трещины нормального отрыва, а поверхность разрушения представляет собой типичный ямочный излом, рис. 6.

Локальное расслоение материала не наблюдается. Обработка титана ультразвуком проявилась в существенном повышении его твердости. При этом его усталостная долговечность возросла в четыре раза (таблица 1).

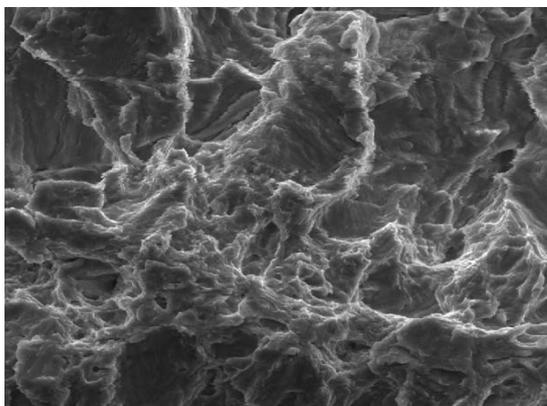


Рисунок 6 - Фрактограмма усталостного разрушения титана, обработанного ультразвуком,  $N_p \sim 2 \times 10^6$  ц., РЭМ,  $\times 1300$

Таблица 1 - Усталостная долговечность титана при различном структурном состоянии поверхностного слоя

Состояние поверхностного слоя	Исходное	Наводороженное	Обработка ультразвуком
Число циклов до разрушения	$4,4 \times 10^5$	$1,2 \times 10^5$	$19 \times 10^5$

#### Заключение

Анализ результатов показал, что раскрытие магистральной трещины происходит в условиях развития аккомодационных поворотных мод пластической деформации в прилегающих к ней зонах материала. Долговечность материала определяется характером и степенью механизма аккомодационной деформации.

При нагружении исходного титана его разрушение реализуется механизмом распространения трещины поперечных сдвигов, в которых происходит расслоение материала. При этом в поверхностных слоях развивается зигзагообразное гофрирование.

Наводороживание поверхностных слоев титана обуславливает при циклическом нагружении интенсификацию процесса их гофрирования с более широким спектром масштабов пластических сдвигов. Усталостное разрушение происходит распространением трещины поперечных сдвигов, но с гораздо более выраженным их расслоением. Усталостная долговечность при этом снижается в 3 раза.

Обработка ультразвуком поверхностных слоев титана фактически блокирует их пластическую деформацию при циклическом нагружении, усталостное разрушение происходит уже распространением трещины нормального отрыва без следов расслоения материала. Усталостная долговечность титана увеличивается в 4 раза.

#### Список литературы

1. Панин В.Е., Панин А.В., Елсукова Т.Ф., Попкова Ю.Ф. Фундаментальная роль кривизны кристаллической структуры в пластичности и прочности твердых тел. // Физ. мезомех. – 2014. – т. 17. – № 6. – с. 7–18.