

## КИНЕТИКА УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ТИТАНА В СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ

Показано, что РКУП-конформ, формируя субмикрокристаллическую структуру, повышает предел усталости титана Grade 4 за счет увеличения времени до зарождения усталостной трещины и более низкой скорости ее распространения по сравнению с исходным состоянием. Однако показатель  $n$  в уравнении Пэриса больше примерно в 2 раза. Это свидетельствует о повышенной чувствительности материала к перегрузкам в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: титан, равноканальное угловое прессование (РКУП), усталостное нагружение, разрушение, излом, скорость распространения усталостной трещины.

### Введение

Известно [1], что равноканальное угловое прессование (РКУП), формируя субмикрокристаллическую структуру, значительно повышает твердость, предел прочности и текучести материалов, однако снижает его пластичность. В работах [2, 3] показано, что предел усталости титановых материалов после РКУП также возрастает. Однако причины увеличения предела усталости пока не ясны.

Целью настоящей работы является исследование кинетики усталостного разрушения титана в исходном состоянии и после РКУП на стадии зарождения и распространения усталостной трещины.

### Материал и методы исследования

В качестве исследуемого материала был использован титан Grade 4 в исходном состоянии со средним размером зерна 25 мкм, после РКУП-конформ в субмикрокристаллическом состоянии со средним размером зерна 300 нм.

Твердость титана до и после РКУП-конформ определяли по методу Роквелла (HRC) (ГОСТ 9013-59) с использованием ультразвукового твердомера МЕТ-У1. Определение стандартных характеристик титана при статическом растяжении (ГОСТ 1497-84) проводили на круглых образцах диаметром 3 мм и длиной рабочей части 15 мм.

Для определения предела усталости титана использовали цилиндрические образцы с рабочим диаметром 3 мм. Испытания проводили

на изгиб с вращением с частотой нагружения 50 Гц на базе  $10^7$  циклов. Для построения кинетических диаграмм усталостного разрушения титана использовали образцы размером 4x10x45 мм с надрезом, который выполнялся электроискровой резкой. Испытания таких образцов проводили на трехточечный изгиб при комнатной температуре согласно ASTM E-647<sup>1</sup> на машине «The Nano Plug'n'Play» фирмы BiSS P.Ltd. с частотой нагружения 15 Гц и коэффициентом асимметрии цикла  $R=0,2$ . Длину трещины, количество циклов нагружения и коэффициент интенсивности напряжений определяли автоматически по нагрузке и раскрытию трещины с помощью программного обеспечения используемой машины.

### Результаты и их обсуждение

В таблице 1 представлены механические свойства титана Grade 4 в исходном состоянии и после РКУП-конформ. Видно, что РКУП-конформ повышает твердость титана примерно в 1,3 раза. При этом прочностные характеристики ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ ) возрастают примерно в 1,5 раза, а пластичность ( $\delta$ ) снижается в 2,3 раза.

Таблица 1. Механические свойства титана Grade 4 в исходном состоянии и после РКУП-конформ

| Состояние          | HRC | $\sigma_b$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % |
|--------------------|-----|------------------|----------------------|--------------|
| Исходное состояние | 25  | 700              | 550                  | 30           |
| РКУП-конформ       | 32  | 1020             | 880                  | 13           |

<sup>1</sup> E-647-00 – Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates

На рисунке 1 представлены кривые усталости титана Grade 4 в исходном состоянии и после РКУП-конформ. Видно, что после РКУП-конформ предел усталости титана возрастает от 350 МПа до 590 МПа.

Чтобы понять причины повышения усталостной прочности титана после РКУП-конформ, исследовали кинетику развития усталостной трещины и построили кинетическую диаграмму усталостного разрушения титана в исходном состоянии и после РКУП-конформ. Зависимость длины усталостной трещины от числа циклов нагружения представлена на рисунке 2; кинетические диаграммы усталостного разрушения – на рисунке 3.

Из рисунка 2 видно, что РКУП-конформ приводит к увеличению количества циклов нагружения до появления усталостной трещины, что, вероятно, связано с более высокой прочностью материала после пластической обработки. Из рисунка 3 видно, что кинетическая диаграмма усталостного разрушения исследуемого материала после РКУП-конформ расположена ниже диаграммы усталостного разрушения материала в исходном состоянии. Из этого следует, что при одном и том же значении размаха коэффициента интенсивности напряжения ( $\Delta K$ ) скорость распространения усталостной трещины в титане после РКУП-конформ ниже, чем в исходном состоянии.

Представленные на рисунке 3 диаграммы хорошо описываются уравнением Пэриса для случая исходного состояния титана:

$$\frac{dl}{dN} = 4,31 \cdot 10^{-11} \Delta K^{3,46}$$

и после РКУП-конформ:

$$\frac{dl}{dN} = 2,19 \cdot 10^{-15} \Delta K^{6,34}$$

Из приведенных уравнений видно, что в исходном состоянии титана показатель  $n$  в уравнении Пэриса равен 3,46, а после РКУП-конформ показатель в два раза выше и равен 6,34.

По-видимому, повышенная прочность титана после РКУП-конформ обуславливает и более высокий показатель в уравнении Пэриса. Однако из этого следует [4], что кратковременные перегрузки (резкое увеличение  $\Delta K$ ) при эксплуатации титана после РКУП-конформ вызовут большее увеличение скорости распространения усталостной трещины, чем в исходном

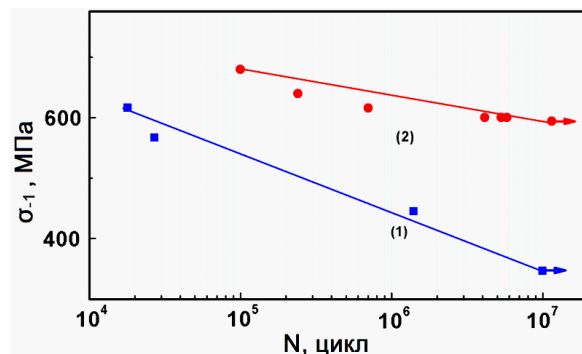


Рисунок 1. Кривые усталости титана Grade 4 в исходном состоянии (1) и после РКУП-конформ (2)

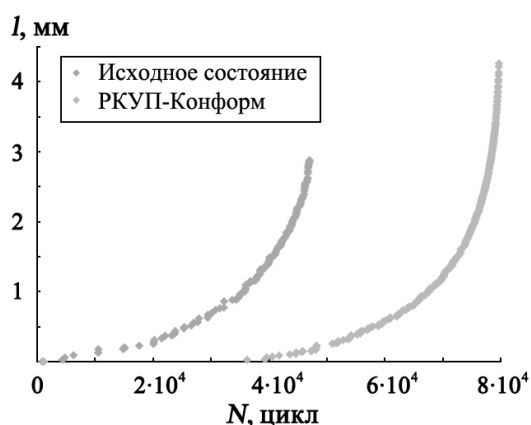


Рисунок 2. Зависимость длины усталостной трещины ( $l$ ) от числа циклов нагружения ( $N$ ) для титана Grade 4 в исходном состоянии (левый график) и после РКУП-конформ (правый график)

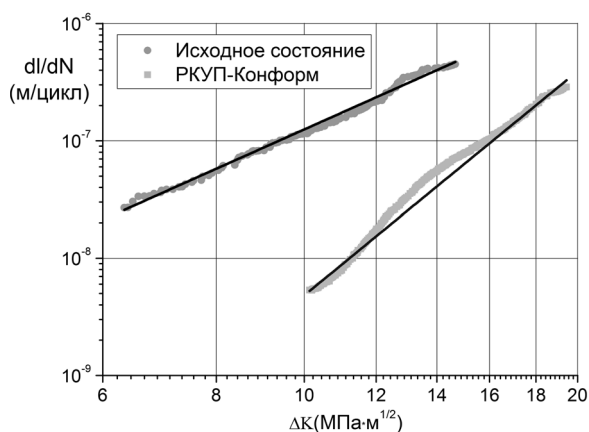


Рисунок 3. Кинетические диаграммы усталостного разрушения титана Grade 4 в исходном состоянии (верхний график) и после РКУП-конформ (нижний график)

состоянии, что неблагоприятно с позиции конструктивной прочности материала.

### **Заключение**

РКУП-конформ, формируя субмикроструктурную структуру, приводит к увеличению предела усталости титана Grade 4 за счет увеличения долговечности титана на стадии зарождения трещины и более низкой скорости

распространения усталостной трещины по сравнению с исходным состоянием. Однако коэффициент  $n$  в уравнении Париса для титана Grade 4 после РКУП-конформ практически в 2 раза больше, чем для титана в исходном состоянии, что свидетельствует о повышенной чувствительности материала к перегрузкам (резкому увеличению  $\Delta K$ ) в процессе эксплуатации.

20.06.2012

### **Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП (ГК № 16.513.11.3018) и РФФИ (проект № 11-08-00208)**

#### **Список литературы:**

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
2. Валиев Р.З., Семенова И.П., Латыш В.В., Щербаков А.В., Якушина Е.Б. Наноструктурный титан для биомедицинских применений: новые разработки и перспективы коммерциализации // Российские нанотехнологии. – 2008. – Т. 3, №9–10. – С. 80–89.
3. Клевцова Н.А., Валиев Р.З., Клевцов Г.В., Семенова И.П., Фесенюк М.В. Усталостное разрушение образцов из титана и титанового сплава в микрокристаллическом и субмикроструктурном состояниях // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2010. – №1. – С. 134–138.
4. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А., Лимарь Л.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций. – М.: МИСиС, 2007. – 264 с.

#### **Сведения об авторах:**

**Клевцов Г.В.**, профессор кафедры радиофизики и электроники Оренбургского государственного университета, доктор технических наук, профессор

460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, тел. (3532) 372825, e-mail: klevtsov11948@mail.ru

**Валиев Р.З.**, директор Института физики перспективных материалов УГАТУ, доктор физико-математических наук, профессор

450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, тел. (342) 2733422, e-mail: RZValiev@mail.rb.ru

**Ботвина Л.Р.**, ведущий научный сотрудник Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, доктор технических наук, профессор

119911, г. Москва, ГСП-1, Ленинский проспект, 49, тел. (495) 1359683, e-mail: botvina@ultra.imet.ac.ru

**Клевцова Н.А.**, доцент кафедры радиофизики и электроники Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, доцент

460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, тел. (3532) 372825

**Семенова И.П.**, старший научный сотрудник Института физики перспективных материалов при УГАТУ, доктор физико-математических наук

450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, тел. (342) 2733422, e-mail: RZValiev@mail.rb.ru

**Кашапов М.Р.**, аспирант кафедры радиофизики и электроники Оренбургского государственного университета

460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, тел. (3532) 372825, e-mail: sham\_87@bk.ru

**Фесенюк М.В.**, соискатель Оренбургского государственного университета

460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, тел. (3532) 372825, e-mail: maksim\_fesenyuk@mail.ru

**Солдатенков А.П.**, инженер Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН

119911, г. Москва, ГСП-1, Ленинский проспект, 49, тел. (495) 1359683, e-mail: al\_soldatenkov@mail.ru