

## ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВА Ti-6Al-4V

Е.Н. Степанова<sup>1)</sup>, Г.П. Грабовецкая<sup>2)</sup>, И.П. Мишин<sup>2)</sup>, А.В. Степанов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
пр. Ленина 30, Томск 634055, Россия, enstepanova@tpu.ru, stepanovav@mail.ru

<sup>2)</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
пр. Академический 2/4, Томск 634055, Россия, grabg@ispms.ru, mishin1@yandex.ru

В данной работе проведены сравнительные исследования влияния облучения импульсным пучком ионов углерода на структурно-фазовое состояние титанового сплава Ti-6Al-4V в мелко- и ультрамелкозернистом состояниях. Методами оптической и просвечивающей электронной микроскопии, а также рентгеноструктурного анализа установлено, что в мелкозернистом сплаве в результате воздействия импульсного пучка ионов углерода формируется модифицированный слой толщиной 3 мкм с тонкопластинчатой структурой фазы  $\alpha''$ . В ультрамелкозернистом состоянии сплава Ti-6Al-4V структура приповерхностного слоя представляет собой градиентную структуру, представленную двумя зонами – с пластинчатой  $\alpha''$  фазой и переходным слоем, содержащим пластинки  $\alpha''$  фазы и глобулярными зернами исходной ультрамелкозернистой структуры.

**Ключевые слова:** титановый сплав; ультрамелкозернистое состояние; структурно-фазовое состояние; импульсный ионный пучок.

## EFFECT OF PULSED ION BEAM IRRADIATION ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF Ti-6Al-4V ALLOY

Ekaterina Stepanova<sup>1)</sup>, Galina Grabovetskaya<sup>2)</sup>, Ivan Mishin<sup>2)</sup>, Andrey Stepanov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>National Research Tomsk Polytechnic University,  
30 Lenin Ave., 634055 Tomsk, Russia, enstepanova@tpu.ru, stepanovav@mail.ru

<sup>2)</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS,  
2/4 Akademichesky Ave., 634055 Tomsk, Russia, grabg@ispms.ru, mishin1@yandex.ru

In this paper, comparative studies of the effect of irradiation with a pulsed carbon ion beam on the structural and phase state of titanium Ti-6Al-4V alloy in the fine- and ultrafine-grained state are carried out. Using optical and transmission electron microscopy, as well as X-ray diffraction analysis, it was found that in the fine-grained alloy, as a result of the action of a pulsed carbon ion beam, a modified layer 3  $\mu\text{m}$  thick with a thin-plate structure of the  $\alpha''$  phase is formed. In the ultrafine-grained state of the Ti-6Al-4V alloy, the structure of the near-surface layer is a gradient structure represented by two zones with a lamellar  $\alpha''$  phase and a transition layer containing plates of the  $\alpha''$  phase and globular grains of the original ultrafine-grained structure.

**Keywords:** titanium alloy; ultrafine-grained state; structural and phase state; pulsed ion beam.

### Введение

Титановые сплавы, благодаря высокой прочности, коррозионной стойкости и низкой плотности широко используются в медицине, авиации, ракетостроении и судостроении [1, 2]. Среди титановых сплавов наибольшее практическое применение нашли двухфазные ( $\alpha+\beta$ ) титановые сплавы. Для получения титановых сплавов с необходимыми эксплуатационными свойствами используют различные методы термомеханической обработки, либо мо-

дифицирование их поверхности и приповерхностных слоев [3].

К настоящему времени в литературе накоплен обширный материал по изучению воздействия импульсных электронных пучков на структуру и свойства различных материалов. При этом изучению влияния облучения мощными импульсными пучками ионов на структуру и свойства титановых сплавов удалено значительно меньшее внимание. Учитывая изложенное, целью настоящей работы явля-

ется исследование влияния облучения импульсным пучком ионов углерода на структурно-фазовое состояние титановых сплавов в различных структурных состояниях.

### Материал и методы исследования

В данной работе в качестве материала исследования был использован двухфазный ( $\alpha+\beta$ ) титановый сплав Ti-6Al-4V в двух разных структурных состояниях: состояние поставки с мелкозернистой (МЗ) структурой и ультрамелкозернистое (УМЗ) состояние, полученное методом прессования со сменой оси деформации и постепенным понижением температуры в интервале 800-550 °C. Для изучения влияния импульсного ионного воздействия образцы сплава в обоих состояниях подвергались облучению импульсным пучком ионов углерода на ускорителе ТЕМП (ТПУ, Томск, Россия) [4]. Облучение проводили при следующих условиях: плотность тока 150 A/cm<sup>2</sup>, длительность импульса энергии 80 нс, плотность энергии 3 Дж/см<sup>2</sup>, энергия 200 кэВ, количество импульсов облучения – 3 и 10.

Исследования структурно-фазового состояния проводили методами сканирующей (растровый ионно-электронный микроскоп Argéo 2S) и просвечивающей электронной (просвечивающий электронный микроскоп JEM-2100) микроскопии, а также с помощью рентгеноструктурного анализа (дифрактометр XRD7000).

Скретч-тестирование поверхности образцов сплава выполнялось с помощью настольной системы измерительного царапания Макро скретч-тестер Revetest RST (CSM Instruments, Switzerland). Испытания проводили в режиме с прогрессирующей нагрузкой, изменяющейся в пределах (0.5-10) Н, длина царапины составила 5 мм, скорость царапания 10 мм/мин.

### Результаты и их обсуждение

Оптические исследования показали, что в состоянии поставки МЗ сплав имеет

поликристаллическую структуру с размером зерен, изменяющимся в диапазоне 5-15 мкм. Часть зерен имеет пластинчатую структуру.

В результате прессования по указанному выше режиму в сплаве формируется однородная УМЗ зерено-субзереная структура со средним размером элементов зерено-субзеренной структуры, определенным по темнопольному изображению, 0.24 мкм. На электронограммах структуры (площадь апертурной диафрагмы 1.4 мкм<sup>2</sup>) наблюдается значительное количество рефлексов, расположенных по окружности и имеющих азимутальное размытие. Такой вид электронограмм характерен для УМЗ материалов, имеющих большие разориентировки между элементами зерено-субзеренной структуры, неравновесные границы зерен и внутренние поля упругих напряжений.

Согласно данным рентгеноструктурного анализа исходный сплав Ti-6Al-4V в обоих состояниях имеет двухфазную ( $\alpha+\beta$ ) структуру с содержанием  $\beta$  фазы 10±1%.

Исследования облученной поверхности образцов показали, что после облучения на поверхности, независимо от исходного структурного состояния, присутствуют единичные неглубокие кратеры диаметром до 30 мкм. Исследование элементного состава в зоне кратера показало повышенное содержание таких элементов, как железо, алюминий и кислород.

Детальные электронно-микроскопические исследования поперечного сечения облученных образцов показали, что в результате воздействия импульсным пучком ионов углерода происходят изменения только в приповерхностном слое сплава в обоих состояниях. Структура основного объема материала при этом остается неизменной. Так, в приповерхностном слое МЗ сплава толщиной порядка 3 мкм формируется мелкопластинчатая фаза  $\alpha''$  с поперечным размером пластин 30-150 нм. В то же время структура приповерхностного слоя образца УМЗ сплава, сформи-

рованная в результате облучения, имеет две четко выраженные зоны. В первой зоне (шириной ~4 мкм) наблюдается образование пластинчатой  $\alpha''$  фазы с поперечным размером пластин 20-300. Далее следует слой шириной ~1 мкм, в котором наблюдаются тонкие (шириной 20-50 нм) и однородные по размерам пластины  $\alpha''$  фазы и зерна исходной УМЗ структуры.

Результаты рентгеноструктурного анализа подтвердили, что облучение импульсным пучком ионов углерода приводит к изменению фазового состава приповерхностного слоя образцов сплава в обоих состояниях. Фазовый состав основного объема образцов сплава при этом не изменяется. На дифрактограммах приповерхностного слоя образцов исчезают рефлексы  $\beta$  фазы, некоторые рефлексы  $\alpha$  фазы становятся асимметричными и появляются отчетливо различимые рефлексы  $\alpha''$  фазы. С ростом числа импульсов (с 3 до 10) интенсивность рефлексов фазы  $\alpha''$  увеличивается. Следует отметить, что ранее подобные изменения в фазовом составе наблюдали в МЗ сплаве Ti-6Al-4V после облучения импульсным пучком электронов [5].

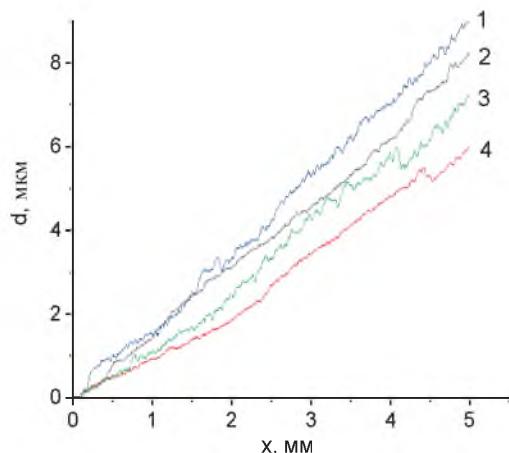


Рис. 1. Зависимости максимальной глубины погружения индентора  $d$  от расстояния  $x$  для сплава Ti-6Al-4V: 1 и 2 – исходные МЗ и УМЗ состояния, 3 и 4 – МЗ и УМЗ сплавы после облучения 10 импульсами ИИП

Результаты скретч-тестирования показали, что формирование в сплаве УМЗ состояния приводит к уменьшению глубины

проникновения индентора  $d$  по сравнению с исходным МЗ состоянием сплава. В тоже время в результате облучения поверхности сплава величина  $d$  уменьшается для обоих состояний по сравнению с необлученными образцами, при этом уменьшение  $d$  для УМЗ образцов происходит в большей степени по сравнению с МЗ состоянием.

### Заключение

Таким образом, облучение поверхности титанового сплава Ti-6Al-4V в двух различных структурных состояниях импульсным пучком ионов углерода приводит к формированию в приповерхностной области модифицированного слоя. В МЗ сплаве формируется модифицированный слой толщиной 3 мкм с тонкопластинчатой структурой фазы  $\alpha''$ . В УМЗ сплаве структура приповерхностного слоя представляет собой градиентную структуру, представленную двумя зонами – с пластинчатой фазой  $\alpha''$  и переходным слоем, содержащем пластины  $\alpha''$  фазы и глобулярными зернами исходной УМЗ структуры. Формирование такого слоя приводит к изменению свойств поверхности материала.

### Библиографические ссылки

1. Moiseyev V.N. *Titanium Alloys. Russian Aircraft and Aerospace Applications*, CRC Press, New York, 2005.
2. Peters, M.; Leyens, C. *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*, Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2003.
3. Hao S.Z., Qin Y., Mei X.X., Gao B., Zuo J.X., Guan Q.F., et al. Fundamentals and applications of material modification by intense pulsed beams. *Surf. Coat. Technol.* 2007; 20(19-20): 8588-8595.
4. Stepanov A.V., Shamanin V.I., Remnev G.E. The study of operation modes of the self-magnetically insulated ion diode. *Rev. Sci. Instrum.* 2019; 90: 033302.
5. Grabovetskaya G.P., Stepanova E.N., Mishin I.P., Zabudchenko O.V. The effect of irradiation of a titanium alloy of the Ti-6Al-4V-H system with pulsed electron beams on its creep. *Russ. Phys. J.* 2020; 63: 932–939.