

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

Е.Н. Степанова¹⁾, Г.П. Грабовецкая²⁾, И.П. Мишин²⁾, А.В. Степанов¹⁾

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

²⁾Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
пр. Академический 2/4, Томск 634055, Россия, grabg@ispms.ru, mishinv1@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 α'' . В ультрамелкозернистом состоянии сплава Ti-6Al-4V структура приповерхностного слоя представляет собой градиентную структуру, представленную двумя зонами – с пластинчатой α'' фазой и переходным слоем, содержащим пластины α'' фазы и глобулярными зёрнами 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 Stepanova¹⁾, Galina Grabovetskaya²⁾, Ivan Mishin²⁾, Andrey Stepanov¹⁾

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

²⁾Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS,
2/4 Akademicheskoy Ave., 634055 Tomsk, Russia, grabg@ispms.ru, mishinv1@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 μm thick with a thin-plate structure of the α'' 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 α'' phase and a transition layer containing plates of the α'' 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 уделено 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 °С. 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 А/см², длительность импульса энергии 80 нс, плотность энергии 3 Дж/см², энергия 200 кэВ, количество импульсов облучения – 3 и 10.

Исследования структурно-фазового состояния проводили методами сканирующей (растровый ионно-электронный микроскоп Argeo 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 зеренно-субзеренная структура со средним размером элементов зеренно-субзеренной структуры, определенным по темнопольному изображению, 0.24 мкм. На электронограммах структуры (площадь апертурной диафрагмы 1.4 мкм²) наблюдается значительное количество рефлексов, расположенных по окружности и имеющих азимутальное размытие. Такой вид электронограмм характерен для УМЗ материалов, имеющих большие разориентировки между элементами зеренно-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 β 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 α'' с поперечным размером пластин 30-150 нм. В то же время структура приповерхностного слоя образца УМЗ сплава, сформирова-

рованная в результате облучения, имеет две четко выраженные зоны. В первой зоне (шириной ~ 4 мкм) наблюдается образование пластинчатой α'' 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 α'' 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 β фазы, некоторые рефлексы α фазы становятся асимметричными и появляются отчетливо различимые рефлексы α'' фазы. С ростом числа импульсов (с 3 до 10) интенсивность рефлексов фазы α'' увеличивается. Следует отметить, что ранее подобные изменения в фазовом составе наблюдали в МЗ сплаве Ti-6Al-4V после облучения импульсным пучком электронов [5].

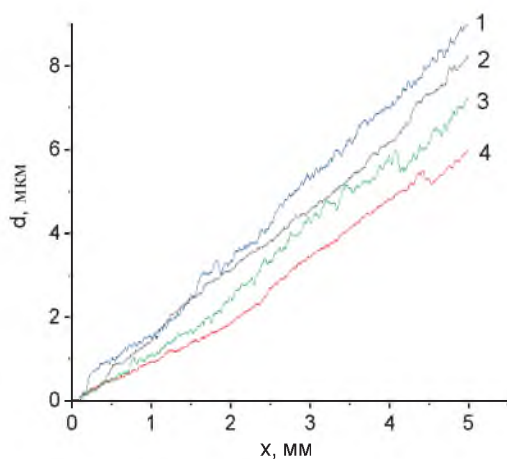


Рис. 1. Зависимости максимальной глубины погружения индентора d от расстояния x для сплава Ti-6Al-4V: 1 и 2 – исходные МЗ и УМЗ состояния, 3 и 4 – МЗ и УМЗ сплавы после облучения 10 импульсами ИИП

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 то же 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 α'' . В УМЗ сплаве структура приповерхностного слоя представляет собой градиентную структуру, представленную двумя зонами – с пластинчатой фазой α'' и переходным слоем, содержащим пластины α'' 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; 201(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.