

## СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНА, ПОДВЕРГНУТОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ ОКИСЛЕНИЮ И ПОСЛЕДУЮЩЕМУ ПЛАЗМЕННОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

Н.В. Бибик<sup>1)</sup>, В.И. Шиманский<sup>1)</sup>, К.А. Парков<sup>2)</sup>, Д.В. Ёжиков<sup>2)</sup>,  
В.М. Асташинский<sup>3)</sup>, А.М. Кузьмицкий<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет,

пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, [Shymanskiv@mail.ru](mailto:Shymanskiv@mail.ru), [Bibiknv@bsu.by](mailto:Bibiknv@bsu.by)

<sup>2)</sup>Национальный детский технопарк, ул. Франциска Скорины 25, Минск 220076, Беларусь,  
[parkouka@gmail.com](mailto:parkouka@gmail.com), [ezik1208@gmail.com](mailto:ezik1208@gmail.com)

<sup>3)</sup>Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,  
ул. П. Бровки 15, Минск 220072, Беларусь, [ast@imaph.bas-net.by](mailto:ast@imaph.bas-net.by)

В работе представлены результаты исследования морфологии, элементного и фазового составов, а также механических свойств титана, подвергнутого высокотемпературному окислению при 500-800 °С и последующему воздействию компрессионных плазменных потоков. С помощью рентгеноструктурного анализа установлено, что воздействие импульсами плазмы на окисленные образцы приводит к изменению параметров решетки титана, а также формированию нитрида TiN. Структурно-фазовые изменения в приповерхностном слое титана в результате обработки способствуют увеличению микротвердости и улучшению трибологических свойств титана.

**Ключевые слова:** титан; компрессионные плазменные потоки; структура; механические свойства.

## STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF TITANIUM SUBJECTED TO HIGH-TEMPERATURE OXIDATION AND SUBSEQUENT PLASMA EXPOSURE

N.V. Bibik<sup>1)</sup>, V.I. Shymanski<sup>1)</sup>, A. Parkov<sup>2)</sup>, D. V. Ezhikov<sup>2)</sup>,  
V.M. Astashynski<sup>3)</sup>, A.M. Kuzmitski<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus,  
[Shymanskiv@mail.ru](mailto:Shymanskiv@mail.ru), [Bibiknv@bsu.by](mailto:Bibiknv@bsu.by)

<sup>2)</sup>National Children Technopark, 25 Francis Skorina Str., 220076 Minsk, Belarus,  
[parkouka@gmail.com](mailto:parkouka@gmail.com), [ezik1208@gmail.com](mailto:ezik1208@gmail.com)

<sup>3)</sup>A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of National Academy of Science of Belarus,  
15 P. Brovki Str., 220072 Minsk, Belarus, [ast@imaph.bas-net.by](mailto:ast@imaph.bas-net.by)

The paper presents the results of a study of the morphology, elemental and phase compositions, as well as the mechanical properties of titanium subjected to annealing at 500-800 °C and subsequent compression plasma flows exposure. X-ray diffraction analysis revealed that the effect of plasma pulses on the samples leads to a change in the lattice parameters of titanium, as well as the formation of TiN. Structural and phase changes in the surface layer of titanium as a result of processing contribute to an increase in microhardness and an improvement in the tribological properties of titanium.

**Keywords:** titanium; compression plasma flows; structure; mechanical properties.

### Введение

Титан и сплавы на его основе обладают высокой коррозионной стойкостью и высокой прочностью при низкой плотности, что обеспечивает их широкое применение в различных отраслях промышленности: автомобиле- и авиастроении, судострое-

нии, строительстве, медицине, космической отрасли и др. Использование титановых сплавов в качестве конструкционных материалов для изготовления лопаток турбин и дисков компрессоров высокого давления требует разработки методов повышения термостабильности данных спла-

вов, увеличения их прочности и устойчивости к износу. Разработка новых композиционных материалов на основе титана в целях обеспечения повышения его эксплуатационных характеристик является актуальной задачей современного материаловедения. Особый интерес представляет применение высокоэнергетических плазменных технологий, позволяющих модифицировать тонкий приповерхностный слой с функциональными свойствами, не затрагивая структуру и свойства объемного материала.

В данной работе представлены результаты исследования структурного состояния титана после импульсной плазменной обработки, проведенной с предварительным высокотемпературным окислением поверхностного слоя.

#### Объект и методика исследования

Объектом исследования выступали образцы титана марки VT1-0. Исследуемые образцы подвергались окислению в муфельной печи марки SNOL при температурах 500, 600 и 800 °C в течение 1 часа. Следующим этапом обработки являлось воздействие на окисленные образцы импульсами компрессионных плазменных потоков (КПП), генерируемых магнитоплазменным ускорителем компактной геометрии в остаточной атмосфере азота в 400 Па. Образцы обрабатывались тремя последовательными импульсами длительностью ~100 мкс, плотность поглощенной энергии за один импульс составляла 35 Дж/см<sup>2</sup>.

Структурно-фазовое состояние модифицированного слоя титана анализировалось методами растровой электронной микроскопии (РЭМ LEO 1455 VP с приставкой фирмы Oxford для определения элементного состава методом рентгеноспектрального микроанализа) и рентгеноструктурного анализа (дифрактометр Ultima IV Rigaku). Микротвердость образцов исследовалась по методике Виккерса на микротвердомере MVD 402 Wilson Instruments при нагрузке 25 г. Трибологические испытания проводились на трибо-

метре УИПТ-001 по схеме «палец-плоскость».

#### Результаты и их обсуждение

Исходный титан представляет собой низкотемпературную гексагональную структуру с параметрами решетки  $a=0.2949$  нм и  $c=0.4672$  нм (рис. 1). Высокотемпературный нагрев образцов титана приводит к формированию оксидной пленки рутила на поверхности образцов. Последующее воздействие импульсами плазмы на окисленные образцы приводит к нагреву обрабатываемой поверхности выше температуры плавления титана и сформированного оксида титана. Плавление оксидной фазы сопровождается выделением кислорода, который в процессе жидкофазного перемешивания растворяется в жидком титане и при последующем охлаждении растворяется в его кристаллической решетке с образованием твердого раствора  $\alpha$ -Ti(O). Также можно ожидать, что вследствие короткого времени нагрева оксидная фаза не успевает полностью расплавиться и частично сохраняется в твердой фазе, преимущественно в виде дисперсных частиц, внедренных в металлическую матрицу титана. Такой механизм фазовых превращений возможен в случае предварительного окисления титана при максимальной температуре, когда толщина оксидного слоя максимальна.

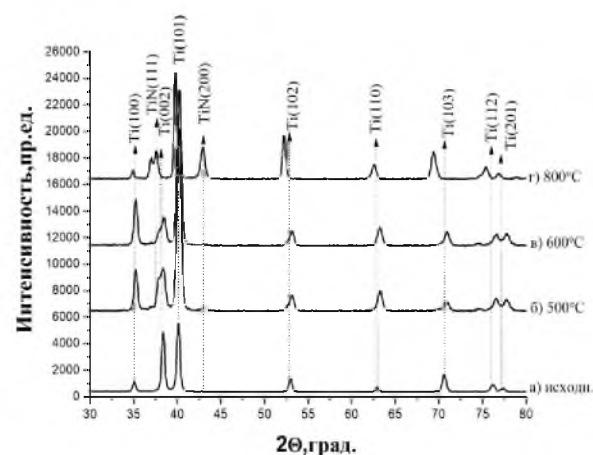


Рис. 1. Дифрактограммы исходного образца (а) и образцов, подвергнутых окислению при различной температуре (б-г) с последующим воздействием импульсами КПП (б-г)

Значения параметров решетки титана после кристаллизации для образцов, предварительно окисленных при 500–600 °С, уменьшаются по сравнению с исходным состоянием до  $a=0.2933$  нм и  $c=0.4649$  нм. Это может быть связано с формированием точечных дефектов в условиях быстрой кристаллизации, а также действием сжимающих внутренних напряжений. Для образцов, подвергнутых предварительному отжигу при 800 °С и дальнейшему воздействию импульсами плазмы, наблюдается увеличение параметров решетки титана до значений  $a=0.2990$  нм и  $c=0.4731$  нм. Изменение параметров решетки может являться следствием формирования твердого раствора внедрения  $\alpha$ -Ti(O).

Кроме того, использование азота в качестве плазмообразующего газа обеспечило формирование при всех режимах воздействия нитридной фазы TiN. Согласно РЭМ и РСМА-исследованиям нитрид титана кристаллизуется в виде поверхностных дендритов (рис. 2 вставка).

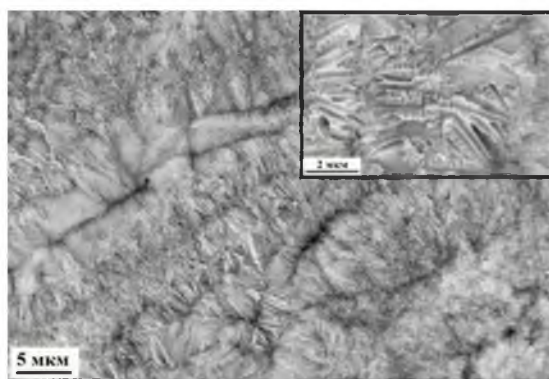


Рис. 2. Морфология поверхности титана после высокотемпературного окисления при 800 °С и дальнейшего воздействия КПП

Для областей же, в которых отсутствуют дендритные структуры, характерно повышенное содержание кислорода. Таким образом, окисление образцов титана при 800 °С с последующим воздействием импульсами КПП позволяет создать поверхностный композиционный слой, состоящий из TiN и  $\alpha$ -Ti(O). Толщина проплавленного слоя, согласно исследованиям поперечного сечения, образцов составляла 10–15 мкм.

Микротвердость образцов титана после воздействия КПП с предварительным окислением при 500–600 °С составляет 2.7–3.3 ГПа (микротвердость исходного титана  $2.0 \pm 0.2$  ГПа). Увеличение температуры при отжиге позволяет увеличить микротвердость более чем в 5 раз по сравнению с исходным до значения  $11.8 \pm 0.9$  ГПа.

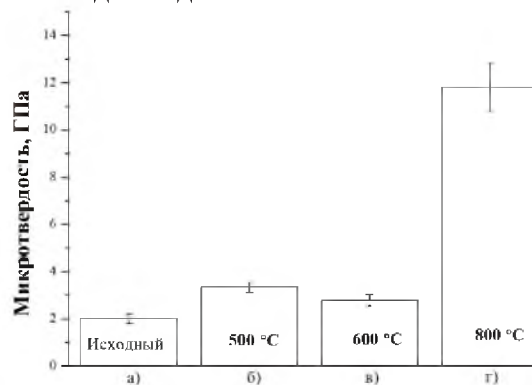


Рис. 3. Микротвердость титана до (а) и после высокотемпературного окисления при различной температуре с последующим воздействием КПП

Проведенные трибологические испытания показали, что высокотемпературное окисление титана с последующим воздействием КПП позволяет уменьшить коэффициент трения по сравнению с необработанным титаном от 0.7 до 0.2.

## Заключение

Таким образом, установлено, что окисление титана посредством высокотемпературного нагрева с последующим воздействием компрессионными плазменными потоками позволяет сформировать модифицированный приповерхностный слой, толщиной до 15 мкм. В анализируемом слое наблюдается формирование нитрида титана при всех режимах воздействия, а также Ti(O) при температуре окисления 800 °С. Предложенный метод модификации титана позволяет увеличить микротвердость и износостойкость данного материала.

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке международного проекта БРФФИ T25Y3Б-147.