

## ЛЕГИРОВАНИЕ ТИТАНОМ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОРШКОВОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА КОМПРЕССИОННЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ

Н.Н. Черенда<sup>1)</sup>, М.Г. Полуянова<sup>1)</sup>, В.М. Асташинский<sup>2)</sup>, А.М. Кузьмицкий<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4, 220030 Минск, Беларусь, Тел. +375 17 2265834. E-mail: [cherenda@bsu.by](mailto:cherenda@bsu.by)

<sup>2)</sup> Институт молекулярной и атомной физики НАН Беларуси, пр. Независимости 70, 220072 Минск, Беларусь, Тел. +375 17 2841065. E-mail: [ast@imaph.bas-net.by](mailto:ast@imaph.bas-net.by)

В данной работе была исследована система «покрытие титана – порошковый алюминиевый сплав» подвергнутая воздействию компрессионных плазменных потоков. Рассмотрено влияние обработки на структурно-фазовое состояние, элементный состав и механические свойства данной системы в зависимости от энергии, передаваемой образцу плазменным потоком. Обнаружено формирование легированного титаном слоя толщиной ~35 мкм, содержащего интерметаллиды. Установлено, что изменение структурно-фазового состояния приводит к увеличению микротвердости поверхностного слоя порошкового алюминиевого сплава.

### Введение

Одним из приоритетных направлений физики твердого тела является улучшение механических свойств различных материалов. Среди методов модификации свойств поверхностного слоя широкое распространение получили технологии, основанные на использовании лазерного излучения, электронных, ионных и плазменных пучков [1-3]. Обработка компрессионными плазменными потоками (КПП) обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами, а именно: сравнительно малое время обработки, использование рабочего вещества (газа) одновременно как для нагревания поверхностного слоя, так и для его легирования. Это позволяет эффективно использовать КПП для модификации свойств материалов. В частности, воздействие КПП на порошковые сплавы приводит к уменьшению пористости поверхностного слоя и улучшению механических свойств [4]. Кроме того, комбинированный способ модификации, заключающийся в предварительном нанесении на поверхность мишени металлического покрытия и последующем воздействии КПП на систему «покрытие-подложка», позволяет легировать поверхностный слой обрабатываемого материала элементом покрытия [5].

Целью данной работы являлось исследование структурно-фазового состава и механических свойств системы «покрытие титана - порошковый алюминиевый сплав», подвергнутой воздействию КПП.

### Методика эксперимента

В качестве объекта исследования использовались образцы из спеченного порошкового алюминиевого сплава, содержащего 1,5 вес. % графита, с титановым покрытием толщиной ~ 2,5 мкм. Титановое покрытие наносилось методом вакуумного катодно-дугового осаждения без очистки с параметрами процесса: ток горения дуги 100 А, напряжение смещения -60 В, время нанесения 10 минут. Обработку осуществляли компрессионными плазменными потоками, которые получали с помощью газоразрядного магнито-плазменного компрессора (МПК) компактной геометрии. Эксперименты проводили в режиме "остаточного газа", при котором предварительно от-

качанную вакуумную камеру МПК заполняли рабочим газом – азотом до давления 400 Па. Расстояние между мишенью и катодом составляло 8 – 12 см. При этом плотность энергии, поглощенной поверхностью образца, варьировалась в диапазоне ~23 – ~13 Дж/см<sup>2</sup> за импульс. Обработку образцов производили одним и тремя импульсами плазмы.

Фазовый состав исследовался методом рентгеноструктурного анализа (РСА) с помощью дифрактометра ДРОН 4-13 в излучении CuK $\alpha$ . Морфология поверхности образцов изучалась с помощью растрового электронного микроскопа LEO1455VP. Энергодисперсионный микроанализ был использован для определения элементного состава. Измерение микротвердости образцов выполнялось на микротвердомере ПМТ-3 методом Виккерса при нагрузке на индентор 200 г.

### Результаты и обсуждение

Импульсное воздействие плазменного потока на систему «покрытие титана – порошковый алюминиевый сплав» приводит к расплавлению покрытия и поверхностного слоя подложки и последующему жидкофазному перемешиванию обоих компонентов под действием давления потока плазмы [5].

В результате обработки наблюдается формирование стабильных фаз Al<sub>2</sub>Ti и Al<sub>3</sub>Ti, и метастабильной фазы Al<sub>5</sub>Ti<sub>2</sub>, существование которой при комнатной температуре связано с высокой скоростью охлаждения (рис. 1). В модифицированном слое содержится также оксид  $\delta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, что связано с повышенной концентрацией кислорода в порошковых алюминиевых сплавах. Отсутствие после плазменной обработки в атмосфере азота дифракционных линий, соответствующих нитриду алюминия, вероятно связано с формированием оксинитрида алюминия, который образуется на базе оксида путем замены атомов кислорода атомами азота с образованием нитридной связи с алюминием [6]. Отжиг системы на воздухе при 500 °С в течение 5 часов приводит к исчезновению метастабильной фазы Al<sub>5</sub>Ti<sub>2</sub> и фазы Al<sub>2</sub>Ti (рис. 2). Согласно диаграмме состояний Al-Ti остаются дифракционные пики, соответствующие фазе Al<sub>3</sub>Ti.

Рентгеноструктурный анализ показал, что увеличение энергии поглощаемой образцом за счет уменьшения расстояния до образца и увеличения количества импульсов обработки приводит к уменьшению концентрации интерметаллидов. Это может быть связано как с увеличением интенсивности абляции, так и с увеличением толщины перемешанного слоя (более глубоким проникновением титана в образец).

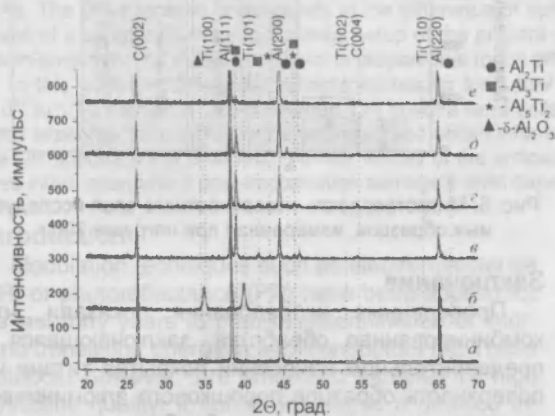


Рис. 1. Участки рентнограмм от образца порошкового алюминиевого сплава (а), порошкового алюминиевого сплава с титановым покрытием (б), и образцов, обработанных КПП: 1 импульс, 12 см (в); 1 импульс, 10 см (г); 1 импульс, 8 см (д); 3 импульса, 8 см (е).

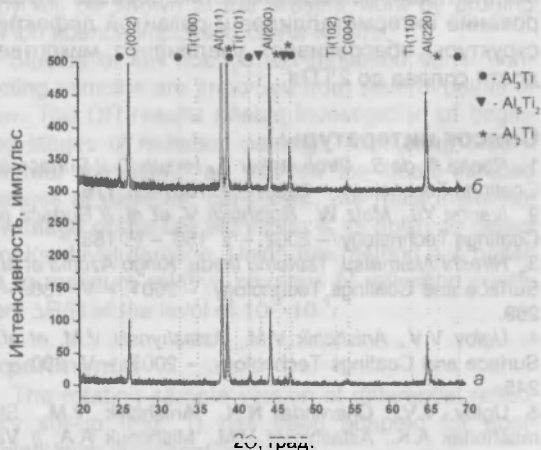


Рис. 2. Рентнограмма образца, обработанного на расстоянии 12 см одним импульсом КПП до (а) и после отжига на воздухе в течение 5 ч при 500 °С (б).

Данные энергодисперсионного микроанализа подтверждают наблюдаемую тенденцию. Установлено, что концентрация титана в поверхностном слое образцов толщиной ~ 1 мкм уменьшается с  $5.9 \pm 0.8$  ат.% до  $1.9 \pm 0.3$  ат.% для образцов, обработанных на расстоянии 12 см и 8 см, соответственно. Для образцов, обработанных 3 импульсами плазмы, концентрация титана составляет  $0.8 \pm 0.5$  ат.%.

Согласно равновесной диаграмме состояний бинарного сплава Al-Ti, в области до 10 ат. % Ti можно ожидать существование твердого раствора на основе алюминия и интерметаллида  $Al_3Ti$ . Наличие других интерметаллидов после обработ-

ки может быть связано с неоднородным перемешиванием и различной концентрацией титана в локальных участках модифицированного слоя. Исследование элементного состава, морфологии поверхности и поперечного сечения образцов с помощью растровой электронной микроскопии подтверждают данные предположения.

Воздействие компрессионного плазменного потока приводит к существенному изменению морфологии поверхности. Появляются хорошо заметные, хаотично расположенные волны, характерные при данном виде обработки для быстро затвердевшей жидкой фазы (рис. 3).

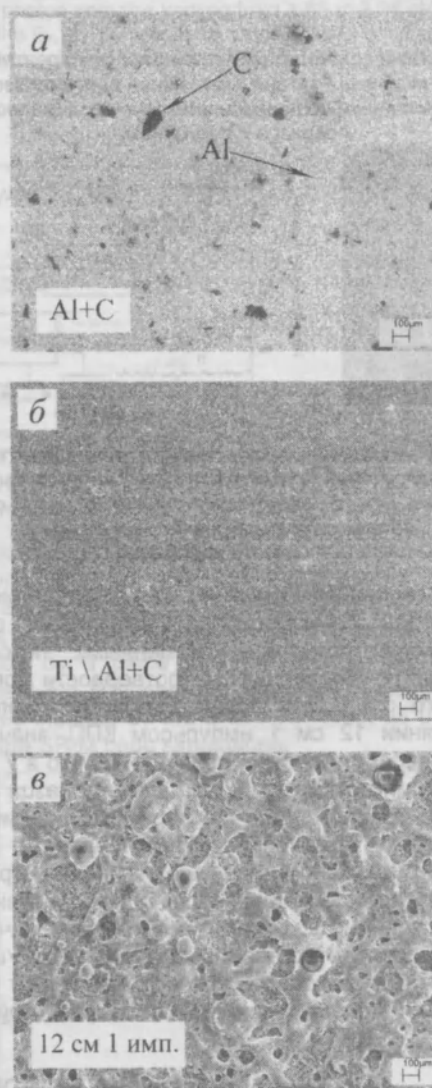


Рис. 3. Морфология поверхности исходного образца порошкового алюминиевого сплава (а), образца порошкового алюминиевого сплава с титановым покрытием до обработки КПП (б) и после обработки 1 импульсом КПП на расстоянии 12 см (в).

Анализ поперечного сечения образцов показал, что толщина титанового покрытия до обработки КПП составляла ~2,5 мкм (рис. 4). В результате обработки образцов компрессионным потоком формируется перемешанный слой, толщина которого достигает 35 мкм (рис. 5), причем наиболее равномерное распределение титана в модифицированном слое наблюдается для об-

разца, обработанного на расстоянии 8 см тремя импульсами плазмы.

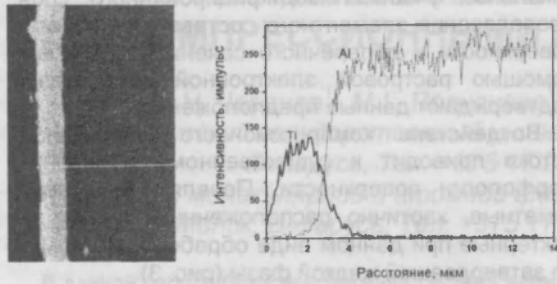


Рис. 4. Распределение характеристического рентгеновского излучения титана и алюминия вдоль горизонтальной линии по поперечному сечению исходного образца с покрытием.

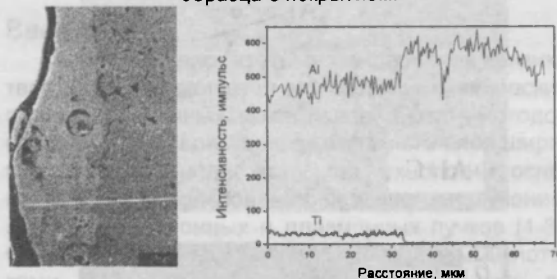


Рис. 5. Распределение характеристического рентгеновского излучения титана и алюминия вдоль горизонтальной линии по поперечному сечению образца, обработанного тремя импульсами плазмы на расстоянии 8 см.

Исследования показали, что легирование титаном образцов порошкового алюминиевого сплава компрессионными плазменными потоками приводит к увеличению микротвердости поверхностного слоя. Для образца, обработанного на расстоянии 12 см 1 импульсом КПП, значение микротвердости составило 1,77 ГПа, что в 7 раза больше микротвердости исходного образца (рис. 6). С ростом поглощаемой образцом энергии наблюдается уменьшение микротвердости, что, вероятно, связано с уменьшением концентрации интерметаллидов. Для образца, обработанного на расстоянии 8 см тремя импульсами, значение микротвердости составило более 2 ГПа. Увеличение микротвердости в этом случае может быть связано с формированием более развитой де-

фектной структуры в результате сверхбыстрой закалки.

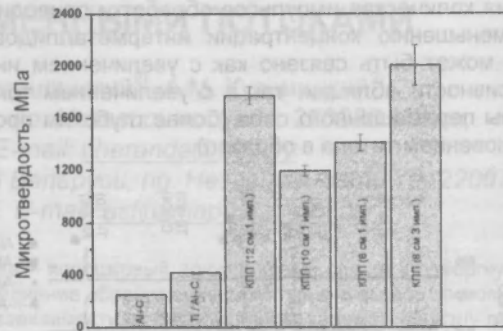


Рис. 6. Микротвердость поверхностного слоя исследуемых образцов, измеренная при нагрузке 200 г.

### Заключение

Проведенные исследования показали, что комбинированная обработка, заключающаяся в предварительном нанесении покрытия титана на поверхность образцов порошкового алюминиевого сплава и последующая обработка компрессионным плазменным потоком приводит к формированию легированного титаном слоя толщиной до 35 мкм, содержащего интерметаллиды. Концентрация титана и интерметаллидов в легированном слое уменьшается с увеличением энергии, поглощаемой поверхностью образца. Формирование интерметаллидов и развитой дефектной структуры обеспечивает увеличение микротвердости сплава до 2 ГПа.

### Список литературы

1. Rocha A. da S., Strohaecker T., Hirsch T. // Surface and Coatings Technology. – 2003. – V. 165. – P. 176.
2. Ivanov Yu., Matz W., Rotshtein V. et al. // Surface and Coatings Technology. – 2002. – V. 150. – P. 188.
3. Hiroshi Akamatsu, Tsutomu Ikeda, Kingo Azuma et al. // Surface and Coatings Technology. – 2001. – V. 136. – P. 269.
4. Uglov V.V., Anishchik V.M., Astashynski V.M. et al. // Surface and Coatings Technology. – 2005. – V. 200. – P. 245.
5. Uglov V.V., Cherenda N.N., Anishchik V.M., Stalmashonak A.K., Astashynski V.M., Mishchuk A.A. // Vacuum. – 2007. – V. 81. – P. 1341.
6. Углов В.В., Черенда Н.Н., Ходасевич В.В. // Анищук В.М., и др. // Физика и химия обработки материалов. – 1998. – № 2. – С. 37.

## Ti ALLOYING OF A POWDER ALUMINUM ALLOY SURFACE LAYER BY COMPRESSION PLASMA FLOWS

N.N. Cherenda<sup>1)</sup>, V.V. Uglov<sup>1)</sup>, M.G. Poluyanov<sup>1)</sup>, V.M. Astashynski<sup>2)</sup>, A.M. Kuzmitski<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Belarussian State University, pr. Nezavisimosti 4, 220030 Minsk, Belarus.

Tel. +375 17 2265834. E-mail: cherenda@bsu.by

<sup>2)</sup> Institute of molecular and atomic physics of Belarus NAS, pr. Nezavisimosti 70, 220072 Minsk, Belarus.

Tel. +375 17 2841065. E-mail: ast@imaph.bas-net.by

A titanium coating-on-powder aluminum alloy system modified by compression plasma flows has been investigated in this work. The influence of plasma treatment on the structure-phase state, element composition and mechanical properties of this system depending on the energy deposited in the surface layer was found. The treatment resulted in the formation of the titanium alloyed layer containing intermetallics with the thickness of ~35 μm. The change of the structure-phase state led to the microhardness increase.