

## ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ СИНТЕЗ МЕТАЛЛ-МАТРИЧНОГО КОМПОЗИТНОГО ПОКРЫТИЯ

А.Б. Марков, Е.В. Яковлев

Томский научный центр СО РАН,

пр. Академический 10/4, Томск 634055, Россия, a.markov@hq.tsc.ru, e.yakovlev@hq.tsc.ru

В настоящей работе рассматривается формирование композитного поверхностного слоя из предварительно нанесенных слоев гексаборида лантана и титана на титановую подложку с последующей обработкой импульсным сильноточным электронным пучком микросекундной длительности. Установлено, что в результате обработки формируется поверхностный слой со средним содержанием бора  $\approx 63$  ат.%. Сформированный слой представляет собой наноструктурированный композит из смеси наночастиц преимущественно  $TiB_2$  распределенных по  $\alpha$ -Ti матрице. Показано, что формирование композитной структуры приводит к повышению нанотвердости и износостойкости синтезированных поверхностных слоев. В результате такой обработки происходит увеличение нанотвердости в 3.9 раз, до 12.5 ГПа, а износостойкости более чем в 5 раз по сравнению с исходной Ti подложкой.

**Ключевые слова:** титан; диборид титана; композитное покрытие; электронный пучок; твердость; износостойкость.

## ELECTRON BEAM SYNTHESIS OF METAL MATRIX COMPOSITE COATING

Alexey Markov, Evgeniy Yakovlev

Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,

10/4 Akademicheskii Ave., 634055 Tomsk, Russia,

a.markov@hq.tsc.ru, e.yakovlev@hq.tsc.ru

In this paper, we consider the formation of a composite surface layer from pre-deposition layers of  $LaB_6$  and Ti on a titanium substrate with subsequent processing with a pulsed low-energy high-current electron beam of microsecond duration. It was found that as a result of the treatment, a surface layer with an average boron content of  $\approx 63$  ат.% is formed. The formed layer is a nanostructured composite of a mixture of nanoparticles, mainly  $TiB_2$ , distributed over an  $\alpha$ -Ti matrix. It is shown that the formation of a composite structure leads to an increase in the nanohardness and wear resistance of the synthesized surface layers. As a result of such processing, the nanohardness increases by 3.9 times, up to 12.5 GPa, and the wear resistance by more than 5 times compared to the initial Ti substrate.

**Keywords:** titanium; titanium diboride; composite coating; electron beam; hardness; wear resistance.

### Введение

Титан и его сплавы обладают превосходной удельной прочностью, высокой вязкостью и коррозионной стойкостью. За последние несколько десятилетий проводятся обширные исследования по улучшению их механических и трибологических свойств, чтобы решить извечную проблему титана и его сплавов – низкую износостойкость, и расширить их область применения. Для повышения твердости и износостойкости изделий из титановых сплавов используются различные методы поверхностной инженерии [1-3]. Улучшение свойств поверхности может быть достиг-

нуто путем разработки металл-матричных композитных покрытий с использованием различных армирующих частиц. [1-3].

Целью настоящей работы было синтезирование титанового металл-матричного композитного покрытия с преимущественным содержанием  $TiB_2$  в качестве армирующей фазы.

### Материал и методы исследования

В данной работе для синтеза соединения  $TiB_2$  использовался следующий подход. На Ti подложку размерами  $15 \times 15 \times 2$  мм последовательно напылялись борсодержащая ( $LaB_6$ ) и боридобразую-

щая (Ti) пленки. Толщины пленок выбирались таким образом, чтобы соотношение (атомное) Ti и B в них соответствовало соединению  $TiB_2$ , и составляли 360 и 140 нм, соответственно. Далее сформированная двухслойная пленка обрабатывалась в едином вакуумном цикле импульсным низкоэнергетическим сильноточным пучком (НСЭП). Затем операции напыления и НСЭП обработки повторялись еще 4 раза. Для сравнения был подготовлен образец с аналогичным пятикратным напылением пленок, но без НСЭП обработок после напыления. Перед осаждением пленок подложки были предварительно обработаны НСЭП, для очистки и гомогенизации поверхности.

Исследование морфологии поверхности осуществлялось с использованием методов сканирующей электронной микроскопии (SEM). Элементный анализ поверхности образцов проводился методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS). Исследование фазового состава проводилось методом рентгеноструктурного анализа (XRD) в геометрии Брегга-Брентано с использованием  $CuK\alpha$  излучения. Твердость синтезированных слоев измеряли с помощью наноиндентометра с трехгранной пирамидкой Берковича при нагрузке 20 мН. Испытания на износостойкость проводили по схеме «pin-on-disc», в качестве контртела использовали шарик из стали 100Cr6 радиусом 3 мм. Нагрузка на образец составляла 5 Н, путь трения 200 м, радиус трека 2 мм и скорость скольжения 25 мм/с. Испытания проводили при нормальных условиях без смазочного материала.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены SEM изображения поверхности образца без и с НСЭП обработкой после напыления пленок  $Ti/LaB_6$ . Морфология поверхности образца с многослойным покрытием сохраняет рельеф пластинчатого мартенсита, образованного после НСЭП очистки Ti подложки (рис. 1 а). Согласно EDS анализу среднее содер-

жание B в поверхностном слое составляет  $\approx 69$  ат.%. На поверхности образца с НСЭП обработкой пластинчатого мартенсита не наблюдается, что говорит о наличии плавления поверхностного слоя (рис. 1, б). Наблюдаются мелкие неровности, напоминающие выступы и впадины, которые в топографическом контрасте видны как совокупность светлых и темных пятен и некоторое количество единичных трещин. При этом значительной неоднородности в элементном составе по поверхности образца не наблюдается. Среднее содержание бора для этого случая составляет  $\approx 71$  ат.%.

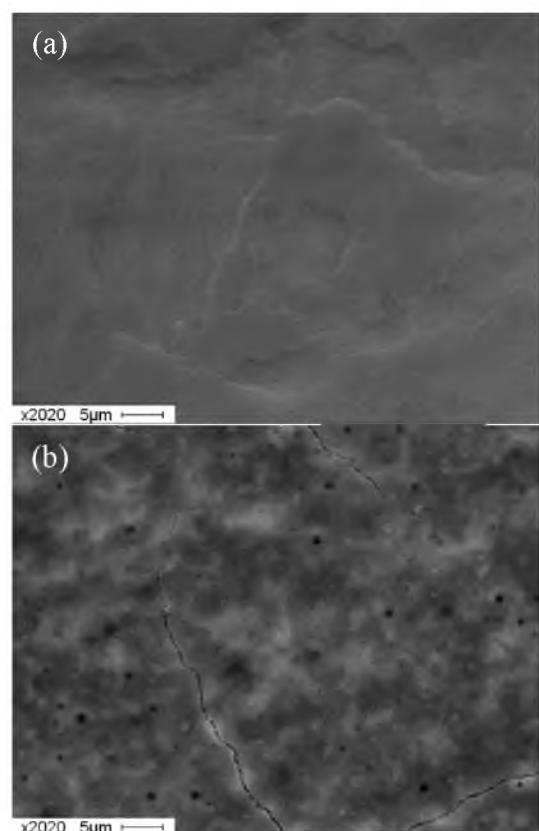


Рис. 1. SEM изображения поверхности образца без (а) и с (б) НСЭП обработкой после напыления пленок  $Ti/LaB_6$

Согласно XRD анализу фазовый состав образца без НСЭП обработки после каждого напыления пленок  $Ti/LaB_6$  представлен  $\alpha$ -Ti и аморфным  $LaB_6$ . Пиков кристаллического B или  $LaB_6$  не обнаружено.

В результате НСЭП обработки пленок  $Ti/LaB_6$  помимо  $\alpha$ -Ti происходит синтез фаз  $TiB_2$ ,  $TiB$  (орт),  $LaB_6$  и La (ГПУ). Пики

фазы  $TiB_2$  имеют наибольшую интенсивность по сравнению с пиками других фаз, что означает высокое содержание этого соединения в поверхностном слое после обработки.

На рис. 2 представлено SEM изображение синтезированного слоя в поперечном сечении. Согласно исследованию, толщина расплавленного слоя составляет в среднем  $5.4 \pm 0.7$  мкм. Максимальная концентрация бора наблюдается вблизи поверхности и составляет не более 63 ат.% и с относительно плавным уменьшением до 0 ат.% при снижении до границы расплава. Модифицированный слой представляет собой нанокомпозит состоящий из смеси нанокристаллических боридных фаз в титановой матрице. Содержание лантана по всей глубине расплавленного составляет не более 4 ат.%.

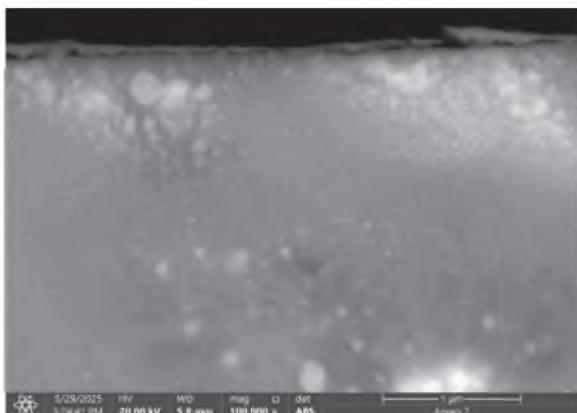


Рис. 2. SEM изображение слоя синтезированного в результате НСЭП обработки пленок  $Ti/LaB_6$  в поперечном сечении

Результаты измерения нанотвердости и коэффициента износа показали, что для исходной  $Ti$  подложки наблюдаются минимальные значения твердости и износостойкости ( $H=3.2 \pm 0.7$  ГПа и  $K_w=9.1 \pm 0.9 \times 10^{-4}$   $mm^3/N \cdot m$ ). Образец без НСЭП обработки после напыления пленок  $Ti/LaB_6$ , имеет высокое значение твердости 10.0 ГПа, но

низкий уровень износостойкости, меньше, чем у исходной подложки  $11.2 \pm 1.6 \times 10^{-4}$   $mm^3/N \cdot m$ . Высокое значение твердости и сравнимый с  $Ti$  подложкой уровень износостойкости говорит об абразивном характере износа для данного образца. В результате НСЭП обработки системы  $Ti/LaB_6$  происходит кратное увеличение, как твердости, так и износостойкости синтезированного поверхностного слоя, повышение твердости составило до 10.9 ГПа, а износостойкости более чем в 5 раз в сравнении с  $Ti$  подложкой.

### Заключение

В настоящей работе продемонстрирован синтез композитного покрытия из предварительно нанесенных слоев  $Ti$  и  $LaB_6$  на титановую подложку с последующей обработкой импульсным сильноточным электронным пучком микросекундной длительности. Установлено что, синтезированный слой представляет собой наноструктурированный композит, армированный преимущественно частицами дигорида титана. Формирование композитной структуры приводит к кратному повышению нанотвердости и износостойкости поверхности.

### Библиографические ссылки

1. Yan song Zhu, Yun fei Liu, Xing nong Wei, Dong Sun, et al. Tribological characteristics of the dual titanium boride layers ( $TiB_2+TiB$ ) on titanium alloy. *Ceramics International* 2021; 47(10): 13957-13969.
2. Han C., Babicheva R., Chua J.Q., Ramamurty U., Tor S.B., et al. Microstructure and mechanical properties of ( $TiB+TiC$ )/ $Ti$  composites fabricated in situ via selective laser melting of  $Ti$  and  $B4C$  powders. *Additive Manufacturing* 2020; 36: 101466.
3. Misra D., Dhakar B., Anusha E., Shariff S.M.. Mukhopadhyay S. et al. Evaluation of nanomechanical and tribological properties of laser surface alloyed boride-nitride-carbide ceramic matrix composite coatings. *Ceramics International* 2018; 44(14): 17050-17061.