

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 высокоэнергетическим электронным пучком микросекундной длительности. Установлено, что в результате обработки формируется поверхностный слой со средним содержанием бора ≈ 63 ат.%. Сформированный слой представляет собой наноструктурированный композит из смеси наночастиц преимущественно TiB_2 распределенных по α -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 ≈ 63 at.% is formed. The formed layer is a nanostructured composite of a mixture of nanoparticles, mainly TiB_2 , distributed over an α -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 применений. 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-

шая (Ti) пленки. Толщины пленок выбирались таким образом, чтобы соотношение (атомное) Ti и В 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 наноиндентомера 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 В в поверхностном слое составляет ≈ 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 ≈ 71 ат.%.

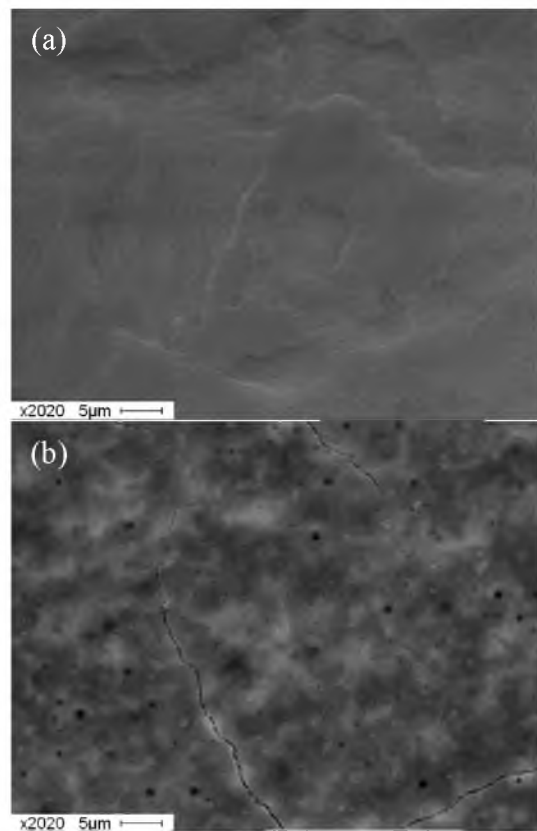


Рис. 1. SEM изображения поверхности образца без (а) и с (б) НСЭП обработкой после напыления пленок Ti/LaB_6

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

В результате НСЭП обработки пленок Ti/LaB_6 помимо α -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 ± 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 наноккомпозит состоящий из смеси нанокристаллических боридных фаз в титановой матрице. Содержание лантана по всей глубине расплавленного составляет не более 4 ат. %.

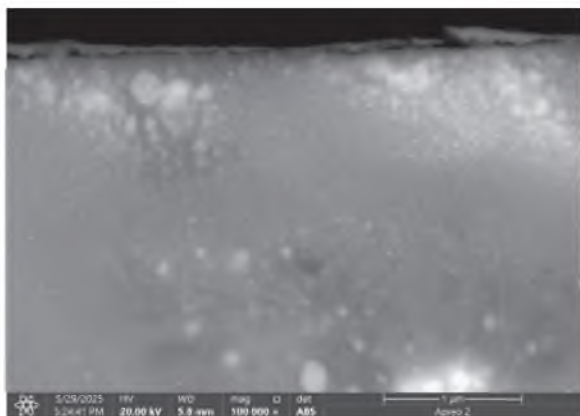


Рис. 2. SEM изображение слоя синтезированного в результате НСЭП обработки пленок Ti/LaB_6 в поперечном сечении

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 $K_w=9.1 \pm 0.9 \times 10^{-4}$ мм³/Н×м). 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 $11.2 \pm 1.6 \times 10^{-4}$ мм³/Н×м. 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 диборида 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 ($\text{TiB}+\text{TiC}$)/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.