

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА ВТ6 ПОСЛЕ ДВУХКОМПОНЕНТНОГО ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ И ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ

Соскова Н.А., Райков С.В., Ионина А.В., Иванов Ю.Ф., Будовских Е.А., Громов В.Е.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Россия,
ani-vo@yandex.ru*

Титан и сплавы на его основе являются в настоящее время одним из самых востребованных конструкционных материалов [1], для защиты поверхности изделий из которых широко используются различного рода покрытия [2, 3]. Одним из перспективных методов формирования покрытий является электровзрывное легирование (ЭВЛ) [4, 5]. Дополнительное повышение свойств поверхностного слоя материала и изделия в целом достигается при комбинированной обработке, сочетающей ЭВЛ и последующую электронно-пучковую обработку (ЭПО) модифицированной поверхности [5, 6]. Для установления оптимальных режимов таких обработок необходимо выяснение природы улучшения физико-механических и прочностных свойств сплава при ЭВЛ и ЭПО.

Целью настоящей работы являлось обнаружение закономерностей эволюции структуры и свойств поверхностного слоя сплава на основе титана ВТ6, подвергнутого двойной обработке, сочетающей электровзрывное легирование и последующее облучение электронным пучком.

В качестве объекта исследования был выбран сплав на основе титана ВТ6 ($< 0,6$ вес.% Fe, $< 0,1\%$ С, $< 0,1\%$ Si, $(3,5-5,3)\%$ V, $(5,3-6,8)\%$ Al, $< 0,3\%$ Zr, $< 0,05\%$ N, $< 0,2\%$ O, $< 0,015\%$ H, остальное Ti). Образцы имели форму шайбы толщиной 10 мм и диаметром 15 мм. Легирование поверхностного слоя осуществляли путем воздействия плазмы, формирующейся при электрическом взрыве углеграфитового волокна массой 140 мг, на поверхность которого в область взрыва помещали навеску порошка диборида титана TiB_2 или диоксида циркония ZrO_2 массой 50 мг. Средняя толщина расплавленного слоя составляла ~ 30 мкм. Дополнительную импульсную обработку модифицированного слоя осуществляли в среде аргона высокоинтенсивным электронным пучком на установке «СОЛО» [7] по режимам: энергия электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов 45–60 Дж/см², длительность импульсов воздействия 100 мкс и 200 мкс, их количество и частота следования импульсов – (10 и 20) имп. и $0,3\text{ с}^{-1}$. Исследования элементного и фазового состава, зеренной и внутривзеренной структуры поверхностного слоя осуществляли методами сканирующей и электронной дифракционной микроскопии [8, 9]; механические свойства изучали, измеряя микротвердость.

Характерное изображение поверхности образца сплава ВТ6, формирующейся при электровзрывном легировании (УГВ+TiB₂), приведено на рис. 1, а. Как в [5, 6], поверхностный слой характеризуется высоким уровнем шероховатости и большим разнообразием структурных элементов: присутствуют микропоры и микрократеры, микротрещины, наплывы, обусловленные радиальным течением металла, наслоения, образовавшиеся в результате выплескивания металла при попадании в расплав частиц порошка и осколков углеграфитового волокна (УГВ), размеры которых изменяются в широких пределах (поперечные от 3 мкм до 9 мкм; продольные от 10 до 50 мкм). ЭВЛ при указанных выше параметрах сопровождается плавлением поверхностного слоя. Толщина легированного слоя практически не зависит от типа порошковой навески и может изменяться в пределах от 15 до 75 мкм (рис. 1, б).

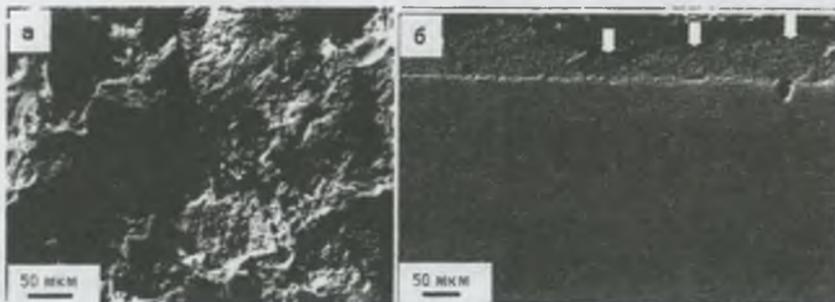


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности образца ВТ6, подвергнутого ЭВЛ (УГВ+TiB₂) (а) и поперечного сечения (б). Стрелками на (б) указана поверхность легирования. Сканирующая электронная микроскопия

Последующая ЭПО сопровождается существенным снижением шероховатости модифицируемого слоя. На поверхности выявляется поликристаллическая структура, размеры зерен которой изменяются в пределах 10 мкм. В объеме зерен наблюдается субзеренная структура (ячейки высокоскоростной кристаллизации); размеры субзерен изменяются в пределах от 0,2 мкм до 0,8 мкм.

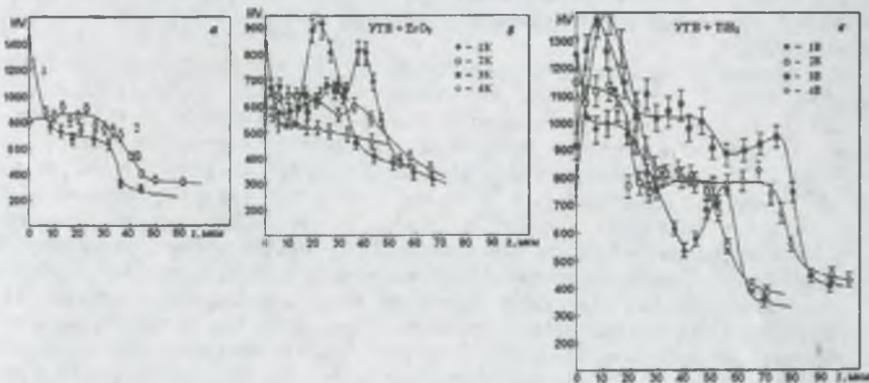


Рис. 2. Распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя после ЭВЛ совместно с порошковой навеской диборида титана TiB₂ (а, кривая 1), диоксида циркония ZrO₂ (а, кривая 2) и последующей ЭПО в различных режимах: кривая 1 – облучение электронным пучком по режиму 1; кривая 2 – по режиму 2; кривая 3 – по режиму 3; кривая 4 – по режиму 4.

Режим 1: 45 Дж/см², 100 мкс, 10 имп., 0,3 с⁻¹; режим 2: 50 Дж/см², 100 мкс, 10 имп., 0,3 с⁻¹; режим 3: 60 Дж/см², 100 мкс, 10 имп., 0,3 с⁻¹; режим 4: 45 Дж/см², 200 мкс, 20 имп., 0,3 с⁻¹

Анализ прочностных характеристик поверхностного слоя сплава ВТ6, подвергнутого ЭВЛ и последующей ЭПО, осуществляли путем построения профиля микротвердости. Результаты исследований приведены на рис. 2. Отчетливо видно, что после ЭВЛ максимальная микротвердость достигается на поверхности обработки (рис. 2, а, кривая 1), либо в приповерхностном слое (рис. 2, а, кривая 2) и превышает микротвердость основы в 3,5...5,5 раз, в зависимости от типа порошка навески. Толщина поверхностного слоя, микротвердость которого превышает микротвердость основы в ~3,0 раза, достигает 35 мкм. Последующая ЭПО приводит к существенному увеличению толщины упрочненного слоя.

Так, при науглероживании с использованием навески порошка TiB_2 толщина упрочненного слоя (слоя, микротвердость которого превышает микротвердость основы в ~3,0 раза) достигает 85...90 мкм (рис. 2, в).

Методами просвечивающей электронной микроскопии фольг, расположенных на расстоянии 2-3 мкм от поверхности обработки было показано, что в объеме субзерен сформирована пластинчатая субструктура ($\alpha-Ti$, толщина пластин изменяется в пределах от 70 нм до 150 нм). По границам субзерен и в стыках границ располагаются частицы второй фазы (TiC) в виде протяженных прослоек или глобул. Их размеры изменяются в пределах до 100 нм.

Таким образом, многократное увеличение микротвердости поверхностного слоя сплава ВТ6, подвергнутого ЭВЛ и последующей ЭПО, обусловлено формированием многофазной субмикро- и наноразмерной структуры пластинчатого типа на основе $\alpha-Ti$, упрочнённой частицами карбида титана.

Выводы. Электровзрывное легирование (науглероживание с добавлением порошков TiB_2 и ZrO_2) поверхности сплава ВТ6 формирует упрочнённый слой толщиной до 35 мкм, микротвёрдость которого в 3-5 раз (в зависимости от типа порошка навески) превышает микротвёрдость основы. Последующая электронно-пучковая обработка снижает шероховатость поверхности модифицированного слоя и приводит к значительному увеличению толщины упрочнённого слоя. Значительное увеличение микротвёрдости поверхностного слоя сплава ВТ6, подвергнутого ЭВЛ и последующей электронно-пучковой обработке, обусловлено формированием многофазной субмикро- и наноразмерной структуры пластинчатого типа на основе $\alpha-Ti$, упрочнённой наноразмерными выделениями второй фазы TiC .

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (гос. контракт № 14.740.11.0813) и грантами РФФИ (проекты № 11-02-91150-ГФЕН-а, № 11-02-12091-офи-м-2011).

Список литературы

1. Полмеар Я. Легкие сплавы: от традиционных до нанокристаллов. – М.: Техносфера, 2008. – 464 с.
2. Бобров Г.В., Ильин А.А. Нанесение неорганических покрытий. Теория. Технология. Оборудование: Учебное пособие для вузов. – М.: Интернет Инжиниринг, 2004. – 626 с.
3. Хокинг М., Васантасри В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия. – М.: Мир, 2000. – 516 с.
4. Багаутдинов А.Я., Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов – Новокузнецк, СибГИУ – 2007. – 301 с.
5. Карпий С.В., Морозов М.М., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Структура, фазовый состав и свойства титана после электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки. – Новокузнецк: Изд-во НПК, 2010. – 173 с.
6. Формирование структурно-фазовых состояний металлов и сплавов при электровзрывном легировании и электронно-пучковой обработке / под ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк. Изд-во «Интеркузбасс», 2011. – 212 с.
7. Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н. Низкоэнергетические электронные пучки субмиллисекундной длительности: получение и некоторые аспекты применения в области материаловедения. // Структура и свойства перспективных металлических материалов / Под ред. А.И. Потекаева. – Томск: Изд-во НТЛ, 2007. – С. 345–382.
8. Утевский Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. – М.: Металлургия, 1973. – 584 с.
9. Энгеле Л., Клингеле Г. Растровая электронная микроскопия. Разрушение: справочное изд. Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1986. – 232 с.