

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «Физическая мезомеханика.

Материалы с многоуровневой иерархически
организованной структурой и интеллектуальные
производственные технологии»

6–10 сентября 2021 г.

Томск, Россия

Томск – 2021
Издательство ТГУ

СТРУКТУРНО-ФАЗОВАЯ ЭВОЛЮЦИЯ В КОМПОЗИТЕ ВТ6/СУ, ПОЛУЧЕННОМ ФРИКЦИОННОЙ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕЙ ОБРАБОТКОЙ

Зыкова А.П., Гусарова А.В., Воронцов А.В., Чумаевский А.В.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

Метод фрикционной перемешивающей обработки (ФПО) является перспективным методом получения новых композиционных материалов на основе титана [1,2]. В работе [3] авторы показали возможность получения композита Ti6Al4V/TiO₂ ФПО, имеющего повышенную микротвердость поверхности. В работе [4] получен композит Ti6Al4V/B4C ФПО с повышением твердости, модуля упругости, предела прочности при сжатии на ~57%, 17%, 47% соответственно, по сравнению с исходным Ti6Al4V. Несмотря на возрастающий интерес к созданию композитов на основе титановой матрицы методом ФПО, существует ряд ограничений, которые необходимо устраниить:

- 1) низкая теплопроводностью титана, приводящая к ограниченной свариваемости и большому градиенту в зоне перемешивания;
- 2) выбор материала инструмента, так как обработка титана приводит к большому износу инструмента, загрязняет обрабатываемую зону.

Тем не менее, ФПО характеризуется сочетанием высоких температур и высоких скоростей деформации. В ВТ6 процессы деформации дополнительно сопровождаются фазовыми превращениями, что делает их особенно интересными для фундаментального изучения. Особый интерес вызывает *in situ* композит системы Ti-Cu, так как небольшое количество меди (5 об.%) приводит к значительному повышению износостойкости, коррозионной стойкости, высокой прочности при повышенных температурах, обладают огнезащитной функцией. Учитывая благоприятное влияние Cu на свойства ВТ6 при получении композиционных материалов различными методами, в настоящем исследовании показаны особенности формирования структурно-фазового состава *in situ* композита ВТ6/Cu методом ФПО.

В работе исследовали листовой прокат ВТ6 размером 60×300×2,5 мм³. Для получения *in situ* композита ВТ6/Cu использовали промышленные порошки Cu (чистота 99,5%) со средним размером частиц 10,5±0,5 мкм. Перед изготовлением композитов на пластинах ВТ6 были сделаны отверстия для порошка Cu диаметром 1,2 мм, глубиной 2 мм и интервалом между отверстиями 5,4 мм. Диаметр, глубина и интервал между отверстиями создавали общий объем в зоне перемешивания пластины ВТ6 около 5 об.% Cu. Далее порошки Cu засыпали в отверстия и уплотняли механическим способом. В процессе ФПО использовали инструмент из жаропрочного сплава на основе никеля с пином в форме усеченного конуса высотой 2 мм, диаметром плеч инструмента 20 мм, углом наклона инструмента 3°. Во всех экспериментах ФПО ВТ6 использовалось направление вращения инструмента против часовой стрелки. Для равномерного распределения порошков Cu внутри матрицы ВТ6 проводили много проходную ФПО пластин ВТ6 со 100% перекрытием без изменения направления между проходами. Во избежание перегрева инструмента использовали систему водяного охлаждения инструмента. Аргон использовался в качестве защитного газа для предотвращения окисления обрабатываемой пластины ВТ6 в процессе ФПО.

Микроструктура исходного ВТ6 характеризовалась большим количеством α-зерен (средний размер 4,5 мкм) с зернограничной β-фазой (рис. 1а). После четырехпроходной ФПО ВТ6 происходит формирование большого количества β-зерен (рис. 1б). Микроструктуры, обнаруженные в верхней и средней частях зоны перемешивания (ЗП), отличаются друг от друга тем, что верхняя часть состоит из зерен α-Ti и β-Ti с расположеннымими внутри них мелкими рекристаллизованными зернами (рис. 1в). В средней части ЗП микроструктура состоит преимущественно из β-фазы. Наблюдается измельчение зерна до 1,3±0,08 мкм. Температура на поверхности 4-проходной ФПО ВТ6 составляла около 900-990 °С, то есть близкая к температуре β-перехода. Внутри ЗП температура может быть даже выше, чтобы

вызвать превращение $\alpha + \beta \rightarrow \beta$ и, таким образом, увеличить количество β -зерен после охлаждения.

Микроструктура верхней и средней частей ЗП композита BT6/Cu после шестипроходной ФПО также сильно отличаются. Верхняя часть ЗП характеризуется наличием зерен α -Ti размером $0,78 \pm 0,04$ мкм и β -Ti размером $0,84 \pm 0,04$ мкм наряду с гораздо меньшим количеством игольчатых и ламинарных зерен α -Ti (рис. 1г). В средней части ЗП формируются чередующиеся структуры потока металла, приводимые в движение пином инструмента в процессе ФПО, как из зерен α -Ti размером $0,83 \pm 0,047$ мкм, так и из зерен β -Ti размером $1,97 \pm 0,11$ мкм (рис. 1д). Области β -Ti обогащены медью. Предполагается, что 6-проходная ФПО привела, таким образом, к образованию зерен β -Ti большего размера в средней части ЗП, чем у в верхней, из-за более высокого содержания меди. Распределение Cu в слоях Ti6Al4V различна и в некоторых местах достигает почти 20 ат. %, образуя пересыщенный твердый раствор Cu в BT6. При содержании ~30-35 ат.% Cu и 60 ат. % Ti формируется фаза Ti_2Cu .

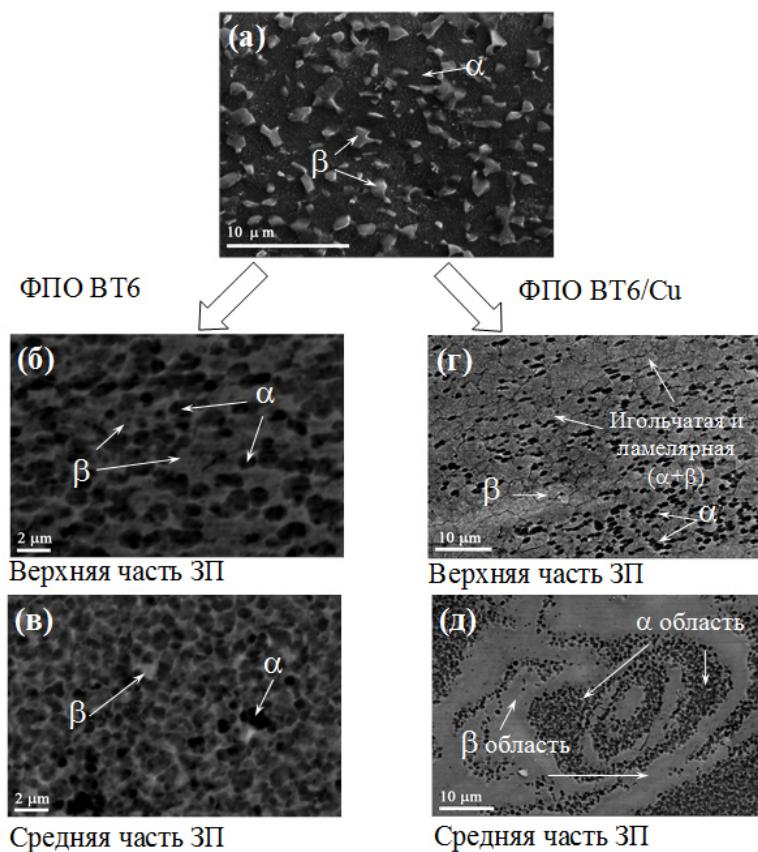


Рис. 1. РЭМ-изображения в режиме BSE: исходное состояние BT6 (а);
после 4-х ФПО (б, в); после 6-ти ФПО BT6/Cu (г, д)

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0006.

1. Ding Z., Fan Q., Wang L. A Review on Friction Stir Processing of Titanium Alloy: Characterization, Method, Microstructure, Properties, Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science // 2019. Vol. 50. P. 2134–2162
2. Zykova A.P., Tarasov S.Y., Chumaevskiy A.V., Kolubaev E.A. A Review of Friction Stir Processing of Structural Metallic Materials: Process, Properties, and Methods // Metals. 2020. Vol. 10. P. 772.
3. Zhang C., Ding Z., Xie, Zhang L.C., Wu L., Fu Y., Wang L., Lu W. Electrochemical and in vitro behavior of the nanosized composites of Ti-L. 6Al-4V and TiO_2 fabricated by friction stir process // Applied Surface Science. 2017. Vol. 423. P. 331–339.
4. Wang T., Gwalani B., Shukla S., Frank M., Mishra R.S. Development of in situ composites via reactive friction stir processing of Ti-B4C system // Composites Part B: Engineering. 2019. Vol. 172. P. 54–60.