Т. 63, № 6 ФИЗИКА 2020

УДК 538.911; 548.4; 669.17: 620.186.8

DOI: 10.17223/00213411/63/6/172

И.А. ДИТЕНБЕРГ $^{1,2}$ , И.В. СМИРНО $B^{1,2}$ , Д.А. ОСИПО $B^2$ , К.В. ГРИНЯЕ $B^{1,2}$ , М.А. КОРЧАГИН $^3$ 

## ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ W-Ta-Mo-Nb-Zr-Cr-Ti $^*$

**Ключевые слова:** механическая активация, многокомпонентный состав, тугоплавкие металлы, микротвердость.

На сегодняшний день механическая активация (МА) широко применяется при получении высокоэнтропийных сплавов на основе тугоплавких металлов на стадии создания прекурсоров из многокомпонентных смесей порошков для последующего искрового плазменного спекания [1–9]. Установлено, что уже при МА в таких системах не только происходит интенсивное перемешивание компонентов порошковой смеси, но и активизируются процессы образования фаз [1–9]. Одним из актуальных вопросов является выяснение влияния продолжительности обработки на уровень механических свойств активируемых порошковых систем.

В настоящей работе проведено изучение влияния продолжительности МА на микротвердость много-компонентной смеси порошков тугоплавких металлов, элементный состав которой приведен в таблице.

## W Ta Mo Nb Zr Cr Τi Состав 6.5356 6.6405 12.5242 12.9332 $13.17\overline{23}$ 23.1090 ат. % 25.0852

## Элементный состав системы порошков (ат. %)

МА продолжительностью 1 и 15.5 мин проведена в атмосфере аргона в планетарной шаровой мельнице АГО-2 с водяным охлаждением. Объем каждого из двух стальных барабанов мельницы –  $160~{\rm cm}^3$ . Диаметр шаров – 8 мм, масса шаров в каждом барабане –  $200~{\rm r}$ , масса образца –  $11.44~{\rm r}$ . Центробежное ускорение шаров –  $400~{\rm m/c}^2$  ( $40{\rm g}$ ). Для предотвращения слипания заключительные  $0.5~{\rm mu}$  обработки проведены с добавлением этанола. Микротвердость ( ${\rm H_{\mu}}$ ) определяли методом Виккерса на приборе «Neophot 21» при нагрузке  $0.5~{\rm H}$  и выдержке  $15~{\rm c}$ . Измерения проведены на отдельных порошинках и их конгломератах, для чего изготовляли компакты на основе смеси порошков с эпоксидным клеем. Исследования методами сканирующей электронной микроскопии выполнены с применением FEI Quanta  $200~{\rm 3D}$  ( $30~{\rm kB}$ ). Фазовый состав порошковых систем после разных времен MA был изучен методом рентгенофазового анализа на дифрактометре Shimadzu XRD  $6000~{\rm c}$  использованием  ${\rm Cu}K_{\alpha}$ -излучения. Для анализа использованы базы данных PDF-4 (The Powder Diffraction File 4) и программа полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.4.

Установлено, что увеличение продолжительности MA сопровождается ростом значений микротвердости от  $(4.03\pm1.12)$  ГПа после 1 мин до  $(8.93\pm1.74)$  ГПа после 15.5 мин. Наличие существенных отклонений свидетельствует о высокой структурно-фазовой неоднородности.

Прекурсор после 1 мин MA характеризуется наличием крупных пластинчатых конгломератов, достигающих 200—250 мкм при толщине от 10 до 50 мкм (рис. 1, a). В Z-контрасте (рис. 1,  $\delta$ ) наблюдаются области локализации отдельных компонентов смеси размерами от нескольких микрометров до нескольких десятков микрометров. Данные энергодисперсионного анализа свидетельствуют об отсутствии перемешивания на атомарном уровне.

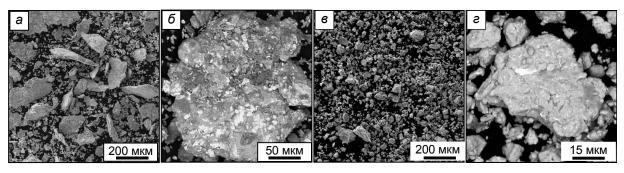


Рис. 1. Обзорные изображения порошковой смеси (a, в), изображения конгломератов в Z-контрасте  $(\delta, \varepsilon)$  после 1  $(a, \delta)$  и 15.5 мин  $(s, \varepsilon)$  МА. Сканирующая электронная микроскопия

<sup>\*</sup> Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг., проект № III.23.26.

## Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала «Известия высших учебных заведений. Физика» осуществляется на платформе Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU на платной основе:

https://www.elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725