

УДК 536.46+534.29

**СИНТЕЗ ПОРИСТЫХ ТУГОПЛАВКИХ МАТЕРИАЛОВ  
НА ОСНОВЕ БОРИДОВ ТИТАНА МЕТОДОМ СВС  
С ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ  
ВОЗДЕЙСТВИЕМ**

**М. М. КУЛАК**

*Институт технической акустики НАН Беларуси, Беларусь;*

**Б. Б. ХИНА**

*Физико-технический институт НАН Беларуси, Беларусь;*

**В. В. КЛУБОВИЧ**

*Институт технической акустики НАН Беларуси, Беларусь*

*Изложены результаты исследования фазового состава и структуры пористого тугоплавкого высокотвердого материала, полученного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) при высокоэнергетическом ультразвуковом воздействии. Показано, что наложение ультразвука на СВС позволяет «подстраивать» микроструктуру конечного СВС-продукта под конкретную функцию материала.*

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), или синтез в режиме горения, является эффективным, ресурсо- и энергосберегающим способом получения различных соединений, например, карбидов, нитридов, боридов, интерметаллидов, а также композиционных материалов на их основе [1]. Недостатком СВС является то, что синтез обычно протекает в узкой области параметров и им невозможно управлять после инициирования (поджига шихты локальным тепловым импульсом). В связи с этим разработка контролируемых СВС-процессов для получения материалов с требуемой структурой и функциональными свойствами является актуальной проблемой. Ранее нами было показано, что наложение мощных ультразвуковых колебаний (УЗК) на СВС-процесс в системе Ti-C-Ni-Mo, в которой образуется только одна фаза (карбид титана), приводит к изменению микроструктуры синтезируемого композиционного материала (кермета “TiC – металлическая связка”) и при этом существует оптимальная амплитуда УЗК, обеспечивающая получение однородной мелкозернистой структуры [2, 3].

В данной работе исследовано влияние УЗК на параметры СВС-процесса, фазовый состав и микроструктуру продукта в системе Ti-B, в которой существуют три фазы: TiB, Ti<sub>3</sub>B<sub>4</sub> и TiB<sub>2</sub>. Бориды титана являются твердыми и тугоплавкими соединениями, обладающими металлической проводимостью, и композиты на основе TiB<sub>2</sub> представляют собой перспек-

тивные материалы для изготовления шлифовального инструмента для особых условий шлифования.

СВС с наложением УЗК проводили в установке собственной конструкции (рис.) [4] в атмосфере инертного газа (Ar) при давлении 0,98 МПа. Образцы шихты Ti + βВ, где β = 0,75–2,25 – мольное соотношение компонентов, которое соответствует области составов 42,9–69,2 ат.% В, имели пористость 40–45%. Частота УЗК составляла 18 кГц, а амплитуду варьировали от ξ=0 до 15 мкм. Синтезированные материалы исследовали с помощью оптической микроскопии, рентгенофазового анализа (РФА) (BRUKER D8 ADVANCE) и сканирующей электронной микроскопии (Carl Zeiss LEO1455VP).

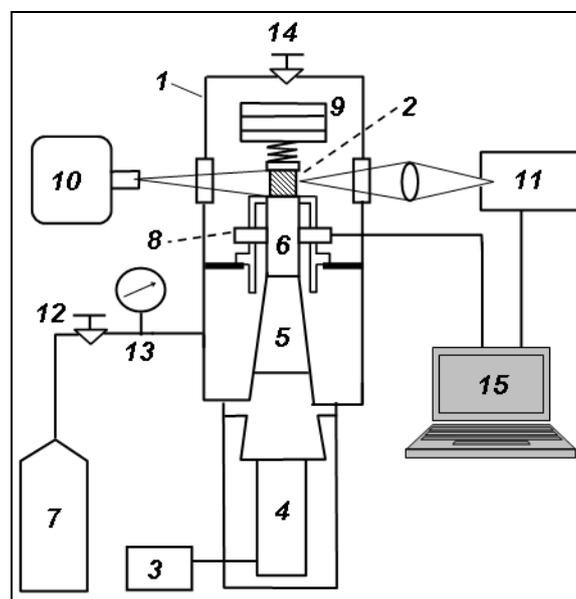


Рис. Схема установки для СВС в ультразвуковом поле:

1 – камера (сосуд высокого давления); 2 – образец; 3 – ультразвуковой генератор; 4 – магнитострикционный преобразователь; 5 – ультразвуковой концентратор; 6 – титановый волновод; 7 – газовый баллон; 8 – датчик амплитуды; 9 – прижимное устройство; 10 – видеокамера; 11 – двухволновый радиационный пирометр (0,4 и 0,538 мкм); 12 – вентили и система газораспределения; 13 – манометр; 14 – выпускной вентиль; 15 – компьютерная система сбора и обработки данных

Установлено, что скорость и температура горения для различных составов уменьшаются с увеличением амплитуды УЗК ξ. Как показано нами ранее [2, 3], это связано с тепловым воздействием УЗК: охлаждение образца из-за вынужденной конвекции окружающего газа. По данным РФА, без УЗК (ξ=0) фазовый состав СВС-продукта не соответствует равновесной диаграмме состояния системы Ti–В [5]. Согласно положениям синергетики [6], для неравновесной системы даже слабое воздействие может суще-

ственно изменить состояние такой системы. Это подтверждается результатами РФА продуктов взаимодействия в системе  $Ti + \beta B$ , полученных при наложении УЗК на СВС. При одном и том же составе шихты изменяется соотношения фаз в продукте, а также доли кубической и орторомбической модификаций фазы  $TiB$ . С увеличением амплитуды  $\xi$  влияние УЗК на фазовый состав усиливается, и в наибольшей степени это проявляется для состава  $Ti-1,5B$ . Также установлено, что УЗК влияние на микроструктуру СВС-продукта: размер зерен боридов становится более однородным по объему и возрастает доля зерен, имеющих равноосную форму. Наиболее сильно такое влияние проявляется для состава  $Ti-2B$ , когда продукт является однофазным (только соединение  $TiB_2$ ): 55% зерен имеют размер от 1 до 2 мкм при  $\xi=10$  мкм.

Таким образом, наложение УЗК на СВС позволяет воздействовать как на фазовый состав, так и на микроструктуру тугоплавких продуктов синтеза, формирующихся из высокотемпературного расплава в волне горения. Это связано с физическим (т.е. нетепловым) воздействием УЗК на комплекс физико-химических процессов в высокотемпературной зоне волны СВС: растекание расплава на основе титана и зародышеобразование тугоплавких продуктов (боридов титана). При этом существует оптимальная амплитуда, приводящая к получению однородного мелкозернистого продукта.

Полученные результаты открывает перспективу создания СВС-технологий получения новых пористых материалов на основе боридов титана, позволяющих подстраивать микроструктуру конечного продукта под конкретную функцию.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов, А.Г. Научные основы, достижения и перспективы развития процессов твердопламенного горения / А.Г.Мержанов // Изв. Академии наук. Сер. Химическая. – 1997. – № 1. – С. 8–32.
2. Khina, V.V. Effect of ultrasound on combustion synthesis of composite material “TiC-metallic binder” / V.V. Khina, M.M. Kulak. // Journal of Alloys and Compounds. – 2013. – V. 578. – P. 595–601.
3. Кулак, М.М. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез в системе  $Ti-C-Ni-Mo$  при наложении мощного ультразвука / М.М. Кулак, Б.Б. Хина // Инженерно-физический журнал. – 2014. – Т. 87, № 2. – С. 325–335.
4. Установка для синтеза тугоплавких соединений : пат. 4319 U Респ. Беларусь : МПК (2006) В 22F 3/00 / В.В. Клубович, М.М. Кулак, Л.Л. Платонов // Официальный бюллетень / Национальный центр интеллектуальной собственности. – 2008. – № 2 (61). – С. 139.
5. Murray, J.L. The B-Ti (boron-titanium) system / J.L. Murray, P. K.Liao, K.E. Spear // Bulletin of Alloy Phase Diagrams. – 1986. – V. 7, No.6. – P. 550–555.
6. Николис, Г. Самоорганизация в неравновесных системах: от диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации / Г. Николис, И. Пригожин. – М. : Мир, 1979. – 512 с.