

# ХАРАКТЕРИСТИКИ КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ $V_4C-TiB_2$ И $V_4C-ZrB_2$ , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СВС-ПРЕССОВАНИЯ

В.А. Щербаков<sup>1</sup>, А.Н. Грядунов<sup>1</sup>, О.И. Ботвина<sup>2</sup>, Н.В. Сачкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук, г. Черноголовка, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия

\*Vladimir@ism.ac.ru

Представлены экспериментальные результаты получения из элементарных порошков титана, циркония, бора и углерода методом СВС-прессования керамических композитов  $V_4C-TiB_2$  и  $V_4C-ZrB_2$ . Для определения оптимальных условий получения композитов рассчитаны адиабатическая температура и составы равновесных продуктов горения. Анализ показал, что равновесными продуктами синтеза являются тугоплавкие соединения, которые используются в качестве дисперсной фазы ( $TiB_2$  и  $ZrB_2$ ) и керамической связки ( $V_4C$ ). Расчетные и экспериментальные результаты показали, что содержания керамической связки оказывает существенное влияние на адиабатическую температуру горения, долю жидкой фазы в конечном продукте, остаточную пористость и микроструктуры СВС-композитов  $V_4C-TiB_2$  и  $V_4C-ZrB_2$ . Эффективным способом получения керамических композитов является осуществление синтеза с использованием дополнительного источника тепла в виде «химической печи». Показано, что минимальная остаточная пористость достигается при содержании связки  $V_4C$  в композите 20–40 масс. % и соотношении массы шихтовой заготовки и химической печи 1:4. Показано, что при содержании связки  $V_4C$  менее 20% мас. в системе  $Ti-B-C$  формируется однородный керамический композит  $V_4C-TiB_2$  с размером зерен  $TiB_2$  10–12 мкм. Увеличение содержания  $V_4C$  до 50% мас. приводит к уменьшению размера частиц  $TiB_2$  до 0,5 мкм и формированию композита с неоднородной микроструктурой. Полученные керамические композиты обладают высокой твердостью по Виккерсу ( $Hv=32,84-33,64$  ГПа). В системе  $Zr-B-C$  при содержании связки  $V_4C$  менее 10 мас. % формируется однородный керамический композит  $V_4C-ZrB_2$  с размером зерен  $ZrB_2$  10–20 мкм. Увеличение содержания  $V_4C$  до 20 мас. % приводит к уменьшению размера частиц  $ZrB_2$  до 2–5 мкм и формированию композита с неоднородной микроструктурой и твердостью по Виккерсу 21–24,5 ГПа.

Цель работы – изучить возможность получения методом СВС-прессования высокотемпературных керамических композитов на основе боридов титана и циркония с использованием керамической матрицы  $V_4C$ , а также исследование влияния состава

реакционной смеси на формирование фазового состава и микроструктуры СВС-композитов на физико-механические характеристики керамических композитов  $B_4C$ - $ZrB_2$  и  $B_4C$ - $TiB_2$ .

Карбид бора ( $B_4C$ ) широко используется для различных конструкционных применений, вследствие его чрезвычайно высокой твердости и износостойкости, низкого удельного веса, высокой термостойкости и химической стабильности. Однако использование карбида бора в качестве конструкционного материала ограничено его низкой ударной вязкостью. Введение частиц  $TiB_2$  и  $ZrB_2$  в  $B_4C$  улучшает механические характеристики композита. Установлено, что добавление  $TiB_2$  увеличивает коэффициент вязкостного разрушения  $B_4C$ .

Результаты термодинамических расчетов согласуются с данными рентгенофазового анализа СВС-композитов, который показал, что конечный продукт, образовавшийся при горении смесей в системе  $Ti$ - $B$ - $C$ , содержит  $TiB_2$  и  $B_4C$ , а в системе  $Zr$ - $B$ - $C$  –  $ZrB_2$  и  $B_4C$ . Совпадение составов синтезированных композитов с расчетными указывает на формирование равновесных СВС-продуктов  $B_4C$ - $TiB_2$  и  $B_4C$ - $ZrB_2$ .

Эффективность компактирования СВС-продукта зависит от содержания в нем жидкой фазы. С увеличением содержания жидкой фазы уменьшается пористость конечного продукта. С целью уменьшения остаточной пористости СВС-композиты синтезировали с использованием химической печи. В результате для композита  $B_4C$ - $TiB_2$  при содержании  $B_4C$  15–30 мас. % минимальная остаточная пористость составила 1,5 %, а для композитов  $B_4C$ - $ZrB_2$  при содержании  $B_4C$  15–20 мас. % – менее 1%.

На рисунках 1 и 2 представлены микроструктуры СВС-композитов  $B_4C$ - $TiB_2$  и  $B_4C$ - $ZrB_2$ . Видно, что они состоят из дисперсной фазы  $TiB_2$  или  $ZrB_2$  (светлая фаза) и керамической связки  $B_4C$  (темная фаза). Для керамического композита  $B_4C$ - $TiB_2$  при содержании в нем 20 мас. % связки  $B_4C$  средний размер частиц диборида титана составляет 10–15 мкм (рис. 2а).

Благодаря хорошему смачиванию расплавленный карбид бора равномерно растекся по поверхности твердых частиц  $TiB_2$ . С увеличением содержания  $B_4C$  в конечном продукте до 50% средний размер зерен  $TiB_2$  уменьшился до 1–0,5 мкм (рис. 2д), что обусловлено уменьшением температуры горения.

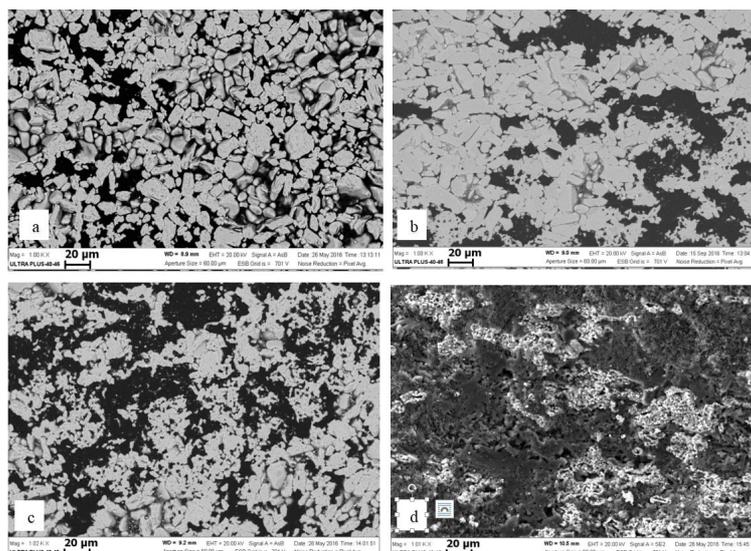


Рис. 1. Микроструктура керамических композитов  $TiB_2-xV_4C$ :  $x = 20$  (a), 30 (b), 40 (c), 50 (d) мас. %. Светлая фаза  $TiB_2$ , темная –  $V_4C$ .

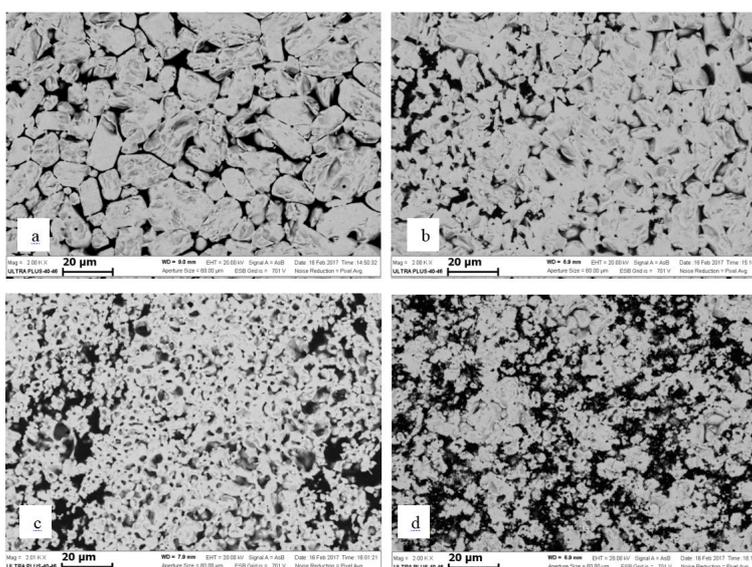


Рис. 2. Микроструктура керамических композитов  $ZrB_2-xV_4C$ :  $x = 5$  (a), 10 (b), 15 (c), 20 (d) мас. %. Светлая фаза –  $ZrB_2$ , темная –  $V_4C$

Для полученного керамического композита  $V_4C-TiB_2$  при содержании керамической связки ( $V_4C$ ) в композите 30–40%масс. достигается твердость по Виккерсу  $HV = 39,1-44,8$  ГПа и предел прочности при изгибе  $\sigma_{изг} = 140-210$  МПа.

Аналогичная картина наблюдается для композита  $V_4C-ZrB_2$ . Здесь при содержании связки  $V_4C$  менее 10%масс. формируется однородный керамический композит  $V_4C-ZrB_2$  с размером зерен  $ZrB_2$  10–20 мкм (рис. 2a, 2b). Увеличение содержания  $V_4C$  до 20%масс. приводит к уменьшению размера частиц  $ZrB_2$  до 2-5 мкм и формированию композита с неоднородной микроструктурой (рис. 2 c,d). При

содержании керамической связки ( $V_4C$ ) в композите 15%масс. достигается твердость по Виккерсу  $HV = 24,5$  ГПа.

В таблице 1 приведены обобщенные данные физико-механических характеристик СВС-композитов  $V_4C-TiB_2$  и  $V_4C-ZrB_2$  в зависимости от состава.

Таблица 1. Характеристики СВС-композитов  $V_4C-TiB_2$  и  $V_4C-ZrB_2$ , полученных с использованием химической печи.

Состав	$TiB_2-xV_4C$		$ZrB_2-xV_4C$
	$H_v$ , ГПа	$\sigma$ Прочность при изгибе, МПа	$H_v$ , ГПа
0,05	-	-	20,4
0,1	-	90	21,9
0,15			24,5
0,2	37,1	120	21
0,3	44,8	140	
0,4	39,1	210	

Методом СВС-компактирования получены композиты на основе системы  $V_4C-TiB_2$  и  $V_4C-ZrB_2$ , содержащие  $TiB_2$  и  $ZrB_2$  в качестве дисперсной фазы и  $V_4C$  в качестве керамической связки. Показано, что для эффективного прессования синтезированных композитов необходимо использовать дополнительный источник тепла в виде химической печи, обладающей высокой мощностью тепловыделения. Этот прием обеспечил необходимый тепловой режим для синтеза керамических композитов заданного фазового состава и плавления керамической связки. Высокое содержание жидкой фазы позволило получить керамические композиты  $V_4C-TiB_2$  с минимальной остаточной пористостью 1,5%, пределом прочности при изгибе 140–210 МПа и микротвердостью 37,1–44,8 ГПа и  $V_4C-ZrB_2$  с минимальной остаточной пористостью менее 1%, и микротвердостью 20,4–24,5 ГПа.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант № 16-08-00705).*