

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИТОВ TiB_2-CrV МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТЕПЛООВОГО ВЗРЫВА ПОД ДАВЛЕНИЕМ И ИХ СВОЙСТВА

А.В. Щербаков*, В.А. Щербаков, В.Ю. Баринов, И.Д. Ковалев, А.Ф. Беликова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук, Черноголовка, Россия

* ismandrew@ism.ac.ru

Диборид титана (TiB_2) обладает высокой температурой плавления, износостойкостью, твердостью и стабильностью свойств в широком температурном интервале. Эти свойства делают его перспективным материалом для создания изделий с высоким ресурсом работы при высокой температуре и в условиях абразивного износа. Недостатком материала является хрупкость, что ограничивает область его применения.

Актуальной задачей является получение высокопрочных керамических композитов, сохраняющих свою работоспособность при высоких температурах.

Настоящая работа посвящена синтезу керамических композитов на основе TiB_2-CrV методом электротеплового взрыва (ЭТВ) в условиях квазиизостатического сжатия. Методика эксперимента описана в [1, 2]. Особенностью метода является то, что исследуемый образец, спрессованный из смеси порошков титана, хрома и бора, нагревали прямым пропусканием электрического тока до температуры воспламенения, при которой происходит срыв теплового равновесия за счет выделения тепла от экзотермической реакции синтеза тугоплавких соединений TiB_2 и CrV и прессование горячего продукта.

Данный метод является оригинальным, так как в одну стадию позволяет осуществить синтез и консолидацию тугоплавких соединений. Высокая эффективность метода обусловлена сокращением промежуточных стадий синтеза и измельчением до микронного размера отдельных тугоплавких соединений. Принципиальная новизна метода заключается в том, что дополнительный электрический нагрев позволил обеспечить тепловой режим получения СВС-композитов с минимальной остаточной пористостью и высоким содержанием керамической связки.

Целью работы является исследование влияния электрического напряжения и состава реакционной смеси на параметры ЭТВ, микроструктуру и физико-механические характеристики композитов TiB_2-CrB .

На рисунке 1а представлены термограммы ЭТВ смеси, содержащей 30 % мас. (Cr+B) и полученные при давлении 96 МПа и электрических напряжениях U : 1 – 9,5 В; 2 – 7,4 В; 3 – 3,5 В. Видно, что ЭТВ включает стадии предвзрывного нагрева и теплового взрыва. Тепловой взрыв осуществляется при достижении температуры воспламенения, при которой происходит срыв теплового равновесия в системе. Экспериментальные результаты показали, что электрическое напряжение оказывает существенное влияние на параметры ЭТВ. Увеличение электрического напряжения от 3,5 В до 9,5 В приводит к уменьшению времени предвзрывного нагрева от 26,2 сек до 3,6 сек, уменьшению температуры воспламенения от 1000 К до 500 К и увеличению максимальной температуры ЭТВ от 2500 К до 3000 К. В этих условиях в продуктах ЭТВ TiB_2 находился в твердом ($T_{пл}=3500$ К), а CrB – в жидком состоянии ($T_{пл}=2400$ К).

На рисунке 1б представлены зависимости изменения относительного электрического сопротивления R образца от величины электрического напряжения U . В ходе ЭТВ на стадии предвзрывного разогрева действующее значение электрического напряжения остается постоянным, а электрическое сопротивление образца существенно уменьшается. Это связано с электроспеканием металлических частиц и увеличением поверхности контакта между реагентами [3].

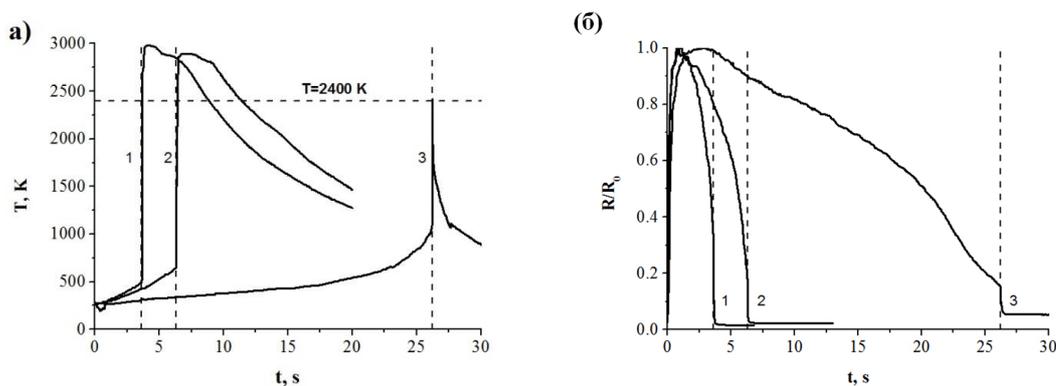


Рисунок 1. Временные зависимости температуры (а) и относительного электрического сопротивления (б) образца полученные при $P=96$ МПа и U : 1 – 9,5 В; 2 – 7,4 В; 3 – 3,5 В.

На рисунке 2а представлены термограммы ЭТВ различных составов, полученные при давлении 96 МПа и электрическом напряжении 11 В. Тепловой взрыв происходит при температуре воспламенения, когда скорость тепловыделения превышает скорость теплоотвода, что приводит к срыву теплового равновесия. При увеличении содержания в смеси доли (Cr+V) от 0,3 до 0,7 время воспламенения увеличивается от 3 сек до 3,5 сек, температура воспламенения возрастает от 510 К до 660 К, а максимальная температура ЭТВ уменьшается от 3000 К до 2600 К. Максимальная температура ЭТВ практически совпадает с адиабатической температурой горения, рассчитанной по программе «THERMO». Это связано с тем, что мощность химического источника тепловыделения значительно превышает мощность электрического источника. Поэтому, электрический источник нагрева не оказывает существенного влияния на максимальную температуру ЭТВ.

На рисунке 2б представлены зависимости изменения относительных электрических сопротивлений образцов различного состава. Экспериментальные кривые практически совпадают, что обусловлено одинаковым электрическим сопротивлением образцов. Несмотря на различный химический состав, смеси обладают практически равными электрическими сопротивлениями. Это связано с тем, что электропроводность образцов, спрессованных из смеси порошков, зависит от содержания металлических частиц. Поскольку в разных смесях суммарное содержание титана и хрома изменяется незначительно, то электрические сопротивления образцов практически не отличаются.

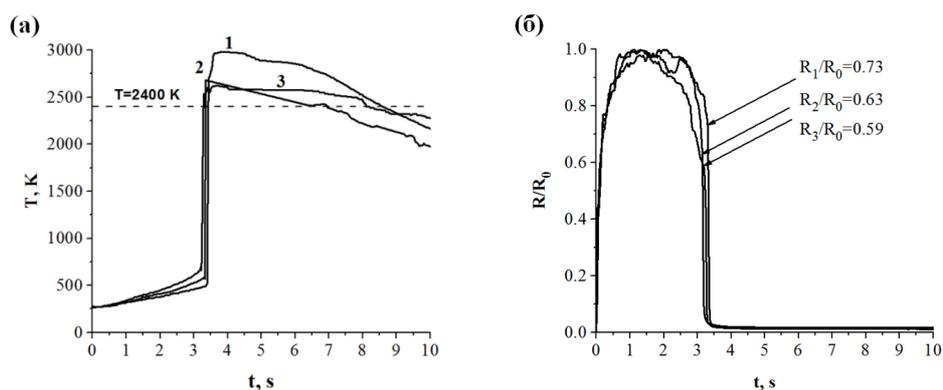


Рисунок 2. Временные зависимости температуры (а) и относительно электрического сопротивления (б) образца при ЭТВ смесей с содержанием (Cr+V) x : 1 – 0,3; 2 – 0,5; 3 – 0,7 при $P=96$ МПа и $U=11$ В.

Эксперименты показали, что на стадии предвзрывного нагрева относительное электрическое сопротивление исследуемого образца уменьшается. Это связано с формированием поверхности контакта между частицами под действием электрического напряжения [3]. При увеличении в смеси доли (Cr+V) от 0,3 до 0,7 к моменту воспламенения относительные значения электрических сопротивлений образцов уменьшаются на 27–41 % соответственно.

На стадии теплового взрыва происходит резкое изменение электрических параметров: электрическое сопротивление уменьшается, а электрический ток увеличивается. Это связано с тем, что при быстропротекающем экзотермическом взаимодействии резко увеличивается площадь контактной поверхности реагентов. Время экзотермического взаимодействия на стадии теплового взрыва составило 50 мс. Важно отметить, что совпадение по времени скачкообразного изменения температуры ЭТВ и силы электрического тока указывает на осуществление режима теплового взрыва. Электрические параметры после окончания экзотермического превращения практически не изменяются.

На рисунке 3 показаны микроструктуры СВС-композитов TiB_2 -CrV, полученных ЭТВ смесей с разным содержанием (Cr+V). Видно, что зерна TiB_2 (темная фаза), имеют шестигранную форму, характерную для фазы с гексагональной кристаллической структурой.

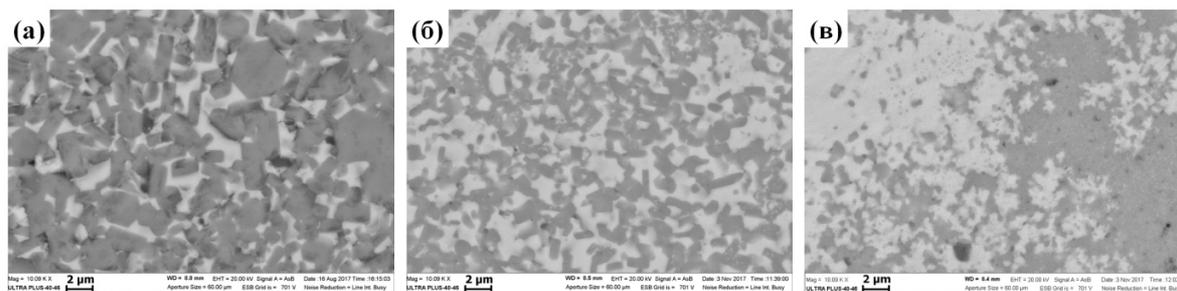


Рисунок 3. Микроструктуры СВС-композитов TiB_2 -CrV с содержанием CrV: а – 30 % мас.; б – 50 % мас.; в – 70 % мас., полученных при $P=96$ МПа и $U=11$ В.

Они равномерно распределены в связке из CrV (светлая фаза). Связка практически полностью заполнила поровое пространство, так как расплавленный моноборид хрома хорошо смачивает поверхность зерен диборида титана. При этом зерна диборида титана

частично образуют непрерывный каркас, что обуславливает высокую микротвердость композита. При увеличении доли связки от 30 до 70 % мас. размер зерен TiB_2 уменьшается от 2–4 мкм до 0,1–0,2 мкм.

Результаты измерения микротвердости композитов TiB_2 –30CrV по Виккерсу представлены в таблице 1. При увеличении электрического напряжения от 3,5 В до 9,5 В микротвердость композита увеличивается в два раза.

Таблица 1. Параметры ЭТВ и полученных керамических композитов TiB_2 –30CrV

Электрические параметры		Температура, К		Размер зерна TiB_2 , мкм	Микротвердость по Виккерсу, кг/мм ²
U , В	I , кА	T_{ig}	T_m		
3,5	0,5	1070	2420	0,5–1	1500–1700
7,4	1,2	650	2890	1–2	2100–2500
9,5	2,0	500	2980	2–3	2700–3100

Величина электрического напряжения оказывает влияние на размер синтезируемых дисперсных частиц. Изменение размера частиц обусловлено температурой ЭТВ. При увеличении электрического напряжения плотность композита повышается практически до нулевой пористости, а микроструктура становится гомогенной.

Измерение микротвердости СВС-композитов по Виккерсу показали, что при содержании CrV 30 % мас. значение микротвердости композита составляет 3150 кг/мм², а при CrV 70 % мас. – 2200 кг/мм².

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 17-58-04081 Бел_мол_а).

Работа выполнена при участии РЦКП ИСМАН.

Литература

- [1] В.А. Щербаков, В.Т. Телера, А.В. Щербаков. Композиты и наноструктуры, 8 (2016) 70–80.
- [2] А.В. Щербаков, В.Ю. Баринев, А.С. Щукин, И.Д. Ковалев, В.А. Щербаков, Т.Д. Маликина, А.И. Альхименок. Фундаментальные исследования, 11-2, (2017) 344–349.

- [3] X. Liu, X. Song, J. Zhang. International Journal of Computer Aided Engineering and Technology, 1, (2008) 94–104.
- [4] В.А. Щербаков, А.Н. Грядунов, Н.В. Сачкова, А.В. Самохин. Письма о материалах, 5, (2015) 20–23.