

# ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИТОВ $TiB_2-CrB$ 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](mailto: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  $TiB_2-CrB$  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  $CrB$  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 рис. 1а представлены термограммы ЭТВ смеси, содержащей 30 % мас. (Cr+B) и полученные при давлении 96 МПа и электрических напряжениях  $U$  (В): 1) 9,5; 2) 7,4; 3) 3,5. 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 до 9,5 В приводит к уменьшению времени предвзрывного нагрева от 26,2 до 3,6 секунд, уменьшению температуры воспламенения от 1000 до 500 К и увеличению максимальной температуры ЭТВ от 2500 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 рис. 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 постоянно, а электрическое сопротивление образца существенно уменьшается. Это связано с электроспеканием металлических частиц и увеличением поверхности контакта между реагентами [3].

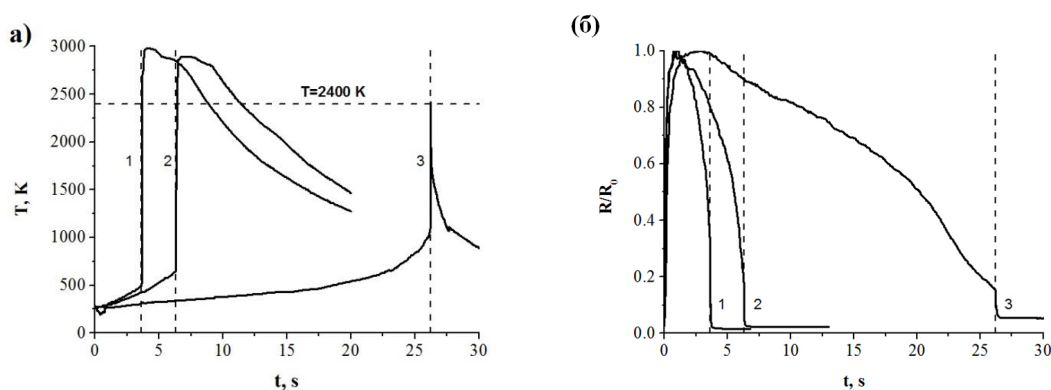


Рис. 1. Временные зависимости температуры (а) и относительного электрического сопротивления (б) образца полученные при  $P=96$  МПа и  $U$  (В): 1) 9,5; 2) 7,4; 3) 3,5.

На рис. 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 до 3,5 секунд, 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 рис. 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.

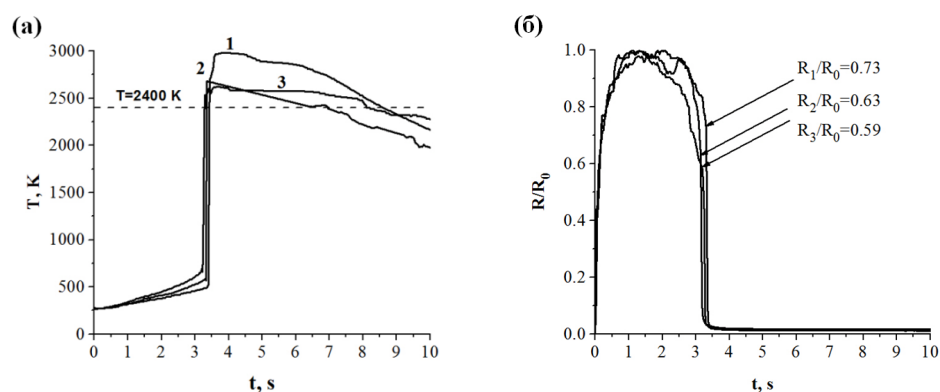


Рис. 2. Временные зависимости температуры (а) и относительно электрического сопротивления (б) образца при ЭТВ смесей с содержанием (Cr+V)  $x$ :

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 рис. 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. 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.

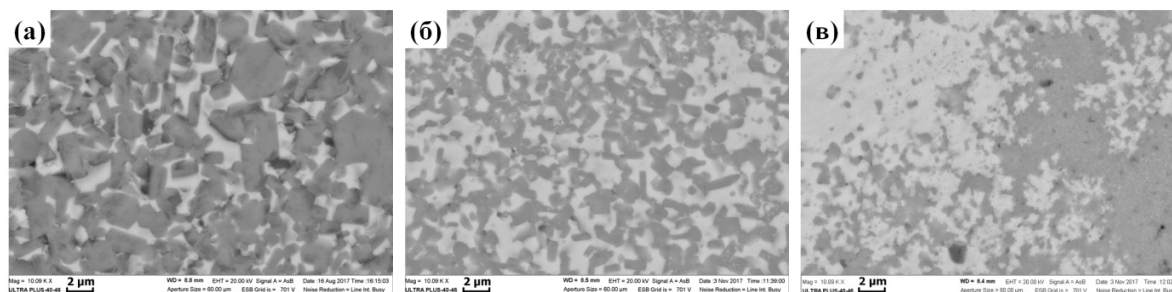


Рис. 3. Микроструктуры СВС-композитов  $TiB_2$ -CrV (а, б, в – шлиф)

с содержанием CrB: а) 30; б) 50; в) 70 % мас., полученных при  $P=96$  МПа и  $U=11$  В.

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

Таблица 1. Параметры ЭТВ и полученных керамических композитов  $TiB_2-30CrB$

Электрические параметры		Температура, К		Размер зерна $TiB_2$ , мкм	Микротвердость по Виккерсу, кг/мм <sup>2</sup>
$U$ , 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 CrB 30 % мас. значение микротвердости композита составляет 3150 кг/мм<sup>2</sup>, а при CrB 70 % мас. – 2200 кг/мм<sup>2</sup>.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 17-58-04081 Бел\_мол\_а).

Работа выполнена при участии РЦКП ИСМАН.

#### Литература

1. Щербаков В.А., Телпа В.Т., Щербаков А.В. Получение композитных материалов на основе плавленного карбида титана методом электротеплового взрыва под давлением // Композиты и наноструктуры. 2016. Т. 8. № 1. С. 70–80.
2. Щербаков А.В., Баринов В.Ю., Щукин А.С., Ковалев И.Д., Щербаков В.А., Маликина Т.Д., Альхименок А.И. Синтез композита  $TiB_2-30CrB$  методом электротеплового взрыва под давлением // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 11-2. – С. 344–349.

3. Liu X., Song X., Zhang J. Current distribution and neck growth during spark plasma sintering conductive powder // International Journal of Computer Aided Engineering and Technology. – 2008. – Т. 1. – №. 1. – С. 94–104.
4. Щербаков В.А., Грядунов А.Н., Сачкова Н.В., Самохин А.В. СВС-компактирование керамических композитов на основе боридов титана и хрома // Письма о материалах. 2015. Т. 5. № 1. С. 20-23.