

УДК 669.018.25.017

## ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ ПРИ ВЗРЫВНОМ ПРЕССОВАНИИ

© 2020 г. А. В. Крохалев<sup>1</sup>, В. О. Харламов<sup>1,\*</sup>, С. В. Кузьмин<sup>1</sup>, академик РАН В. И. Лысак<sup>1</sup>

Поступило 08.06.2020 г.

После доработки 09.08.2020 г.

Принято к публикации 03.09.2020 г.

Исследована возможность получения композиционных порошковых материалов системы SiC–Ti методом взрывного прессования без последующего спекания. Установлено, что в этих условиях уплотнение порошковых смесей SiC и Ti происходит за счет межчастичного перемещения и деформации частиц карбидной фазы. Показано, что основным условием консолидации является разогрев исходной порошковой смеси за счет ударно-волнового сжатия до температур, превышающих 780°C.

*Ключевые слова:* карбид кремния, титан, прессование порошков взрывом

**DOI:** 10.31857/S2686953520050088

Уникальное сочетание механических и физико-химических свойств карбида кремния обуславливает широкое применение материалов на его основе в различных отраслях промышленности. Существует множество методов получения подобных материалов [1], каждый из которых обеспечивает определенные преимущества, но вместе с тем не лишен тех или иных недостатков. В связи с этим изучение возможности применения метода взрывного прессования для получения материалов на основе SiC [2, 3], является актуальной задачей как с научной, так и с практической точек зрения.

При проведении исследований в качестве металлической связки карбидокремниевый материал использовали титан, хорошо зарекомендовавший себя при получении взрывом порошковых твердых сплавов на основе карбида хрома Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> [2]. Взрывное прессование осуществлялось путем нагружения слоя исходной смеси порошков SiC и Ti на поверхности массивной стальной подложки плоской нормально падающей детонационной волной через стальную промежуточную прокладку, отделяющую продукты взрыва от порошка [2]. Изменение высоты заряда взрывчатого вещества обеспечивало варьирование температуры разогрева порошковой смеси в процессе ударно-волнового сжатия в пределах от 700 до 840°C и давления – в пределах от 11.5 до 16.5 ГПа. Дли-

тельность импульса максимального давления при этом составляла 0.3 мкс.

Исследования показали, что при взрывном прессовании смесей порошка карбида кремния с порошком титана, несмотря на существенный уровень температур разогрева при ударно-волновом сжатии, удается избежать возможного [4] химического взаимодействия между ними (рис. 1).

При использовании режимов нагружения, обеспечивающих разогрев порошковых смесей до температуры, превышающей 780°C, формируется монолитная структура, в которой частицы титана (рис. 2а) сохраняют свои размеры и образуют обособленные включения в непрерывной матрице из карбида кремния (рис. 2б).

Частицы SiC, имевшие первоначально осколочную форму (рис. 2в), оказываются существенно продеформированными, что обеспечивает формирование плотного контакта между ними (рис. 2г). Воздух, содержащийся в исходной порошковой смеси, вытесняется ударной волной из объема прессовки и сохраняется лишь в виде отдельных микропор на границе между частицами SiC (рис. 2г).

Необычное (по сравнению с материалами системы Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–Ti, в которых непрерывную матрицу образует металлическая связка [2]) поведение компонентов порошковых смесей SiC с Ti при взрывном прессовании связано, по-видимому, с аномально высокой скоростью звука в карбиде кремния, и, соответственно, более высокой скоростью распространения волн сжатия по каркасу из частиц SiC, чем по частицам Ti.

<sup>1</sup> Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

\*E-mail: harlamov\_yo@mail.ru

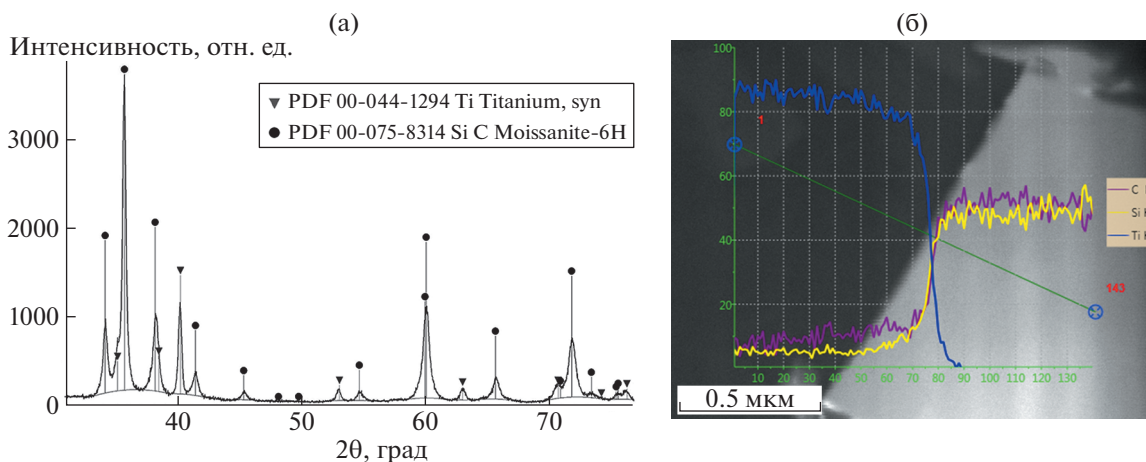


Рис. 1. Фазовый состав (а) и распределение элементов между фазами в материале SiC–Ti, полученном взрывом (б).

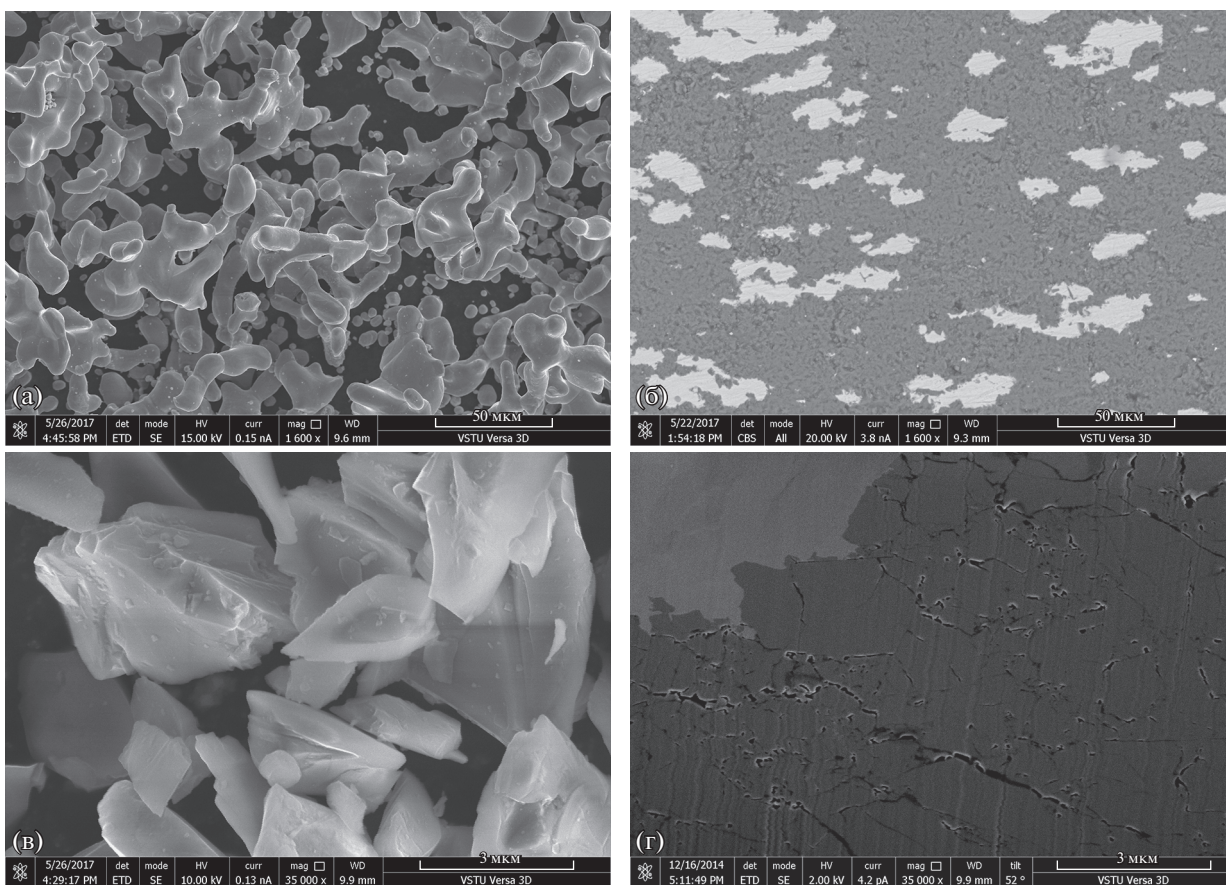
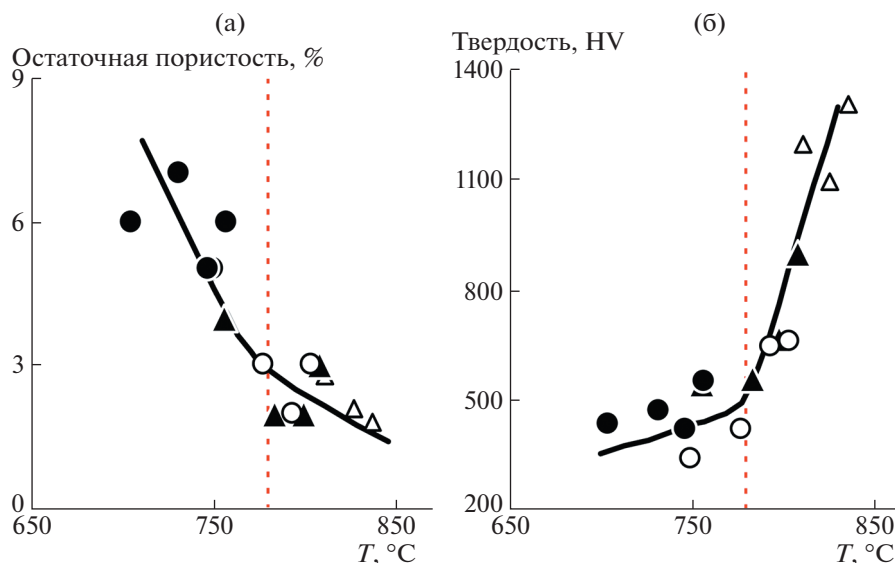


Рис. 2. Вид частиц исходных порошков титана (а) и карбида кремния (в) и микроструктура материалов SiC–Ti, полученных взрывом (б, г).

В процессе консолидации материалов системы SiC–Ti при взрывном нагружении их плотность приближается к плотности монолита (рис. 3а), а твердость начинает существенно расти и достигает значений, превышающих 1300 HV (рис. 3б),

лишь на режимах нагружения, обеспечивающих разогрев порошковых смесей до температур, превышающих  $780^\circ\text{C}$ , что соответствует  $0.35 T_{пл}$  SiC и является нижней границей начала перехода керамических и полупроводниковых фаз, к числу ко-



**Рис. 3.** Влияние температуры разогрева порошка при взрывном прессовании на остаточную пористость (а) и твердость (б) порошковых материалов SiC–Ti с различным содержанием связки (об. %):  $\Delta$  – 20,  $\blacktriangle$  – 30,  $\circ$  – 40 и  $\bullet$  – 50; -----  $0.35 T_{пл}$  SiC.

торых может быть отнесен карбид кремния, в пластичное состояние. Данный факт указывает на ведущую роль деформации карбидных частиц как в процессе уплотнения исходных порошковых смесей, так и при формировании прочных границ раздела между их компонентами.

Полученные данные позволяют сделать вывод, что использование взрывного нагружения порошков для получения материалов на основе карбида кремния является перспективным и позволяет осуществить процесс их консолидации на стадии прессования без последующего спекания.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 18-19-00518.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеев О.А., Беляев А.Е., Болтовец Н.С. и др. Карбид кремния: технология, свойства, применение / под общ. ред. Беляева А.Е. и Конаковой Р.В. Харьков: ИСМА, 2010. 532 с.
2. Лысак В.И., Крохалев А.В., Кузьмин С.В., Розозин В.Д., Каунов А.М. Прессование порошков взрывом. Москва: Машиностроение, 2015. 252 с.
3. Pruemmer R.A., Balakrishna Blat T., Kumar Siva K., Hokamoto K. Explosive Compaction of Powders and Composites. Science Publishers, 2006. 194 p.
4. Liu G., Zhang X., Yang J., Qiao G. Recent advances in joining of SiC-based materials (monolithic SiC and SiCf/SiC composites): Joining processes, joint strength, and interfacial behavior // J. Adv. Ceram. 2019. V. 8. № 1. P. 19–38.

## FORMATION OF THE STRUCTURE OF POWDERED MATERIALS BASED ON SILICON CARBIDE DURING EXPLOSIVE PRESSING

A. V. Krokhaliev<sup>a</sup>, V. O. Kharlamov<sup>a,#</sup>, S. V. Kuz'min<sup>a</sup>, and Academician of the RAS V. I. Lysak<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

<sup>#</sup>E-mail: kharlamov\_vo@mail.ru

The paper presents the possibility of obtaining composite powder materials of the SiC–Ti system by explosive pressing without subsequent sintering. It was found that under these conditions, the compaction of SiC and Ti powder mixtures occurs due to interparticle movement and deformation of the carbide phase particles. It is shown that the main condition for consolidation is the heating of the initial powder mixture due to shock-wave compression to temperatures exceeding 780°C.

**Keywords:** silicon carbide, titanium, powder compression by explosion