А. В. Крохалев, В. О. Харламов, М. А. Тупицын, Е. А. Косова, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА УПЛОТНЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ
НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ ПРИ ВЗРЫВНОМ ПРЕССОВАНИИ***

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: weld@vstu.ru

Исследованы влияние содержания металлической связки и параметров ударно-волнового сжатия на уплотнение порошковых смесей SiC-Ti при взрывном нагружении, микроструктура полученных материалов; выявлены преобладающие механизмы уплотнения порошковых смесей карбида кремния с титаном при взрывном прессовании.

Ключевые слова: порошковая смесь, карбид кремния, титан, взрывное прессование, уплотнение, остаточная пористость, фазовый состав, микроструктура прессовок.

A. V. Krokhalev, V. O. Kharlamov, M. A. Tupitsyn, E. A. Kosova, S. V. Kuzmin, V. I. Lysak

**RESEARCH OF THE MECHANISM OF SEALING POWDER MIXTURES
BASED ON SILICON CARBIDE IN EXPLOSIVE PRESSING**

Volgograd State Technical University

The effects of the metal binder content and parameters of shock-wave compression on the compaction of SiC-Ti powder mixtures under explosive loading were investigated; microstructure of the obtained materials; The prevailing mechanisms of compaction of powder mixtures of silicon carbide with titanium during explosive pressing are revealed.

Keywords: powder mixture, silicon carbide, titanium, explosive pressing, compaction, residual porosity, phase composition, microstructure of compacts.

В настоящее время изделия из карбида кремния широко используют в разных отраслях промышленности. Уникальные свойства изделий из SiC делают их перспективными для изготовления деталей двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных двигателей, абразивного инструмента, керамических подшипников, форсунок и горелок, оснастки для обжи-

га керамических изделий, химически стойких деталей, работающих в агрессивной среде, нагревателей для высокотемпературных печей, броневых плит и т. д.

В зависимости от способа получения и, соответственно, уровня достигаемых служебных характеристик принято различать следующие группы карбидокремниевых материалов: а) по-

ристые – керамически-связанный карбид кремния (CSiC), рекристаллизованный карбид кремния (RSiC), реакционно-связанный карбид кремния (RBSiC); б) высокоплотные – силицированный (реакционно-спеченный) карбид кремния (SiSiC), твердофазно-спеченный карбид кремния (SSiC), жидкофазно-спеченный карбид кремния (LPSSiC), горяче-прессованный (HPSiC) и горяче изостатически прессованный карбид кремния (HIPSiC) [1].

Каждый из перечисленных материалов (так же, как и используемый для его получения метод) обеспечивает определенные преимущества, но вместе с тем не лишен тех или иных недостатков. В связи с этим изучены возможности применения для получения материалов на основе SiC еще одного метода – метода взрывного прессования [2, 3], обеспечивающего возможность консолидации порошкового материала на стадии прессования [2]. Особый интерес к данному методу связан прежде всего с тем, что он позволяет исключить спекание из технологического цикла получения заготовок деталей и использовать нетрадиционные связки (такие, как титан), что в ряде случаев существенно улучшает служебные (например, триботехнические [4–5]) характеристики получаемых материалов.

Успешная реализация принципиальных возможностей взрывного получения карбидок-

ремниевых материалов зависит прежде всего от успешного уплотнения их компонентов, а также от сохранения их исходного фазового состава, который может измениться за счет химического взаимодействия в процессе ударно-волнового сжатия или в ходе последующего охлаждения.

В этой связи целью настоящей работы было изучение уплотнения, структуры и распределения химических элементов между составляющими твердых сплавов системы SiC-Ti, полученных взрывом, и выявление преобладающих факторов, определяющих возможность достижения их практически беспористого состояния на стадии прессования.

В качестве объекта исследования были использованы порошковые смеси карбида кремния SiC с титановой связкой. Содержание связки было принято равным 26, 37, 48 и 58 % по весу, что обеспечивало 20, 30, 40 и 50 % ее объемного содержания.

Для проведения взрывной обработки применялась схема (рис. 1), предусматривающая размещение исходной смеси порошков SiC и Ti непосредственно на поверхности стальной подложки и ее нагружение плоской нормально падающей детонационной волной через промежуточную прокладку, отделяющую продукты детонации от порошка [2].

Рис. 1. Схема нагружения порошковых смесей SiC+Ti взрывом (а) и внешний вид образцов, полученных взрывным прессованием (б)

Расчет параметров сжатия проводился методом (Р, u)-диаграмм, основанном на поэтапном определении характеристик падающих и отраженных волн путем анализа пересечений ударных адиабат прокладки, порошка, основания и продуктов детонации в координатах

«давление – массовая скорость» [6]. Выбор технологических параметров нагружения обеспечивал варьирование температуры разогрева порошковой смеси в процессе ударно-волнового сжатия в пределах от 700 до 840 °С и давления в пределах от 11,5 до 16,5 ГПа за счет из-

менения высоты заряда взрывчатого вещества.

Исследование структуры и химического состава фаз проводили методами оптической и растровой электронной микроскопии с помощью металлографического микроскопа Carl Zeiss Axiovert 40MAT и растрового электронного микроскопа FEI Versa 3D LoVac с интегрированной системой фокусированного ионного пучка для изготовления фольги и системой микрорентгеноспектрального энергодисперсионного анализа EDAX Apollo X. Для проведения рентгеноструктурного фазового анализа использовали дифрактометр Bruker D8 Advan-

се. В качестве характеристики качества уплотнения порошковых материалов рассматривали значение их остаточной пористости, величину которой определяли на нетравленных шлифах с применением программного продукта ImageJ v1.52.

Исследования показали, что при взрывном прессовании смесей порошка карбида кремния с порошком титана, несмотря на существенный уровень температур разогрева при ударно-волновом сжатии, удастся избежать возможного [7] химического взаимодействия между ними (рис. 2).

a

б

Рис. 2. Фазовый состав (*a*) и распределение элементов между фазами в материале SiC-Ti, полученном взрывом (*б*)

Значение пористости полученных материалов в зависимости от содержания связки и параметров нагружения изменяется в достаточно широких пределах (рис. 3).

a

б

Рис. 3. Варианты уплотнения материалов SiC-Ti в процессе взрывного прессования: *a* – максимальное содержание пор; *б* – практически беспористое состояние

При этом увеличение давления ударно-волнового сжатия ведет к уменьшению порис-

тости каждого из исследованных составов смеси. Однако, в отличие от хорошо изученных

материалов системы $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ti}$ [2], лучшее уплотнение наблюдается при низком содержании металлической связки, т. е. увеличение содержания в исходной порошковой смеси карбидной составляющей, имеющей высокие значения твердости, не ухудшает, а, наоборот, улучшает ее прессуемость (рис. 4).

Рис. 4. Зависимость остаточной пористости P композиционных материалов на основе SiC с различным содержанием Ti от максимального давления сжатия P при ударно-волновой обработке

Можно назвать как минимум две причины обнаруженного феномена.

а

б

Рис. 5. Модель механизма уплотнения (а) композиционных материалов на основе SiC с различным содержанием Ti и зависимость остаточной пористости P от максимального давления P ударно-волнового сжатия, исходной пористости P_0 и содержания карбида кремния [SiC] (б)

Выявление второй причины также базируется на результатах исследования структуры полученных материалов, которое показывает, что частицы SiC в составе карбидокремниевой

Первая естественным образом вытекает из изучения структуры прессовок. Как видно из рис. 3, б, при использовании карбида кремния после прессования частицы титана сохраняют свою форму и образуют обособленные включения в непрерывной матрице из SiC. При этом необычное (по сравнению с материалами системы $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ti}$, 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. В результате частицы карбида кремния первыми приходят в движение и перемещаются в поры исходной порошковой смеси (рис. 5, а), обеспечивая уплотнение материала, тем более сильное, чем больше в объеме смеси SiC и исходных пор.

В пользу данного предположения свидетельствует тот факт, что в координатах « $P - P^*(P_0^*[\text{SiC}])$ » (где $P_0^*[\text{SiC}]$ – величина, прямо пропорциональная вероятности того, что в исходной смеси порошков поверхность частиц SiC окажется свободной и получит возможность для движения) экспериментальные данные ложатся на одну кривую (рис. 5, б).

матрицы оказываются существенно деформированными, что обеспечивает формирование плотного контакта между ними (рис. 6).

Рис. 6. Микроструктура карбидокремниевой матрицы в материале SiC-Ti, полученном взрывом

Деформация карбида кремния требует разогрева до температур, превышающих 780 °С, что соответствует 0,35 $T_{пл}$. SiC и является нижней границей начала перехода керамических и полупроводниковых фаз, к числу которых может быть отнесен SiC, в пластичное состояние [8]. Анализ реализуемых в опытах условий сжатия (рис. 7) показывает, однако, что необходимая температура создается далеко не всегда и с увеличением содержания титановой связки в исходной смеси порошком вероятность ее достижения, а следовательно, и степень возможного уплотнения снижаются.

Рис. 7. Давление ударно-волнового сжатия P и температура разогрева в ударных волнах T порошковых смесей SiC-Ti при взрывном прессовании

Выводы

1. При взрывном компактировании смесей порошков SiC и Ti, содержащих от 20 до 50 об.% металлической связки степень их уплотнения возрастает с увеличением содержания в составе порошковой смеси карбидной фазы и температуры разогрева порошка при ударно-волновом сжатии. При этом без спекания может быть достигнуто практически беспористое состояние материала.

2. На режимах нагружения, достаточных для предельного уплотнения порошковых смесей SiC и Ti, удается сохранить их двухфазное исходное состояние.

3. Структура полученных материалов представляет собой карбидокремниевую матрицу, содержащую включения титана.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Riedel, R. Handbook of ceramic hard materials / R. Riedel // 1st ed. Weinheim: Wiley-VCH. 2000. V. 2. P. 683–748.
2. Прессование порошков взрывом / В. И. Лысак, А. В. Крохалев, С. В. Кузьмин, В. Д. Рогозин, А. М. Каунов. – М. : Машиностроение, 2015. – 252 с.
3. R. A. Pruemmer, T. Balakrishna Blat, K. Siva Kumar, K. Hokamoto. Explosive Compaction of Powders and Composites. Science Publishers, 2006: 194 pp.
4. Оптимизация составов порошковых твердых сплавов, используемых в подшипниках скольжения, смазываемых водой / А. В. Крохалев, О. А. Авдеюк, К. В. Приходьков, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Вестник машиностроения. – 2013. – № 5. – С. 42–44.
5. Исследование триботехнических свойств материалов для подшипников скольжения / А. В. Крохалев, О. А. Авдеюк, К. В. Приходьков, А. Н. Савкин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79. – № 9. – С. 68–70.
6. Компьютерный расчет параметров сжатия при нанесении порошковых покрытий взрывом / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 4 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – Т. 5. – С. 110–116.
7. Guiwu Liu, Xiangzhao Zhang, Jian Yang, Gunjun QIAO. Recent advances in joining of SiC-based materials (monolithic SiC and SiCf/SiC composites): Joining processes, joint strength, and interfacial behavior. Journal of Advanced Ceramics, 2019, 8(1): p. 19–38.
8. Красулин, Ю. Л. Микросварка давлением / Ю. Л. Красулин, Г. З. Назаров. – М. : Металлургия, 1976. – 160 с.