УДК 621.762.4.04

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-4-251-42-47

*А. В. Крохалев, В. О. Харламов, Д. Р. Черников, Е. А. Косова, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак***ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА УПЛОТНЕНИЯ СМЕСЕЙ ПОРОШКОВ
ТУГОПЛАВКИХ КАРБИДОВ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СВЯЗКОЙ
ПРИ ВЗРЫВНОМ ПРЕССОВАНИИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ*****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: weld@vstu.ru

Приведены результаты исследований особенностей поведения компонентов смесей порошков тугоплавких карбидов с металлами при взрывном прессовании. Показано, что основным фактором, определяющим уплотнение смесей, является динамическое затекание одной из фазовых составляющих смеси в исходные поры порошка. В качестве фазовой составляющей смеси, перемещение которой лимитирует степень уплотнения и ведет к образованию непрерывной матрицы в структуре спрессованного взрывом материала, может выступать как металлическая связка, так и карбидная составляющая материала.

Ключевые слова: твердый сплав, взрывное прессование, карбид кремния, карбид титана, карбид хрома, титан, медь, никель.

*A. V. Krokhalev, V. O. Kharlamov, D. R. Chernikov, E. A. Kosova, S. V. Kuzmin, V. I. Lysak***RESEARCH OF THE MECHANISM OF COMPACTION
OF MIXTURES OF POWDERS OF REFRACTORY CARBIDES WITH
A METALLIC BOND IN EXPLOSIVE PRESSING ON A METAL SUBSTRATE****Volgograd State Technical University**

The results of investigations of the features of the behavior of the components of mixtures of refractory carbide powders with metals during explosive pressing are presented. It is shown that the main factor determining the compaction of mixtures is the dynamic flow of one of the phase components of the mixture into the initial pores of the powder. As the phase component of the mixture, the movement of which limits the degree of compaction and leads to the formation of a continuous matrix in the structure of the material pressed by the explosion, both the metal binder and the carbide component of the material can act.

Keywords: hard alloy, explosive pressing, silicon carbide, titanium carbide, chromium carbide, titanium, copper, nickel.

Традиционно твердые сплавы получают путем прессования исходных смесей порошков карбидов тугоплавких металлов и металлической связки с последующим спеканием [1, 2]. В последние десятилетия появилось, однако, достаточно большое количество работ, посвященных изучению возможности получения подобных материалов путем взрывного прессования порошков [3–9], применение которого позволяет в ряде случаев отказаться от спекания и существенно расширить список возможных сочетаний используемых при этом компонентов [7–9].

Необходимым условием получения твердых сплавов взрывным (как, впрочем, и любым другим) методом является уплотнение исходной порошковой смеси до плотности, близкой к плотности соответствующего монолитного материала. Многочисленные исследования взрывного прессования порошков [10–15], показывают, что за счет высокого уровня давле-

ний, реализуемых при ударно-волновом сжатии, на пути решения этой задачи принципиальных препятствий не существует. Однако, при использовании порошковых смесей, содержащих в своем составе карбиды тугоплавких металлов и металлическую связку, достижение практически беспористого состояния оказывается возможным далеко не всегда [9] и требует соблюдения некоторых условий, базирующихся на понимании механизма их уплотнения в ударных волнах.

В работе [14] на примере порошковых смесей карбида хрома с медной, никелевой и титановой связкой показано, что основным фактором, определяющим уплотнение порошковых смесей, содержащих в своем составе частицы тугоплавких карбидов и металлической связки, является динамическое затекание связки в промежутки между карбидными частицами. При этом степень уплотнения смесей порошков оп-

© Крохалев А. В., Харламов В. О., Черников Д. Р., Косова Е. А., Кузьмин С. В., Лысак В. И., 2021.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 18-19-00518.

ределяется возможностью выхода ударных волн в частицах металлической связки на их свободные от контактов с другими частицами поверхности и массовой скоростью, приобретаемой связкой на этих поверхностях за счет разгрузки (рис. 1).

Рис. 1. Основные направления массопереноса при взрывном уплотнении смесей порошков [14]: 1 – карбидные частицы; 2 – частица металлической связки

Основываясь на подобных представлениях, был предложен [14] феноменологический критерий ударной прессуемости порошковых смесей тугоплавких карбидов с различным типом и содержанием металлической связки:

$$\frac{[Me] \cdot P_0}{c \cdot \rho},$$

где $[Me]$ – объемная доля металлической связки в твердой фазе исходной смеси порошков; P_0 – объемная доля пор в исходной порошковой смеси; c – скорость звука в металле связки; ρ – плотность металла связки.

Значение данного критерия определяет остаточную пористость прессовок на основе выбранного карбида в одинаковых (прежде всего по уровню реализуемого давления ударно-волнового сжатия) условиях взрывного нагружения.

Однако до настоящего времени остается открытым вопрос о применимости описанных представлений и возможности использования предложенного критерия уплотняемости для материалов с другим исходным фазовым составом.

Для поиска ответа на этот вопрос была поставлена серия экспериментов по взрывному прессованию порошковых смесей карбида кремния SiC и карбида титана TiC с титановой металлической связкой. Весовое содержание металлической связки в порошковой смеси подбиралось таким образом, чтобы обеспечить одинаковое объемное содержание карбидной фазы, равное 80, 70, 60 и 50 % (одинаковое объемное содержание связки, равное 20, 30, 40 и 50 % соответственно).

Взрывное прессование осуществлялось с использованием схемы нагружения [7], предусматривающей размещение исходной смеси порошков на поверхности стального основания и ее нагружение плоской нормально падающей детонационной волной через промежуточную прокладку, отделяющую продукты детонации от порошка (рис. 2).

Рис. 2. Схема взрывного нагружения порошковых материалов: 1 – детонирующий шнур; 2 – контейнер с ВВ; 3 – промежуточная пластина; 4 – прессуемый порошок; 5 – стальная подложка; 6 – грунт; 7 – ЭД; H – высота заряда ВВ; δ – толщина прокладки; h – слой порошка; δ_0 – толщина подложки

В качестве взрывчатого вещества (ВВ) использовался аммонит № 6ЖВ, высота заряда

варьировалась в пределах от 70 до 160 мм. Толщина слоя порошка составляла $h = 3$ мм,

толщина стальной промежуточной прокладки – $\delta = 1,0$ мм, толщина стальной подложки – $\delta_0 = 10$ мм. Использование стальной подложки обеспечивало повышение давления прессования за счет отражения падающей ударной волны в порошке от поверхности подложки.

Расчет физических параметров сжатия, реализуемых в опытах, производился методом (P, u) – диаграмм, основанном на поэтапном определении давления и массовой скорости в падающей и отраженных ударных волнах путем анализа пересечений ударных адиабат прокладки, порошка, основания и продуктов детонации [15]. При этом для построения адиабат металлических основания и промежуточной прокладки использовали акустическое приближение:

$$P = \rho_0 c_0 u,$$

где P и u – давление и массовая скорость вещества за фронтом ударной волны; ρ_0 и c_0 – плотность и скорость объемных звуковых волн для металлов прокладки или подложки при нормальных условиях.

Ударную адиабату порошковых смесей строили, исходя из допущения о равенстве плотности ударно-сжатого порошка плотности соответствующего монолитного материала:

$$P = \rho_0 \frac{u^2}{1 - \frac{\rho_k}{\rho_0}},$$

где ρ_0 – исходная плотность порошковой смеси и ρ_k – расчетная по составу порошка плотность соответствующего монолитного материала.

Ударную адиабату продуктов детонации рассчитывали для соответствующих моментов времени по формуле, выведенной с использованием известного решения о набегании детонационной волны на абсолютно жесткую стенку:

$$P = \frac{64}{27} P_H \left(\frac{h}{D\tau} - \frac{u}{D} \right)^3,$$

где P_H – давление продуктов взрыва в плоскости Чепмена-Жуге; h – высота заряда взрывчатого вещества; D – скорость детонации; τ – время, отсчитываемое от момента инициирования детонации на свободной поверхности заряда.

Для металлографических исследований исходных порошков и полученных взрывным нагружением прессовок использовали оптический микроскоп Carl Zeiss Axiovert 40MAT и многофункциональный растровый электронный микроскоп Versa 3D. Величину остаточной пористости образцов определяли на нетравленных шлифах с применением программного пакета ImageJ (v1.52).

Рис. 3. Вид частиц исходных порошков карбида кремния (а), карбида титана (б) и титана (в)

Исследование используемых для взрывного прессования порошков показало, что частицы порошка SiC имели осколочную форму (рис. 3, *а*), а частицы TiC – округлую кристаллическую (рис. 3, *б*). В обоих случаях размер частиц составлял 1...5 мкм, что соответствует, в частности, размеру зерна в таких известных крупно-зернистых твердых сплавах, как ВК4-В, ВК8-В. Частицы порошка титана имели на порядок больший размер (до 70 мкм) и неправильную округлую форму (рис. 3, *в*).

Несмотря на эти отличия, после ударно-волновой обработки структура полученных порошковых материалов оказывается достаточно близкой: в ней четко различимы конгломераты частиц карбидной фазы, между которыми располагаются металлическая связка и отдельные поры (рис. 4, *а*, *б*). Примечательным является то, что частицы титана при этом сохраняют свои размеры и образуют обособленные включения в непрерывной матрице из карбидной фазы. Это указывает на тот факт, что превалирующим механизмом уплотнения порошковых смесей SiC и TiC с Ti при взрывном прессовании является перемещение в исходные поры смеси ее карбидной составляющей, а не титановой связки.

Необычное (по сравнению с материалами системы Cr₃C₂-Ti, в которых (рис. 4, *в*) непрерывную матрицу образует металлическая связка [14]) поведение компонентов порошковых смесей карбида кремния и карбида титана с Ti при взрывном прессовании является не вполне понятным и возможно связано с меньшим удельным весом (плотностью) SiC и TiC по сравнению с Cr₃C₂.

В свете изложенного становится очевидным, что предложенный в работе [14] феноменологический критерий уплотняемости порошковых смесей карбидов с металлами при взрывном прессовании должен быть модифицирован к виду

$$\frac{[V_1] \cdot P_0}{c_1 \cdot \rho_1},$$

где $[V_1]$ – объемная доля составляющей порошковой смеси, обеспечивающей заполнение исходных пор порошка и образующей непрерывную матрицу материала; P_0 – объемная доля пор в исходной порошковой смеси; c_1 – скорость звука в материале составляющей порошковой смеси, обеспечивающей заполнение исходных пор порошка; ρ_1 – плотность этой составляющей.

а

б

в

Рис. 4. Микроструктура порошковых материалов на основе карбида кремния (*а*), карбида титана (*б*) и карбида хрома (*в*)

Принятие данной гипотезы позволяет объединить (рис. 5) данные по пористости спрессованных взрывом порошковых материалов систем SiC-Ti и TiC-Ti, полученные при проведе-

нии данного исследования, и данные по пористости материалов Cr_3C_2 -Ti, Cr_3C_2 -Ni и Cr_3C_2 -Cu, полученные ранее [14].

Рис. 5. Результаты уплотнения порошковых смесей тугоплавких карбидов с металлами при взрывном прессовании

Выводы

1. Установлено, что основным фактором, определяющим уплотнение порошковых смесей, содержащих в своем составе частицы тугоплавких карбидов и металлической связки, является динамическое затекание одной из фазовых составляющих смеси в исходные поры порошка.

2. В качестве фазовой составляющей смеси, перемещение которой лимитирует степень уплотнения и ведет к образованию непрерывной матрицы в структуре спрессованного взрывом материала, может (в зависимости от фазового состава исходной порошковой смеси) выступать как металлическая связка, так и карбидная составляющая материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Schwarzkopf P., Kieffer R. Cemented carbides. Macmillan, 1960. – 349 p.
2. Groover, Mikell P. Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4th ed. John Wiley & Sons, Inc., Danvers, 2010. – 1012 p.

3. Buzyurkin A. E., Kraus E. I., Lukyanov Ya. L. Explosive compaction of WC+Co mixture by axisymmetric scheme. 2015. J. Phys.: Conf. Ser. 653 012036. P. 1–5.

4. Яковлев, И. В. Взрывное изготовление металлокерамических защитных контейнеров / И. В. Яковлев, В. М. Оголихин, С. Д. Шемелин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение, 2012. – Т. 14. – С. 55–60.

5. Tanaka S., Mori A., Oda H., Inao D., Hokamoto K. Surface coating by tungsten carbide particles on a metal substrate by high velocity collision // Science and Technology of Energetic Materials. Volume 78, Issue 3-4, 2017, Pages 93-98

6. Tanaka S., Hokamoto K., Itoh S. Shock compaction of WC-Co powder in metallic tube (2008) Materials Science Forum, 566, pp. 333-338.

7. Krokhaliev A.V., Kharlamov V.O., Kuzmin S.V., Lysak V.I. Foundations of the Fabrication Technology of Wear-Resistant Coatings Made of Mixtures of Chromium Carbide Powders with a Metallic Binder by Explosive Pressing. // Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2018, Vol. 59, No. 4, pp. 419–432.

8. Krokhaliev A.V., Kharlamov V.O., Kuz'min S.V., Lysak V.I. Features for formation of solid alloys of chromium carbide and titanium powder mixtures by explosion energy. Russian Journal of Non-Ferrous Metals. Volume 54, Issue 6, November 2013, Pages 522-526.

9. Крохалев А.В., Харламов В.О., Тупицин М.А., Кузьмин С.В., Лысак В.И. О возможности получения твердых сплавов из смесей порошков карбидов с металлами взрывным прессованием без спекания // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2017. No. 2. С. 22–30.

10. Prummer R.A., Balakrishna Bhat T., Siva Kumar K., Hokamoto K. Explosive compaction of powders and composites. Enfield, 2006. – 193 p.

11. Gourdin W.H. Dynamic consolidation of metal powders // Progr. Mater. Sci. 1986. Vol. 30. P. 39–80.

12. Prummer R.A. Explosive compaction of powders, principle and prospects // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 1989. Vol. 20. P. 410–415.

13. Murr L.E., Staudhammer K.P., Meyers M.A. Metallurgical applications of shock-wave and high-strain-rate phenomena. N.Y., 1986. – С. 657-74.

14. Крохалев, А. В. Уплотнение смесей порошков карбида хрома и металлической связки при взрывном прессовании / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, В. В. Пай // Физика горения и взрыва. – 2019. – Т. 55, № 4 (июль–август). – С. 129–137.

15. Лысак, В. И. Прессование порошков взрывом : монография / В. И. Лысак, А. В. Крохалев, С. В. Кузьмин, В. Д. Рогозин, А. М. Каунов. – Москва, 2015. – 252 с.