

А.Е. Бузюркин, Е.И. Краус, Я.Л. Лукьянов

Взрывное компактирование смеси WC+Co по осесимметричной схеме

A.E. Buzyurkin, E.I. Kraus, Ya.L. Lukyanov

Explosive Compaction of WC + Co Powders with Axial Symmetry

В работе поставлена задача разработки и оптимизации схем взрывного компактирования смесей твердых порошковых материалов с металлической связкой. С этой целью проведены эксперименты по взрывному компактированию смесей карбида вольфрама (WC) с кобальтом (Co) в цилиндрических ампулах сохранения. Также проведено численное моделирование распространения ударных волн по двухфазной пористой среде WC+Co. На основе экспериментальных и численных исследований распространения ударных волн определены оптимальные режимы взрывного компактирования двухфазных порошковых сред, представляющих собой смеси твердых порошковых материалов с металлической связкой. Показано, что наиболее предпочтительным для получения однородного прочного компакта смеси порошков WC+Co 9:1 по объему в осесимметричной схеме с центральным стержнем является режим компактирования, соответствующий скорости детонации заряда ВВ 4,6 км/с с последующим спеканием.

Ключевые слова: ударная адиабата, уравнение состояния, ударные волны в пористом теле.

DOI 10.14258/izvasu(2014)1.1-05

Введение. При создании новых, в том числе композиционных, материалов важное место занимают методы взрывного компактирования порошковых гетерогенных систем, так как вследствие кратковременности воздействия высоких температур и давлений данный метод позволяет в основном сохранить структуру и свойства исходных порошков. Данное условие является важным при прессовании, например, субмикроструктурных или аморфных порошков. Интерес к этим задачам связан с возможностью создания новых материалов с контролируемыми свойствами.

Карбид вольфрама находит многочисленные применения благодаря удачному сочетанию своих физических и механических свойств (высокая температура плавления, высокая твердость, низкий коэффициент трения и химическая устойчивость к коррозии и окислению) [1, с. 27]. Наибольшее распространение карбид вольфрама приобрел как основа для получения твердых сплавов. Введение металлической фазы, в част-

The objective of this work is to develop and optimize explosive compaction techniques for metal-bonded solid powder materials. Experiments of explosive compaction of tungsten carbide (WC) and cobalt (Co) powders in cylindrical storage ampoules are conducted. Additionally, numeric simulation of shock waves propagation within the two-phased porous WC+Co medium are performed. Based on experimental and numerical simulation studies of shock waves propagation, optimal conditions of two-phased porous metal-bonded solid powder materials explosive compaction are obtained. It is demonstrated that compaction with the detonation velocity of 4.6 km/s followed by sintering is the most advantageous for obtaining an uniform solid WC+Co powder compact with the volume ratio of 9:1, axial symmetry and central core.

Key words: adiabatic shock, equation of state, shock waves in porous body.

ности кобальта, приводит к повышению трещиностойкости получаемого образца.

Экспериментальное исследование структуры компактов. Исходный порошок кобальта представлял собой агломераты размером 50–100 мкм, состоящие из частиц со средним размером 1 мкм. Порошок карбида вольфрама имел средний размер частиц 6–7 мкм.

Для лучшей однородности смеси перед смешиванием порошок кобальта размалывался в шаровой мельнице в течение 7 часов. Затем производилось смешивание порошков WC+Co в соотношении 9:1 по объему также в шаровой мельнице в течение 7 часов. Предварительно бесконтактным электромагнитным методом [2, с. 93] были измерены ударные адиабаты исследуемых смесей. Далее проводилось взрывное компактирование смеси в цилиндрических ампулах сохранения с центральным стержнем.

Некоторые образцы после компактирования термообрабатывались непосредственно в ампулах.

Структуры компактов исследовались с помощью сканирующего электронного микроскопа LEO-420. Проведены измерения микротвердости компактов на твердомере ПМТ-3.

Во всех экспериментах диаметр контейнера составлял 28 мм, толщина стенки — 3 мм, диаметр стержня — 14 мм. Длина засыпки смеси — 120 мм. Смесь WC+Co — 9:1 по объему — имела насыпную плотность 7,46 г/см³, или 52% от плотности монолита. Толщина заряда взрывчатого вещества (ВВ) — 10 мм.

В качестве взрывчатого вещества использовались гексоген, аммонит 6ЖВ и их смесь 1:1,5 по массе. Во всех экспериментах измерялась скорость детонации заряда. Она составила для гексогена 5,4 км/с (образец №1), для смеси гексоген-аммонит — 4,6 км/с (образец №2) и для аммонита — 3,4 км/с (образец №3). Образцы №2 и 3 после компактирования спекались непосредственно в ампулах 3 часа при температуре 900 °С. Электронные изображения фрактограмм представлены на рисунке 1.

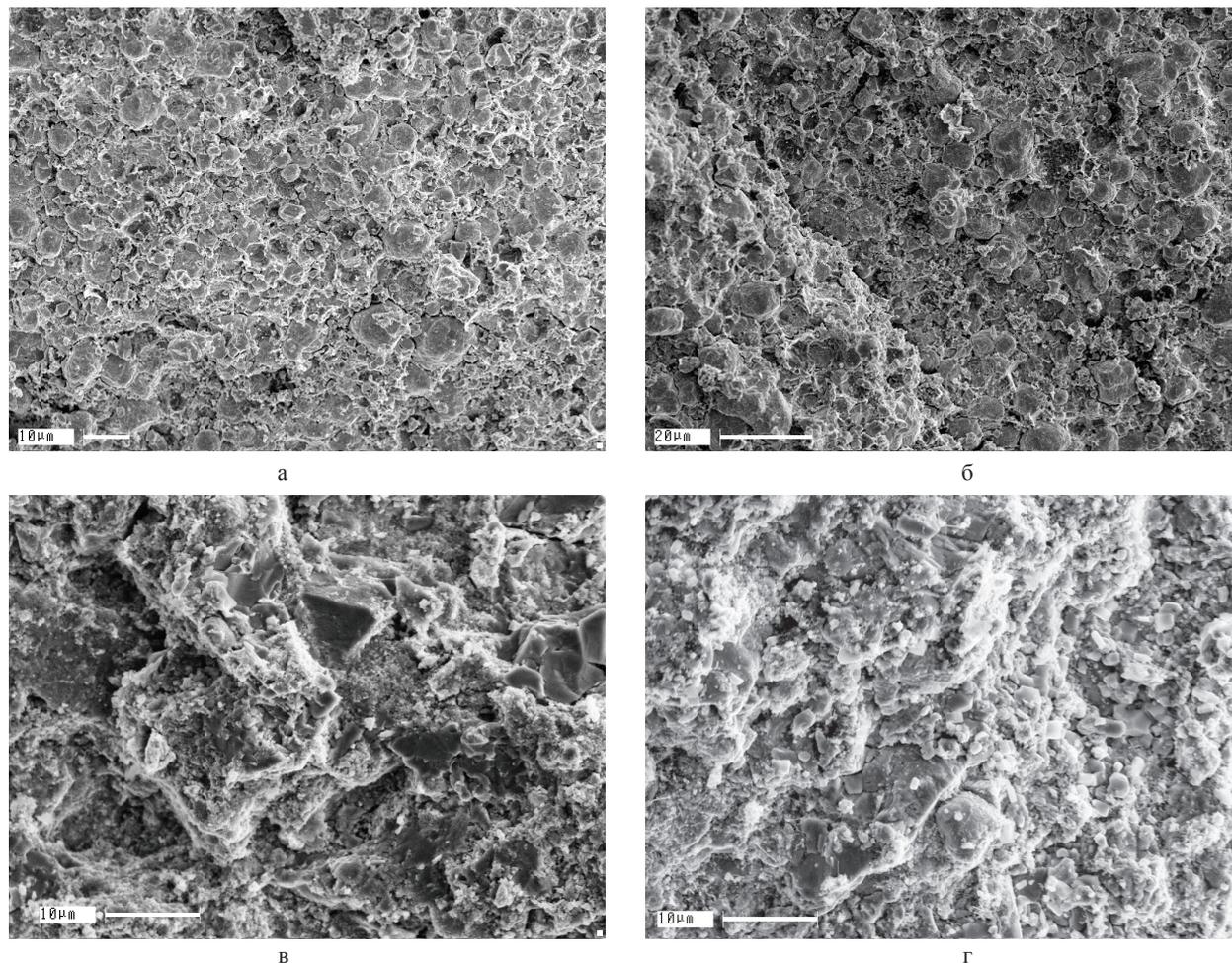


Рис. 1. а — структура образца №1 в толще; б — он же в маховой зоне; в — образец №2; г — образец №3 после спекания

Исследования фрактограмм компактов показали, что образец №1 имеет рыхлую структуру с ярко выраженной маховой зоной. Прочной связи между частицами не образовалось даже в маховой зоне, где наблюдается плавление частиц кобальта. Наиболее однородную структуру и наилучшую связь между частицами имеет образец №2. В нем отсутствует ярко выраженная маховая зона. В образце №3 также не наблюдается маховой зоны, и связь между частицами хуже, чем в образце №2, что связано,

по-видимому, с недостаточным давлением в ударной волне при компактировании. Таким образом, исследования показали, что наиболее предпочтительным для получения однородного прочного компакта смеси порошков WC+Co 9:1 по объему в осесимметричной схеме с центральным стержнем является режим компактирования, соответствующий образцу №2, с последующим спеканием.

Результаты расчетов и обсуждение. Для численного моделирования распространения ударных волн

решалась полная система уравнений деформирования пористого упруго-пластического материала [3, с. 125]. Для описания поведения многокомпонентной среды в ударной волне использовался смесевой подход [4, с. 78]. Ударная адиабата смеси задана линейным соотношением между скоростью ударной волны D_{mix} и массовой скоростью U_{mix} :

$$D_{mix} = a_{mix} + \lambda_{mix} U_{mix},$$

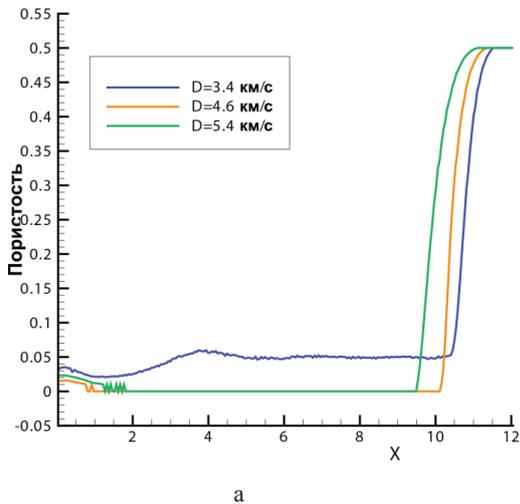
тогда запишем

$$P_{mix} = \frac{\rho_{0mix} a_{mix}^2 \left(1 - \frac{\rho_{0mix}}{\rho_{mix}}\right)}{\left[1 - \lambda_{mix} \left(1 - \frac{\rho_{0mix}}{\rho_{mix}}\right)\right]^2}, V_{mix}(P) = \sum_{i=1}^n \alpha_i V_i(P), \alpha_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1,$$

где $\rho_{0mix} = 1/V_{0mix}$, $\rho_{mix} = 1/V_{mix}$ — начальная и текущая плотности; a_{mix} — обобщенная гидродинамическая скорость звука в смеси; λ_{mix} — тангенс угла наклона обобщенной прямой в координатах $D_{mix} \div U_{mix}$; α_i — массовая концентрация.

Величины a_{mix} , λ_{mix} взяты из экспериментально определенной адиабаты смеси WC+Co, приведенной на рисунке 2.

На рисунке 3а приведены распределения пористости по толщине образца при различных режимах на-



грузки. Из рисунка видно, что при скорости детонации 3,4 км/с не происходит полного затекания пор по толщине нагружаемого образца, что хорошо согласуется с данными эксперимента. На рисунке 3б показано распределение плотности по толщине нагружаемых образцов для различных режимов нагружения. Наиболее равномерное распределение плотности имеет место при скорости детонации 4,6 км/с. При скорости детонации 5,4 км/с в верхней части образца наблюдается резкое уменьшение плотности, связанное с действием волн разгрузки, которые успевают отразиться от свободной поверхности после прохождения детонационной волны.

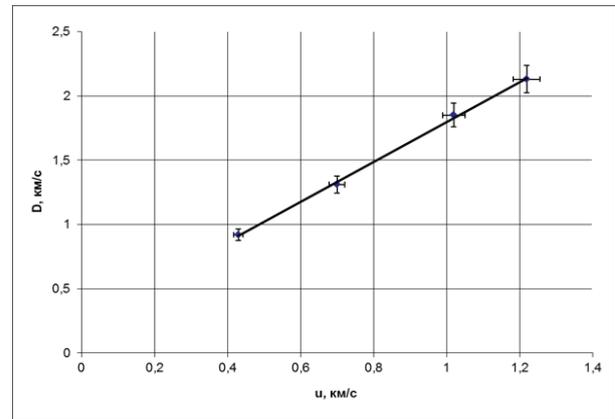


Рис. 2. Ударная адиабата смеси WC+Co 9:1 по объему.
 $D_{mix} = 0,244 + 1,554U_{mix}$

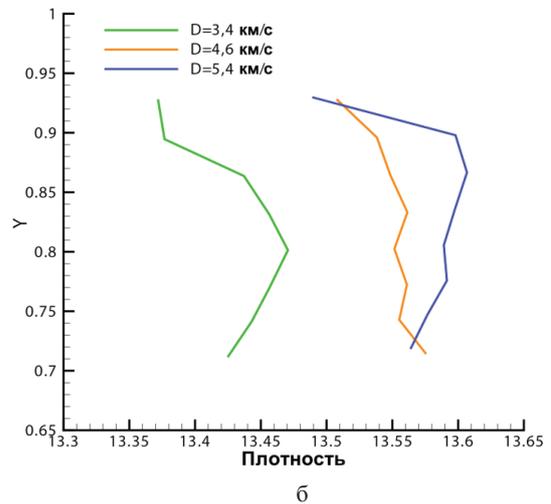


Рис. 3. а — распределение пористости по толщине образцов; б — распределение плотности по толщине образцов

Заключение. На основе экспериментальных и численных исследований распространения ударных волн определены оптимальные режимы взрывного компактирования двухфазных порошковых сред, представляющих собой смеси твердых порошковых материалов с металлической связкой. Показано, что наиболее

предпочтительным для получения однородного прочного компакта смеси порошков WC+Co 9:1 по объему в осесимметричной схеме с центральным стержнем является режим компактирования, соответствующий скорости детонации заряда ВВ 4,6 км/с, с последующим спеканием.

Библиографический список

1. Панов В. С., Чувиллин А. М., Фальковский В. А. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них. — М., 2004.
2. Яковлев И. В., Пай В. В., Злобин С. Б., Лукьянов Я. Л., Кузьмин Г. Е. Исследование ударно-волновых характеристик порошковых сред и исследование их структуры // Физическая мезомеханика. — 2001. — Т. 4, № 4.
3. Киселев С. П., Фомин В. М. О модели пористого материала с учетом пластической зоны, возникающей в окрестности поры // ПМТФ. — 1993. — № 6.
4. Краус Е. И., Фомин В. М., Шабалин И. И. Учет электронных составляющих в уравнении состояния при расчете ударных волн в смеси металлов // Математическое моделирование систем и процессов: сб. ст. / Перм. гос. техн. ун-т. — Пермь, 2001. — Т. 9.