

УДК 539.3:539.89

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ
ЭНЕРГИЕЙ ВЗРЫВА В АМПУЛАХ СОХРАНЕНИЯ**

© 2011 г.

А.Е. Бузюркин

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

buzjura@itam.nsc.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Совместные теоретические и экспериментальные исследования позволили реализовать подход, использующий математическое и физическое моделирование процессов ударно-волнового нагружения порошковых материалов. Бесконтактным электромагнитным методом измерены ударные адиабаты исследуемого порошка. Проведено численное моделирование распространения ударных волн и деформирования экспериментальной сборки.

Ключевые слова: ударные адиабаты, уравнение состояния, ударные волны, пористое тело.

Методы взрывного нагружения порошковых материалов в ампулах сохранения применяются для получения новых, в том числе композиционных, материалов с уникальными физико-механическими свойствами. Кроме того, эти методы могут использоваться для исследования фазовых переходов, происходящих в материалах при высоких давлениях и температурах, возникающих за фронтом ударных волн, а также для синтеза метастабильных фаз.

В последние десятилетия заметное развитие получило такое научно-техническое направление в материаловедении, как порошковая металлургия. Под этим термином в настоящее время принято понимать весь комплекс задач, связанных с созданием материалов и изделий из металлических и неметаллических порошков. Интерес к этим задачам вполне понятен – появилась возможность для создания новых классов материалов с уникальными и контролируруемыми свойствами, материалов, которые не могут быть получены традиционными способами металлургии.

Особое место в порошковой металлургии занимает взрывное компактирование порошковых материалов. Легко объясним повышенный интерес к взрывному компактированию. Состоит он в том, что практически все методы создания композиционных материалов из порошковых смесей приводят к изменению исходных свойств материалов вследствие повышенных температур и отнюдь не высокой длительности процесса.

Так как порошковые материалы, получаемые в виде гранул, волокон, иголок и ленточек, обладают необходимыми свойствами в исходном состо-

янии, не могут быть использованы непосредственно для создания полуфабриката или детали, то методы компактирования таких материалов выполняют сразу две задачи. С одной стороны, компактирование используется для изменения формы и размеров, а с другой, – это способ получения собственно материала. С этой точки зрения кратковременность воздействия высоких температур и давлений при взрывном компактировании позволяет, в основном, сохранить исходную структуру и свойства компонентов. В то же время варьирование интенсивности и времени воздействия высоких давлений и температур при ударном сжатии позволяет контролируемо изменять при необходимости структуру и свойства компактов.

Нагружение порошковых материалов в ампулах сохранения может осуществляться как плоскими, так и косыми ударными волнами. Каждый из вышеупомянутых способов имеет свои преимущества и недостатки. Схема взрывного нагружения косой ударной волной характеризуется большими значениями сдвиговой деформации по сравнению с плоским ударным нагружением, что приводит к улучшению связи между компактируемыми частицами. Кроме того, эта схема позволяет получать компакты не только в форме пластин, но и труб, стержней, конусов и т.д. Также можно получать компакты больших размеров. Схема нагружения плоскими ударными волнами позволяет варьировать значения давления и температуры за фронтом в более широких пределах и достигать гораздо более высоких значений этих параметров. Вместе с тем, схема является более мате-

риалоемкой и имеет ограничения на размер нагружаемых образцов.

Эксперименты по взрывному компактированию проводились для медного порошка по цилиндрической схеме без центрального стержня. Порошок состоял из частиц, по форме близких к сферической, и размерами 145–310 мкм. Насыпная плотность порошка составляла во всех экспериментах 5.0 ± 0.05 г/см³. Скорость детонации измерялась электроконтактным методом и варьировалась в диапазоне от 2.2 до 6.2 км/с. Во всех экспериментах соблюдалось условие $\delta \geq r$, где δ – толщина слоя взрывчатого вещества (ВВ), r – внешний радиус контейнера с порошком. Стенка контейнера была тонкой по сравнению с толщиной слоя ВВ и диаметром порошкового образца.

Структуры поперечных сечений и фрактограммы компактов исследовались с помощью оптического и сканирующего электронного микроскопов. Бесконтактным электромагнитным методом измерены ударные адиабаты исследуемого порошка [1]. Для численного моделирования распространения ударных волн решается полная система уравнений деформирования пористого упругопластического материала [2].

Показано, что взрывные компакты, полученные в режиме нерегулярного отражения по осесимметричной схеме без центрального стержня, могут иметь однородную структуру. Однородный по структуре компакт можно получить, если скорость детонации заряда ВВ при взрывном компактировании порошкового материала не превышает D_{melt} , где D_{melt} – скорость плоской ударной волны, при которой за фронтом материал нагревается до температуры плавления.

Совместные теоретические и экспериментальные исследования позволили реализовать подход, использующий математическое и физическое моделирование процессов ударно-волнового нагружения порошковых материалов. Бесконтактным электромагнитным методом измерены ударные адиабаты исследуемого порошка. Верифицирована используемая математическая модель упругопластического деформирования порошковой среды. Проведено численное моделирование распространения ударных волн и деформирования экспериментальной сборки. Распределение температуры по толщине образца в скомпактированной области для нескольких значений скорости детонации показывает, что при большей скорости наблюдается значительная неоднородность в распределении температуры по толщине образца. Вблизи оси образца температура имеет большее значение, чем на удалении от нее. При уменьшении скорости нагружения наблюдается однородное распределение параметров по толщине образца. Таким образом, определена скорость нагружения, при которой становится возможным получение однородных по своим свойствам компактов в цилиндрической схеме нагружения.

Список литературы

1. Яковлев И.В. и др. Исследование ударно-волновых характеристик порошковых сред и исследование их структуры // Физическая мезомеханика. 2001. Т. 4, №4. С. 93–99.
2. Киселев С.П., Фомин В.М. О модели пористого материала с учетом пластической зоны, возникающей в окрестности поры // ПМТФ. 1993. №6. С. 125–133.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SHOCK WAVE STRESSING OF METAL POWDERS BY EXPLOSION

A.E. Buzyurkin

Joint theoretical and experimental investigations made it possible to realize an approach with the use of mathematical and physical modeling of processes of a shock wave loading of powder materials. Hugoniot adiabats of the investigated powder have been measured with a noncontact electromagnetic method. The mathematical model of elastic-plastic deformation of the powder media used in the investigation has been validated. Numerical simulation of shock wave propagation and experimental assembly deformation has been performed.

Keywords: hugoniot adiabats, equation of state, shock waves, porous media.