

¹ Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия

² Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 15, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: buzjura@itam.nsc.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЗРЫВА *

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 в пористом теле.

Введение

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 объяснить 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 относительно высокой длительности процесса.

Так как порошковые материалы, получаемые в виде гранул, волокон, иголок и ленточек, обладая необходимыми свойствами в исходном состоянии, 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

* Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракт П356 от 30.07.2009).

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 контролируемым образом 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 варьи-

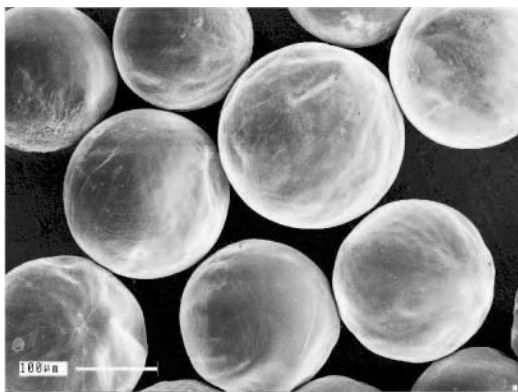


Рис. 1. Исходный медный порошок

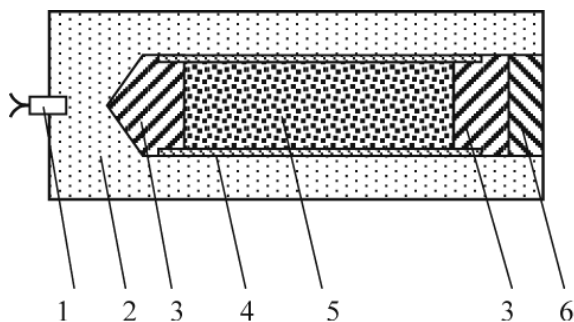


Рис. 2. Схема взрывного компактирования: 1 – детонатор; 2 – заряд взрывчатого вещества; 3 – пробки; 4 – контейнер; 5 – порошок; 6 – откольный элемент

ровать значения давления и температуры за фронтом в более широких пределах и достигать гораздо более высоких значений этих параметров. Вместе с тем схема является более материалоемкой и имеет ограничения на размер нагружаемых образцов.

Экспериментальное исследование структуры компактов

Эксперименты по взрывному компактированию проводились по цилиндрической схеме без центрального стержня. Порошок состоял из частиц, по форме близких к сферическим, размерами 145–310 мкм (рис. 1). Насыпная плотность порошка составляла во всех экспериментах для меди – $5,0 \pm 0,05$ г/см³, для алюминия – 1,4 г/см³.

Взрывное компактирование происходило под действием продуктов детонации контактных зарядов взрывчатого вещества (ВВ). Заряды изготавливались из аммонита БЖВ, гексогена и смесей аммонита БЖВ с гексогеном и аммиачной селитрой в различных пропорциях. 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 ВВ, r – внешний радиус контейнера с порошком. Стенка контейнера была тонкой по сравнению с толщиной слоя ВВ и диаметром порошкового образца. Структуры компактов исследовались с помощью оптического микроскопа НЕОРНОТ и сканирующего электронного микроскопа LEO-420. Схема экспериментов представлена на рис. 2.

Предварительно, бесконтактным электромагнитным методом [1] были измерены ударные адиабаты исследуемого порошка. Данная методика позволяет в одном эксперименте фиксировать как скорость ударной волны, так и массовую скорость за ее фронтом. Результаты измерения представлены в табл. 1.

Структуры поперечных сечений и фрактограммы компактов исследовались с помощью оптического и сканирующего электронного микроскопов. На рис. 3. приведены структуры поперечных сечений компактов вблизи оси ампулы для различных значений скорости детонации заряда. Видно, что с увеличением скорости детонации заряда структура центральной зоны качественно изменяется.

На рис. 4 показаны фрактограммы компактов, полученных при скоростях детонации 3,95 и 5,26 км/с. В первом случае деформирование частиц происходит в квазистатическом режиме, а во втором – в динамическом, который характеризуется наличием струйных течений материала и более прочной связью между частицами.

Можно заметить, что при выходе маховской волны на стационарный режим, скорость последней в точности равна скорости детонации заряда ВВ. Используя соотношения на скачке и уравнение состояния, например Ми – Грюнайзена, можно найти критическую скорость ударной волны D_{melt} , при которой данный порошковый материал нагреется за фронтом плоской ударной волны до температуры плавления. Тогда при

Таблица 1

Экспериментальные данные
взрывного нагружения

U , км/с	D , км/с
Медь	
с начальной плотностью 5,0 г/см ³	
0,87	2,8
0,79	2,6
0,62	2,1
0,48	1,7
Алюминий	
с начальной плотностью 1,4 г/см ³	
0,9	1,9
1,06	2,2
1,41	2,8
1,68	3,3

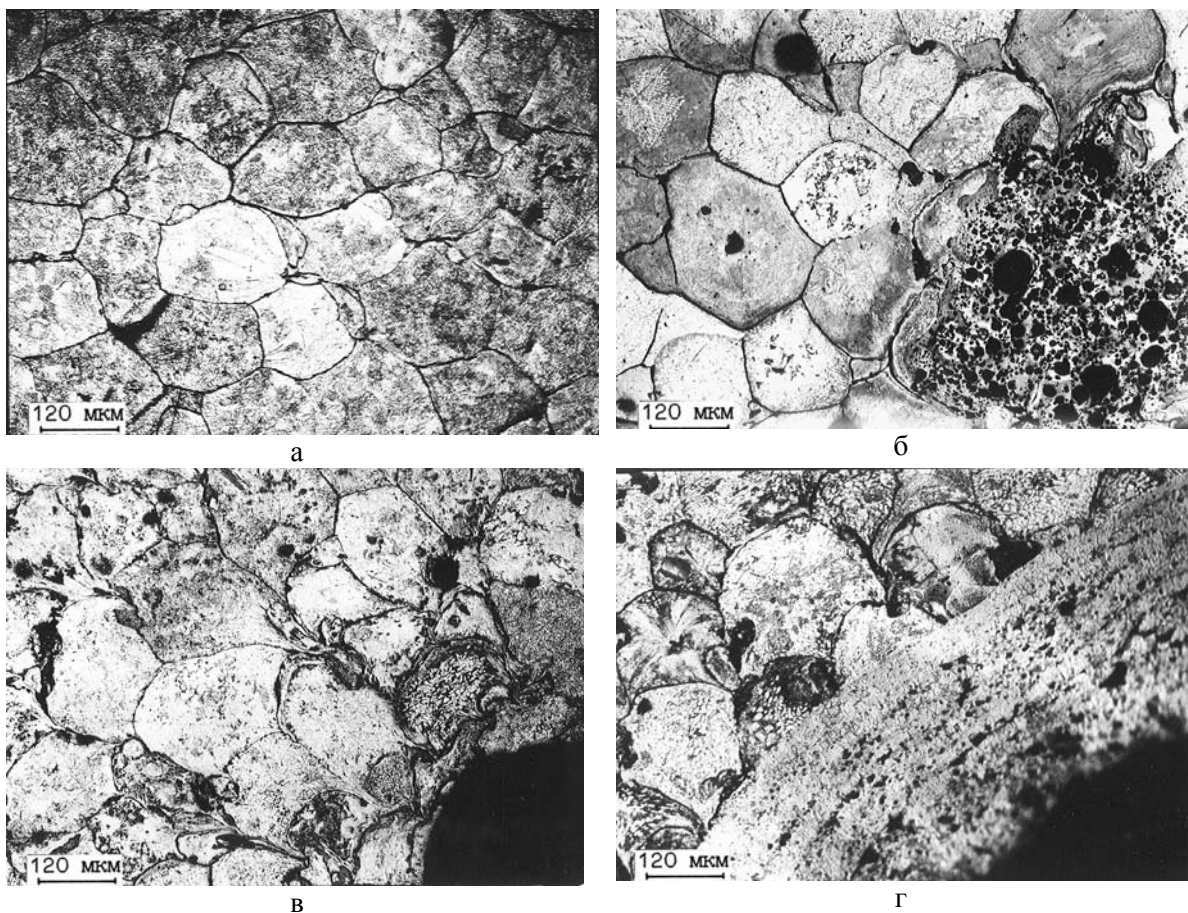
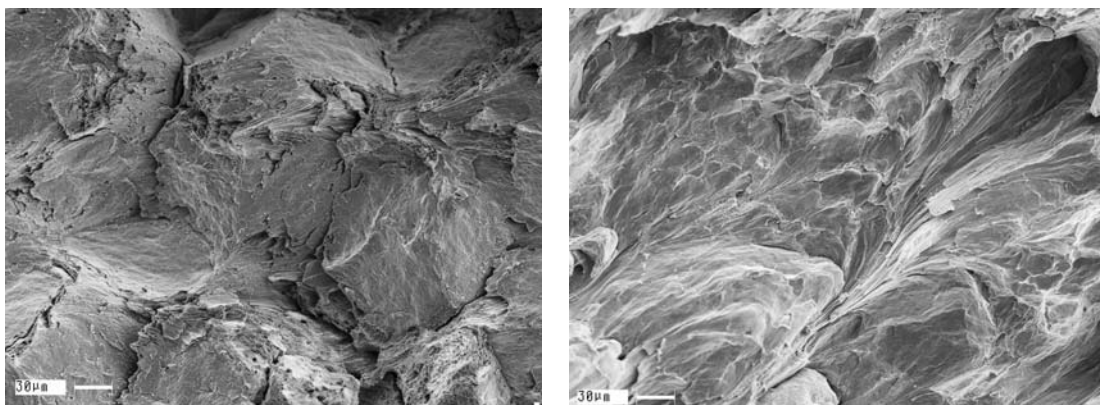


Рис. 3. Структуры поперечных сечений компактов вблизи оси ампулы:
а – $D = 2,75$ км/с; б – $D = 3,95$ км/с; в – $D = 5,26$ км/с; г – $D = 5,84$ км/с
(здесь D – скорость детонации заряда ВВ)



а

б

Рис. 4. Фрактограммы компактов на периферии образцов: а – $D = 3,95$ км/с, б – $D = 5,26$ км/с

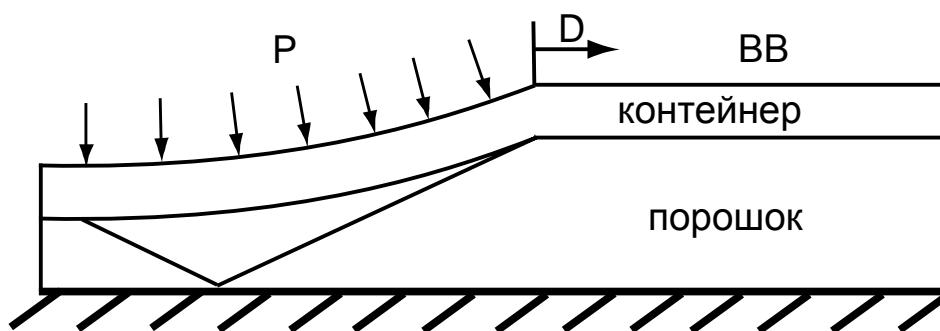


Рис. 5. Схема расчета

взрывном компактировании по осесимметричной схеме, выбирая заряд ВВ со скоростью детонации, меньшей D_{melt} , можно получить однородный компакт.

Таким образом, может быть предложен простой критерий получения однородного компакта при нерегулярном режиме отражения ударных волн в осесимметричном случае. Заметим, что этот критерий применим для порошков с достаточно высокой насыпной плотностью, равной примерно половине плотности монолитного материала или выше. При высокой начальной пористости D_{melt} может быть столь мала, что при компактировании по осесимметричной схеме с такой скоростью детонации материал на периферии контейнера может не сжаться до плотности монолитного материала. Поэтому для компактирования без предварительной подпрессовки предпочтительны порошки с формой частиц, близкой к сфе-

рической, так как они имеют высокую насыпную плотность.

Численное моделирование взрывного нагружения

Для численного моделирования распространения ударных волн решается полная система уравнений деформирования пористого упругопластического материала [2]. Постановка задачи приведена на рис. 5.

Действие продуктов взрыва на порошок моделируется давлением, приложенным к верхней границе контейнера. Величина приложенного давления определяется из формулы, аппроксимирующей поведение давления при разлете продуктов детонации [3]:

$$P(t) = P_H \exp(-(t - x/D)/t_1),$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{3(\gamma_e + 1) \delta_e}{4(\gamma_e - 1) D}},$$

здесь δ_e – толщина слоя взрывчатого вещества; γ_e – показатель адиабаты продуктов детонации. В силу симметрии задачи рассматривается половина экспериментальной сборки. Осью симметрии является ось контейнера с порошком. На оси симметрии ставится условие жесткой стенки. Правая граница свободна от напряжений, а на левой границе рассматривалось условие жесткой стенки. Расчет контактных границ осуществляется с помощью симметричного алгоритма [4]. Расчеты проводятся по схеме М. Уилкинса [5]. Ударная волна распространяется слева направо. Геометрические размеры и значения физических параметров соответствуют приведенным выше экспериментальным данным.

В нашей работе использовано малопараметрическое уравнение состояния [6], которое позволило провести расчеты ударно-волновых процессов с минимальным числом физических параметров в качестве начальных данных:

$$E = E_x + c_{v,l}T + \frac{1}{2}c_{v,e0}T^2 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{2/3},$$

$$P = -\left(\frac{dE_x}{dV}\right) + \frac{\gamma_l c_{v,l}T}{V} + \frac{1}{3} \frac{c_{v,e0}T^2}{V} \left(\frac{V}{V_0}\right)^{2/3},$$

или, в терминах свободной энергии,

$$F(V, T) = E_x(V) + c_{v,l}T \ln\left(\frac{\theta(V)}{T}\right) - \frac{1}{2}c_{v,e0}T^2 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{2/3},$$

где P_x и E_x – давление и удельная внутренняя энергия на нулевой изотерме; T – температура; $c_v = c_{v,l} + c_{v,e}$ – теплоемкость при постоянном объеме; $\theta(V)$ – температура Дебая.

Представленное уравнение состояния основано на зависимости коэффициента Грюнайзена γ от объема [7]:

$$\gamma(V) = 2/3 - 2/(1 - aV_0/V),$$

$$a = 1 + 2/(\gamma_s - 2\beta) + 2P_{t,0}/K_s,$$

где $\gamma_s = \beta K_s V_0 / c_v$, K_s – адиабатический модуль объемного сжатия; β – коэффициент теплового расширения; $P_{t,0}$ – тепловая часть давления при нормальных условиях.

Для нахождения упругих кривых применена обобщенная модель описания коэффициента Грюнайзена $\gamma(V)$:

$$\gamma(V) = -\left(\frac{2-t}{3}\right) - \frac{V}{2} \left[\frac{d^2(P_x V^{2t/3})/dV^2}{d(P_x V^{2t/3})/dV} \right],$$

при $t = 0$ уравнение отвечает теории Ландау и Слэйтера [7; 8], при $t = 1$ соответствует гипотезе Дуглейла и Макдональда [9], а при $t = 2$ – теории свободного объема [10].

В физике ударных волн известен способ расчета давления $P_{h,p}$ на ударной адиабате пористого материала по давлению P_h на «опорной» ударной адиабате монолитного материала [11]:

$$P_{h,p} = \frac{P_h(1 + 0,5\gamma(V)(1 - V_0/V))}{1 + 0,5\gamma(V)(1 - V_{00}/V)}.$$

Здесь V – удельный объем на ударных адиабатах; V_0 и V_{00} – удельные объемы соответственно монолитного и пористого материалов при начальных комнатных условиях.

По результатам исследований были построены расчетные ударные адиабаты для медного и алюминиевого порошков при различных значениях начальной пористости (рис. 6). Проведенное сравнение результатов, полученных в данной работе, с известными экспериментальными данными [12–15] показывает, что погрешность вычисления параметров на адиабате не превышает 5–15 %.

На рис. 7 приведено распределение температуры по толщине образца в скомпактированной области для нескольких значений скорости детонации. Из графиков хорошо видно, что при большей скорости наблюдается значительная неоднородность в распределении температуры по толщине образца. Вблизи оси образца температура имеет большее значение, чем на удалении. При уменьшении скорости нагружения наблюдается однородное распределение параметров по толщине образца. В результате оказывается возможным получение однородных по своим свойствам компактов в цилиндрической схеме нагружения.

Заключение

Совместные теоретические и экспериментальные исследования позволили реализовать подход, использующий математическое и физическое моделирование процессов ударно-волнового нагружения порошковых материалов. Бесконтактным электромагнитным методом измерены удар-

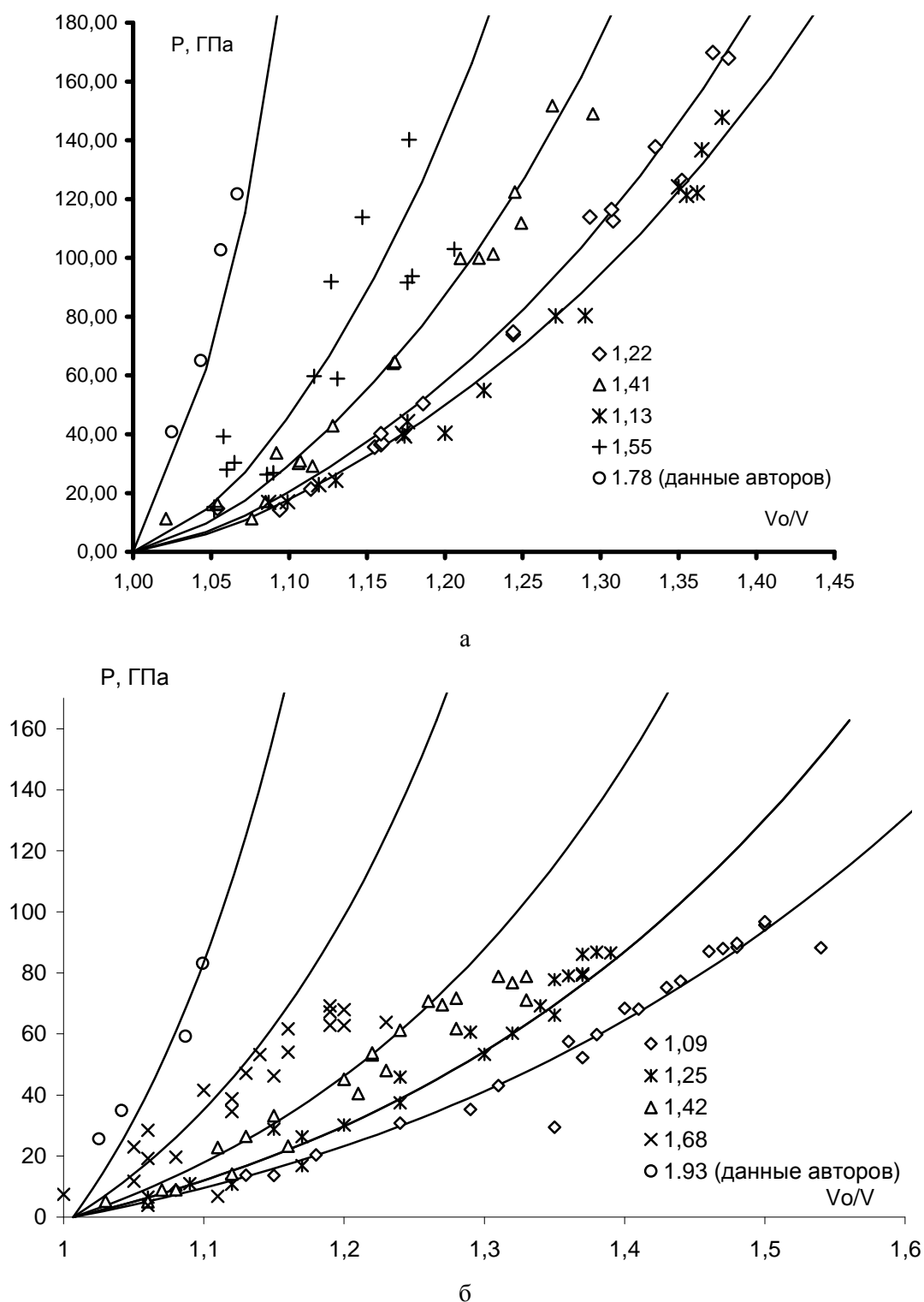


Рис. 6. Ударные адиабаты пористого материала для различных значений начальной пористости. Расчет и экспериментальные данные: а – медь; б – алюминий

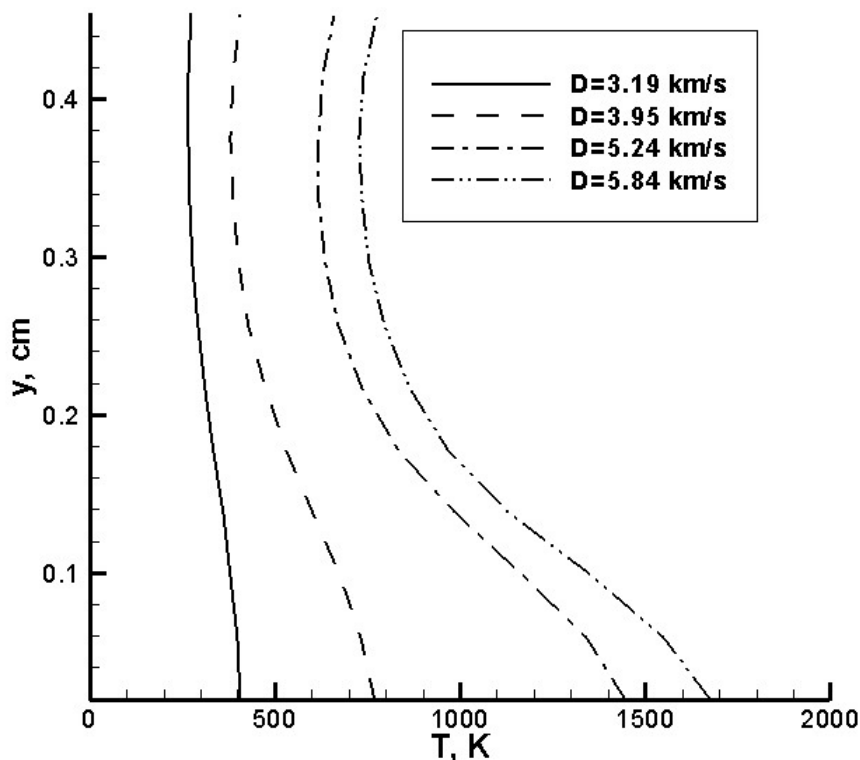


Рис. 7. Распределение температуры по толщине образца в скомпактированной области для различных значений скорости детонации. Материал – медь

ные 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., 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. 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.
3. Пай В. В., Кузьмин Г. Е., Яковлев И. В. Приближенная оценка параметров нагружения в композиционных материалах для случая сильных ударных волн // ФГВ. 1995. Т. 31, № 3. С. 124–130.
4. Фомин В. М., Гулидов А. И., Сапожников Г. А., Шабалин И. И., Бабаков В. А., Куропатенко В. Ф., Киселев А. Б., Тришин Ю. А., Садырин А. И., Киселев С. П., Головнев И. Ф. Высокоскоростное взаимо-

действие тел. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 600 с.

5. Уилкинс М. Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 212–264.

6. Краус Е. И. Малопараметрическое уравнение состояния твердого вещества при высоких плотностях энергии // Вестн. Новосибир. гос. ун-та. Серия: Физика. 2007. Т. 2, вып. 2. С. 65–73.

7. Slater I. C. Introduction in the Chemical Physics. N. Y.; L.: McGraw Book Company, Inc., 1935. 239 p.

8. Ландау Л. Д., Станюкович К. П. Об изучении детонации конденсированных взрывчатых веществ // ДАН СССР. 1945. Т. 46. С. 399–406.

9. Dugdale J. S., McDonald D. The Thermal Expansion of Solids // Phys. Rev. 1953. Vol. 89. P. 832–851.

10. Зубарев В. Н. Ващенко В. Я. О коэффициенте Грюнайзена // ФТТ. 1963. Т. 5. С. 886–891.

11. Мак-Куин Р., Марш С., Тейлор Дж. и др. Уравнения состояния твердых тел по

результатам исследования ударных волн // Высокоскоростные ударные явления / Под ред. В. Н. Николаевского. М.: Мир, 1973.

12. *Compendium of Shock Wave Data* / Ed. by M. van Thiel. Livermore: Lawrence Livermore Laboratory Report UCRL-50108, 1977.

13. Трунин Р. Ф., Симаков Г. В., Сутулов Ю. Н. и др. Сжимаемость пористых металлов в ударных волнах // ЖЭТФ. 1989. Т. 96. С. 1054–1069.

14. *LASL Shock Hugoniot Data* / Ed. by S. P. Marsh. Berkeley: Univ. California Press, 1979. 672 p.

15. Кормер С. Б., Фунтиков А. И., Урлин В. Д., Колесникова А. Н. Динамическое сжатие пористых металлов и уравнение состояния с переменной теплоемкостью при высоких температурах // ЖЭТФ. 1962. Т. 42. С. 686–702.

Материал поступил в редколлегию 05.07.2010

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

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

Joint theoretical and experimental investigations have allowed to realize an approach with 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 in porous media.