

*Е. А. Козлов, М. А. Лебедев, Б. В. Литвинов*

## ВЗРЫВНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО КОМПАКТИРОВАНИЯ И СИНТЕЗА МАТЕРИАЛОВ

Представлен краткий обзор взрывных устройств и подходов, существенно расширяющих экспериментальные возможности работ по динамическому компактированию и синтезу материалов. Намечены основные направления дальнейших исследований с помощью новых методических возможностей.

Взрывные устройства находят все более широкое применение в технологической практике создания новых материалов. При всем многообразии конструктивного исполнения их можно разделить по геометрии действия на нагружаемое вещество на три принципиально отличающиеся группы: плоского, осесимметричного и сферического сжатия.

В этих группах устройств энергоноситель — взрывчатое вещество (ВВ) или сжатый газ в газовых пушках — не действует на сжимаемое вещество непосредственно. Поэтому нельзя согласиться с классификацией, предложенной в [1, стр. 19—21], поскольку при всех способах обжатия сжимаемое вещество заключается в металлическую капсулу и испытывает действие ударной волны (УВ), возникшей в стенке капсулы.

Не менее важна роль капсулы при снятии динамической нагрузки с образца, которая при этом выполняет роль ампулы сохранения. Это обстоятельство широко не использовано для управления действием УВ на сжимаемое вещество. Вместе с тем, изготавливая стенки капсулы из слоев разной акустической жесткости и геометрии, можно изменять уровень и темп нагружения и разгрузки, осуществляя тем самым его тонкую регулировку.

1. Устройства с плоским нагружением используются давно. С их помощью выполнено большинство исследований ударных адиабат веществ разного агрегатного состояния. Эти устройства проще в реализации, а создаваемые условия нагружения (давление, температура и их производные по времени — темп нагружения) легче контролировать и рассчитывать. В этом случае нагружение образца, помещенного в капсулу, чаще всего осуществляется ударом метаэмого тела или непосредственно по капсуле, или через смягчающую прокладку. Применение того или другого способа нагружения определяется конкретными условиями и целью работы.

Характерным примером рассматриваемой системы может служить двухкаскадная легкогазовая пушка Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса [2]. С ее помощью ударник массой до 20 г может быть разогнан до скорости 8 км/с, что позволяет создать в жидком дейтерии давление ~20 ГПа, а в тантале — до 500 ГПа. Диагностической системой этой установки можно измерять временные интервалы контактной методикой до 200 нс с разрешением 0,3 нс, а методикой измерения электросопротивления — до 50 нс с разрешением 2 нс.

Длительность импульса рентгеновской установки, которая регистрирует скорость и форму летящего ударника, составляет 80 нс, а интервал между импульсами — не менее 15 нс. С помощью такой пушки проведены исследования по компактированию различных материалов [3—6]. Тем не менее необходимо отметить, что это устройство, безусловно, весьма удобное для исследований, менее доступно, чем обычные пушки, поэтому, не может быть признано устройством массового исследовательского, а тем более, технологического применения.

К сожалению, еще менее доступны для целей компактирования подземные ядерные взрывы (ПЯВ). Известно несколько работ, в которых

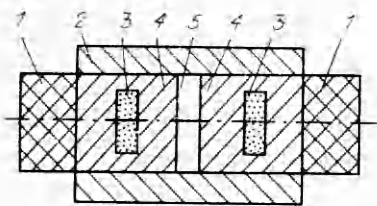


Рис. 1. Схема экспериментального устройства.

1 — заряд ВВ с системой инициирования; 2 — стальной цилиндр; 3 — нагружаемый образец; 4 — капсула; 5 — прокладка.

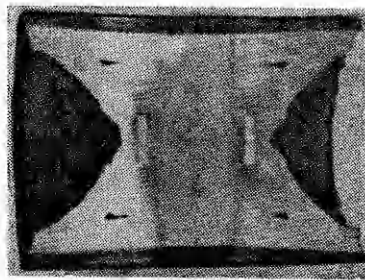


Рис. 2. Продольный разрез контейнера после опыта в постановке рис. 1.

1 — ТГ 40/60,  $d = 60$  мм; 3 — мрамор,  $20 \times 5$  мм; 5 — воздух.

изложены результаты опытов по ударным адиабатам алюминия, железа и молибдена, полученные при нагружении образцов ударной волной ПЯВ [7—9]. В них практически не обсуждаются ни условия опыта, ни условия постановки измерений, ни возможности метода. Можно предположить, что при ПЯВ размеры образцов, а также уровни нагружений, длительности импульса нагрузки могут быть гораздо больше, чем в обычных взрывных экспериментах. Остается надеяться на то, что со временем ПЯВ станут доступнее для проведения с их помощью опытов по компактированию, что даст возможность получить образцы больших размеров.

Из группы устройств, обеспечивающих плоское сжатие, наиболее доступным был и остается метод динамического нагружения плоских образцов самим ВВ или металлической пластиной, метаемой зарядом ВВ. Казалось бы в этой области трудно получить новые технические решения и экспериментальные результаты, но совершенствование продолжается.

Так, способ нагружения и сохранения образцов в многоместной капсуле [10] широко используется [11] при компактировании твердых материалов и позволяет не только повысить производительность установки, но и получить новые научные результаты. В данном способе имеет место практически неконтролируемая многократность волнового нагружения образца и, как следствие, неравномерность в распределении давлений и температур, которая затрудняет получение однородного по свойствам образца и уменьшает технологический выход конечного продукта.

Улучшить метод [10] может способ, предложенный одним из авторов, принципиальная схема которого представлена на рис. 1, а на рис. 2 и 3 приведены фото образцов, полученных по этой схеме. Изменяя геометрию и акустическую жесткость деталей 4 и 5, можно задавать контролируемый характер волнового сжатия образца 3 от однократного до многократного.

Дальнейшим усовершенствованием метода компактирования с помощью удара летящей пластины может быть разгон этой пластины с помощью ВВ. Последнее в свою очередь подрывается ударом пластины, разогнанной до предельной для данного отношения масс пластины и ВВ скорости. Такое каскадирование позволяет получить большие (чем при разгоне пластины одним зарядом ВВ) скорости и приблизиться по результативности к легкогазовым пушкам.

2. Группа устройств для компактирования с осесимметричным нагружением тоже весьма представительна. Исследование этих устройств и веществ, полученных в них, связано в нашей стране с именами Ю. Н. Рябинина, В. В. Даниленко, С. С. Бацанова, А. Н. Дремина, О. Н. Бреусова, Г. А. Ададунова, В. М. Титова и многих других. Довольно подробно осесимметричные устройства рассмотрены в [4]. Характерная особенность этих устройств состоит в наличии радиально сходящихся УВ и волн разгрузки, которые вызывают радиальную разноплот-

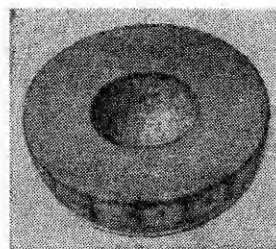
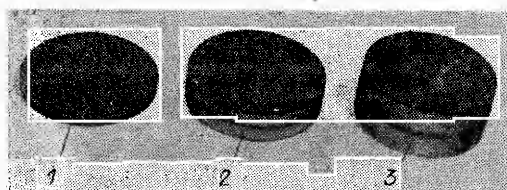


Рис. 3. Внешний вид образцов после опы- Рис. 4. Экваториальный разрез метал-  
тов в постановке рис. 1 (1 — ТГ 40/60; 3 — тического шара диаметром 64 мм пос-  
образец из смеси 84 % вольфрама и 16 % ле нагружения сферически сходящей-  
свинца, 5 — медь) плотностью 16,55— ся УВ.  
16,57 г/см<sup>3</sup> и толщиной 6 (1), 15 (2) и  
27 мм (3).

ность в образце, вплоть до нарушения сплошности в области его оси симметрии. Поэтому усилия исследователей направлены на формирование требуемых параметров и геометрии этих волн.

К группе устройств с осесимметричным нагружением, безусловно, следует отнести и кумулятивные заряды [12], облицовка которых в виде струи может служить исходным сырьем для компактирования и синтеза новых материалов. Здесь определяющими факторами являются материал облицовки, геометрия заряда и свойства среды, в которую струя ударяет, компактируется или перемешивается с ней и при этом претерпевает своего рода термическую закалку и высокоскоростную рекристаллизацию.

3. Еще более высокие плотности энергии в компактируемых или нормализуемых образцах получаются при использовании взрывных устройств с центральной симметрией [13].

В отличие от [14] в [15—18] использование наружного тяжелого корпуса и сферических систем различного габарита позволило существенно расширить диапазон реализуемых на сохраняемых образцах давлений, температур и увеличить длительность импульса нагрузки.

В экспериментах со сферическими системами, различающимися по габаритам примерно в 3 раза, сохранены [15, 16, 19—21] и прошли детальные металлографические и рентгеноструктурные исследования [17, 19] шары из различных материалов: алюминия, меди, циркония, цирконий-ниобиевых сплавов, различных  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фазных сталей и других материалов.

В шарах из  $\gamma$ -фазы железа на падающей волне на радиусе в несколько миллиметров в сферических системах, отличающихся по радиусу в 3 раза, достигнуты [15, 16] давления на уровне 200—1000 ГПа при длительности импульса нагрузки 0,5—2 мкс.

При металлографических исследованиях сохраненных образцов в прилегающих к центральной вакуумной полости (рис. 4) слоях материала обнаружено [19] формирование слоя с сильным (на 2—3 порядка по отношению к исходному) измельчением зерна — по существу нового материала, свидетельствующего о сверхвысокоскоростной закалке расплава.

В материалах, склонных к полиморфизму, например, цирконий-ниобиевых сплавах, экспериментально зафиксировано [17] сохранение после разгрузки в метастабильном состоянии фаз высокого давления циркония.

Результаты первых экспериментов по нагружению в сферических герметичных ампулах сохранения образцов минералов и горных пород с целью экспериментальной проверки возможного сохранения в метастабильном состоянии новых высокоплотных фаз, получения рентгеноаморфных материалов и изучения кинетики твердофазных химических реакций в ранее экспериментально необследованном диапазоне давлений, температур и длительностей импульса нагрузки представлены в [20, 21].

Следует подчеркнуть, что, в отличие от плоских, цилиндрических и квазицилиндрических ампул сохранения, в которых рано или поздно начинают проявляться эффекты боковой или торцевой разгрузки, искажающие одномерность течения, сферические ампулы принципиально лишены указанного недостатка. Достоинство такой схемы нагружения — реализация в каждом эксперименте широкого диапазона состояний с параметрами нагружения, возрастающими по радиусу к центру ампулы.

Использование сферических систем большего габарита позволяет достигать необходимые давления, температуры или удельные внутренние энергии на более высоких относительных радиусах, увеличивать при необходимости длительность импульса нагрузки. Несомненный научный и практический интерес эксперименты со сферическими ампулами сохранения представляют для решения проблем компактирования и спекания высокопрочных и тугоплавких керамик и других материалов, для получения которых требуются высокие плотности энергии.

Таким образом, в данной работе дан краткий обзор разработанных новых типов взрывных устройств и подходов (ПЯВ), с нашей точки зрения, существенно расширяющих экспериментальные возможности работ по динамическому компактированию и синтезу новых материалов, обозначены направления их возможных усовершенствований. Перечислены и намечены основные направления дальнейших экспериментальных исследований с использованием новых методических возможностей, а именно:

- получение и исследование субмикроструктурных материалов при сверхвысокоскоростной закалке расплавов в волнах напряжений;
- синтез новых фаз высокого давления в металлах, сплавах, механических смесях и химических соединениях, включая минералы и горные породы;
- исследование твердофазных химических реакций в минералах и горных породах в ранее экспериментально необследованном диапазоне давлений, температур и длительностей импульса нагрузки;
- ударно-волновое компактирование и спекание высокопрочных тугоплавких керамик;
- компактирование и нормализация высокотемпературных сверхпроводящих материалов, порошков ультрадисперсного алмаза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Прюммер Р. Обработка порошкообразных материалов взрывом: Пер. с нем.— М.: Мир, 1990.
2. Mitchell A. C., Nellis W. J. Diagnostic system of the Lawrence Livermore National Laboratory two-state light-gas gun // *Rev. Sci. Instrum.*— 1981.— 51, N 3.— P. 347—359.
3. Nellis W. J., Gourdin W. H., Marle M. B. Shock-induced melting and rapid solidification // *Shock Waves in Condensed Matter.*— Elsevier Science Publishers B. V., 1988.
4. Nellis W. J., Seaman C. L., Maple M. B. et al. Shock compaction of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  and  $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  powders in a metal matrix // *High Temperature Superconducting Compounds: Processing & Related Properties*/Ed. S. H. Whang, A. Das Gupta. The Minerals, Metals & Materials Society, 1989.— P. 249—264.
5. Neumeier J. J., Nellis W. J., Maple M. B. et al. Metastable A15 phase  $\text{Nb}_3\text{Si}$  synthesized by high dynamic pressure // *High Pressure Res.*— 1989.— 1.— P. 267—289.
6. Weir S. T., Nellis W. J., Kramer M. J. et al. Increase in the fluxpinning energy of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  by shock compaction // *Appl. Phys. Lett.*— 1990.— 56(20), N 14.— P. 2042—2044.
7. Владимиров А. С., Волошин П. П., Ногин В. Н. и др. Ударная сжимаемость алюминия при давлениях  $p > 1$  Гбар // *Письма в ЖЭТФ.*— 1984.— 39, № 2.— С. 69—72.
8. Ragan III C. E., Silbert M. G., Diven B. C. Shock compression of molybdenum to 2.0 TPa by means of a nuclear explosive // *J. Appl. Phys.*— 1977.— 48.— P. 2860—2870.

9. Mitchell A. C., Nellis W. J., Heinle R. A. et al. Shock-impedance match experiments at pressure to 2,5 TPa (25 Mbar) // *Physica*.— 1980.— 139, 140B.— P. 591—594.
10. Sawaoka A. B., Akashi T. High Density Compacts. US Patent N 4655830.— 1987.
11. Yu L. H., Meyers M. A., Thadhani N. N. Reaction-assisted shock consolidation of RSR Ti—Al alloys // *J. Mater. Res.*— 1990.— 5, N 2.— P. 302—312.
12. Chokshi A. H., Meyers M. A. The prospects for superelasticity at high strain rates: preliminary considerations and an example // *Scripta Metallurgica et Materialia*.— 1990.— 24, N 4.— 1990.— P. 605—610.
13. Забабахин Е. И., Забабахин И. Е. Явления неограниченной кумуляции.— М.: Наука, 1988.
14. Бахрах С. М., Ковалев Н. П., Надыкто Б. А. и др. Исследование пластических и прочностных свойств меди в условиях всестороннего растяжения // *Докл. АН СССР*.— 1974.— 215, № 5.— С. 1090—1093.
15. Козлов Е. А. Экспериментальная проверка гипотезы Е. И. Забабахина об ограниченности кумуляции энергии на фронте сферически сходящейся ударной волны в среде с фазовыми переходами // *Докл. на Забабахинских Научных Чтениях. ВНИИТФ, Челябинск, 1990. Report on Int. Conf. «Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena»*, Aug. 12—16, 1990, San-Diego, CA, USA.
16. Козлов Е. А. Особенности ударной сжимаемости, макрокинетика фазовых превращений и откольное разрушение железа в различных фазовых состояниях // *Материалы Междунар. конф. «Новые методы в физике и механике деформируемого твердого тела»*.— Череп., 1990.— 2.
17. Kozlov E. A., Teplynskaya V. M., Orlov V. K. et al. Phase transitions and spall fractures of zirconium under explosive loading // *J. de Physique IV, Coll. C3, suppl. au J. de Physique III*.— 1991.— 1.— P. C3—675—680.
18. Kovalenko G. V., Kozlov E. A., Kuropatenko V. F. et al. Computational-experimental investigation of wave processes in metal balls under their loading by spherically converging shock waves // *Bull. Am. Phys. Soc.*— 1991.— 36, N 6.— P. 1831.
19. Kozlov E. A., Litvinov B. V., Kabin I. G. et al. Obtaining and investigation of submicrocrystal structure materials in experiments on loading of metal spheres by spherical converging shock waves // *Ibid*.
20. Литвинов Б. В., Козлов Е. А., Жугин Ю. И. и др. О новых экспериментальных возможностях изучения полиморфных и фазовых превращений, твердофазных химических реакций в минералах и горных породах // *Сборник докл. V Всесоюз. совещ. по детонации, Красноярск, 5—12 авг., 1991.*— 1.— С. 197—198.
21. Литвинов Б. В., Козлов Е. А., Жугин Ю. И. и др. Фазовые превращения в минералах и горных породах // *Тез. докл. XII Всесоюз. совещ. по экспериментальной минералогии, Миасс, 24—26 сент., 1991.*— С. 82—83.

г. Челябинск

Поступила в редакцию 13/XII 1991

УДК 536.463

В. Н. Охитин

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СЛАБОЙ ОДНОМЕРНОЙ ДЕФЛАГРАЦИИ

Проведен анализ результатов численного решения одномерной задачи о слабой дефлаграции газовых смесей для всех видов симметрии. Предложено граничное условие, позволяющее исключить особенности в окрестности фронта ударной волны при численном интегрировании уравнений для малых скоростей фронта пламени. Получены аналитические соотношения для параметров возникающего течения, аппроксимирующие результаты численного решения с высокой точностью вплоть до значений видимой скорости пламени, в 1,5—2 раза превышающей скорость звука в исходной смеси.

В [1] проанализировано численное решение и получены аналитические соотношения для параметров одномерной дефлаграции газовых смесей при видимой скорости фронта пламени  $U > (0,2 \div 0,3)D$ , где  $D$  — скорость детонации в смеси. В принципе, численное решение задачи может быть получено для любой скорости дефлаграции, однако в сферическом и цилиндрическом случаях при очень малой скорости распространения пламени (менее  $0,3 c_1$  и  $0,10 c_1$  соответственно для сферической и цилиндрической симметрий,  $c_1$  — скорость звука в исходной смеси) возникают некоторые вычислительные трудности, связанные с дивергентным характером течения среды.

© В. Н. Охитин, 1993.