

родным балансом (охлаждающая среда — газообразный аргон), приведенные в работе [6].

Оценка в рамках термодинамического подхода температуры для точек *A* и *B* рис. 2 в конце третьей стадии взрыва (до заметного теплообмена со стенками камеры) дает значения  $T \approx 550$  и  $450^\circ\text{C}$  соответственно. Однако известно, что начало интенсивного окисления детонационного углерода кислородом воздуха при нормальном давлении происходит при  $T \approx 350^\circ\text{C}$ . Такое отличие может объясняться наличием большого количества водяного пара и быстрым спадом температуры в камере.

В работе [9] предпринята попытка путем равновесных термодинамических расчетов изучить влияние газов на выход конденсированных продуктов детонации. Результаты этих расчетов также приведены на рис. 3. Видно, что, хотя расчет качественно правильно описывает процесс (увеличение выхода КУ с ростом теплоемкости среды), количественное согласие отсутствует. Процессы синтеза и сохранения КУ протекают в сильно неравновесных условиях, что накладывает существенное ограничение на термодинамические расчеты, подразумевающие достижение равновесных состояний.

Автор благодарен В. М. Титову за внимание к работе, В. П. Фадеевой, а также Ф. А. Сагдиеву за помощь в проведении экспериментов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Апин А. Я., Велина Н. Ф., Лебедев Ю. А. О полном использовании энергии взрыва // ПМТФ.— 1962.— № 5.— С. 96—106.
2. Ornellas D. L. Calorimetric determinations of the heat and products of detonation for explosives. UCRL-52824, Lawrence Livermore National Lab. (USA), 1982.
3. Волков К. В., Даниленко В. В., Елин В. П. Синтез алмаза из углерода продуктов детонации ВВ // ФГВ.— 1990.— 26, № 3.— С. 123—125.
4. Саввакин Г. И., Трефилов В. И. Формирование структуры и свойств ультрадисперсных алмазов при детонации в различных средах конденсированных углеродосодержащих взрывчатых веществ с отрицательным кислородным балансом // Докл. АН СССР.— 1991.— 321, № 1.— С. 99—103.
5. Лямкин А. И., Петров Е. А. и др. Получение алмазов из взрывчатых веществ // Там же.— 1988.— 302, № 3.— С. 611—613.
6. Volk F., Schedlbauer F. Detonation products of less sensitive high explosives formed under different pressures of argon and in vacuum: Prepr. Papers 9th Symp. on Detonation.— Portland, 1989.— P. 384—392.
7. Петров Е. А., Сакович Г. В., Брыляков П. М. Условия сохранения алмазов в процессе детонационного получения // Докл. АН СССР.— 1990.— 313, № 4.— С. 862—864.
8. Ершов А. П., Куершток А. Л. О температуре продуктов детонации при взрыве в камере // ФГВ.— 1986.— 22, № 3.— С. 118—122.
9. Бабушкин А. Ю., Лямкин А. И., Ставер А. М. Влияние газов на выход конденсированных продуктов детонации углеродосодержащих взрывчатых веществ // Пятое Всесоюз. совещ. по детонации: Сб. докладов.— Красноярск, 1991.— Т. 1.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 25/XII 1992

УДК 531.781

В. А. Туманов, В. Н. Исаев, С. С. Бацанов

#### *pV*-ЗАВИСИМОСТИ В МЕТОДЕ ДИНАМИКО-СТАТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ

Методом динамико-статического сжатия проведены измерения *pV*-зависимостей в цилиндрических ампулах сохранения на стадии разгрузки. Предложена простая модель для количественной оценки остаточного давления.

По методу динамико-статического сжатия (ДСС) нагружаемое тело испытывает последовательное действие ударных волн и гидростатического давления [1—5]. В проведенных исследованиях динамическое

© В. А. Туманов, В. Н. Исаев, С. С. Бацанов, 1993.

сжатие осуществлялось в цилиндрических ампулах, где давление можно оценить по свойствам обжимаемого вещества и характеристикам использованного ВВ. Статическое сжатие реализовывалось за счет давления фазового превращения передающей среды. Очевидно, что данный процесс — не единственный источник остаточного статического давления: оно может возникнуть и без фазового перехода в рабочем теле за счет разностей сжимаемости этого тела и материала ампулы сохранения.

Вещество	$\Delta V$ , %	$p_{\Delta V}$ , кбар	$p_{\text{выд}}$ , кбар	$\Sigma p$ , кбар
CsCl	3,5	7,2	14,7	22
CsI	10,2	18,0	7,8	26
KBr	19,0	14,0	11,3	25

Настоящая работа посвящена измерению  $pV$ -зависимостей в цилиндрических ампулах сохранения при ДСС на стадии разгрузки и механической трактовке данного процесса.

Механические измерения проводились в цилиндрических ампулах с отношением диаметра к высоте  $\sim 0,7$  [5], которые закрывались снизу не винтовой пробкой, а конической с системой круговых канавок. Варьируя конусность пробки, число и глубину выемок, удалось получить такие прочностные характеристики соединения, при которых расширение рабочего тела при разгрузке приводило к выдвиганию пробки на определенную величину, откуда определялось расширение сжатого образца  $\Delta V$ . Измерения выдвигания пробки показали, что при добавлении к исследуемому веществу жесткого тела, не испытывающего в данных условиях заметных объемных изменений величина  $\Delta V$  уменьшалась. Следовательно, ампула сохранения с самотормозящейся конической пробкой может служить волюмометром при высоких давлениях.

В качестве объектов исследования в таких устройствах выбраны KBr (фазовый переход при 17,6 кбар с  $\Delta V = 10,6\%$ ), CsCl и CsI — вещества, не имеющие фазовых превращений [6] и различающиеся по своей сжимаемости, причем в последнем случае она максимальна среди всех щелочных галогенидов [7].

В таблице приведены результаты измерений в ампулах-волюмометрах, подвергнутых взрывному воздействию с использованием сплавов ТГ 40/60, а также расчетные величины давлений, соответствующих данному значению  $\Delta V$ , вычисленные по уравнению Мэрнагана [8]. После проведения измерений верхняя часть ампулы отрезалась на станке, образец извлекался (вымывался водой) и на 100-тонном прессе штоком выдавливалась пробка. Давление  $p_{\text{выд}}$ , при котором это происходило (см. таблицу), характеризует нижнюю границу остаточного статического давления, развивающегося в ампуле.

После выпрессовки пробок из оставшихся цилиндрических частей ампул сохранения приготовлены образцы для испытаний на разрывной машине: среднее из измерений четырех образцов дало  $\sigma_{\text{разр}} = 14,5 \text{ кбар} \pm \pm 3\%$ . Эта величина — верхний предел избыточного давления, которое выдерживает без разрушения использованная ампула сохранения при нормальных условиях. Следовательно, экспериментально измеренное расширение рабочего тела при разгрузке соответствует давлениям, большим, чем выдерживает ампула без разрушения при нулевом давлении. Очевидно, что это может быть только в том случае, если остаточное давление внутри ампулы возникает на волне разгрузки, когда динамическое давление (вне ампулы) не равно нулю.

Для количественной оценки величины и режима возникновения остаточного давления в ампуле сохранения предлагается следующая модель.

Пусть ампула представляет собой сферу объемом  $W_0$ , состоящую из оболочки объемом  $V_0$  и внутренней полости  $w_0$ , заполненной рабочим телом, причем вся система сжимается квазистатически при нормальной

температуре. Тогда при наложении давления  $p$  объем рабочего тела, согласно уравнению Мэрнагана,

$$v = v_0 (1 + p_0/b_0)^{-1/b'_0}, \quad (1)$$

а разность объемов монолитного шара и оболочки находится из формулы

$$w = (W_0 - V_0) (1 + pB'_0/B_0)^{-1/B'_0}. \quad (2)$$

Здесь  $b_0$  и  $B_0$  — модули объемного сжатия рабочего тела и оболочки;  $b'_0$  и  $B'_0$  — их производные по давлению.

При спаде давления оболочка и наполнитель будут расширяться по-разному из-за различия  $b_0$  и  $B_0$  и, следовательно, давление внутри оболочки  $p_{вн}$  будет отличаться от давления снаружи ампулы  $p_n$ . Практический интерес представляет случай, когда  $B_0 > b_0$  и, следовательно, при разгрузке  $w < v$ . Если оболочка ампулы достаточно жесткая, рабочее тело вынуждено занимать объем  $w$ , для чего требуется дополнительное (внутреннее) давление

$$p_{вн} = \frac{b_0}{b'_0} [(v/w) b'_0 - 1], \quad (3)$$

которое и будет компенсироваться напряжением оболочки. Тогда с учетом упругого растяжения оболочки можно записать

$$p_{вн} - \frac{2}{3} \sigma \ln \frac{W}{w} = p_n \quad (4)$$

при условии, что напряжение в оболочке  $\sigma = E\delta$ , где  $E$  — модуль Юнга и  $\delta$  — относительное удлинение (принятое равным 0,05), меньше предела текучести материала ампулы.

Задав кривую падения внешнего давления в виде

$$p_n = p e^{-\tau},$$

где  $\tau$  — относительное время разгрузки, и решая уравнения (3) и (4) для каждого момента времени  $\tau$ , получаем семейство кривых  $p = f(\tau)$  для случая отсутствия фазового перехода в рабочем теле (рис. 1) и при наличии полиморфного превращения в передающей среде (рис. 2).

В расчетах использованы следующие значения механических характеристик материалов: в первом случае для оболочки  $E = 200$  и  $\sigma = 1,3$  ГПа, для рабочего тела  $b_0 = 12,2$  ГПа и  $b'_0 = 5,6$  (CsI), во втором — (модельное превращение,  $t$ ) характеристики оболочки те же, а для рабочего тела принято  $p_t = 5$  ГПа,  $b_0 = 30$  ГПа,  $b'_0 = 5$  и  $b_0 = 100$  ГПа,  $b'_0 = 4$  для фаз низкого и высокого давления соответственно.

Как видно из графиков, внутреннее избыточное давление возникает непосредственно в начале разгрузки, и оболочка может разрушиться уже

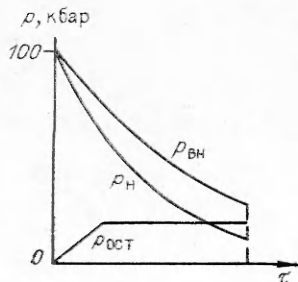


Рис. 1. Кривые разгрузки для ампулы с CsI. Разрыв (штриховая линия) при  $p_{вн} = 38$  и  $p_{ост} = 17$  кбар.

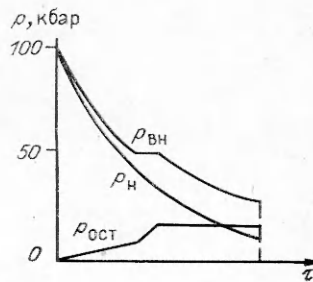


Рис. 2. Кривые разгрузки для ампулы с модельным веществом, имеющим фазовый переход при 50 кбар. Разрыв при  $p_{вн} = 26$  и  $p_{ост} = 17$  кбар.

на волне разгрузки при  $p_{нн} = 26$  и  $p_n = 9$  кбар. Наличие фазового превращения в рабочем теле ускоряет разрыв оболочки под действием внутреннего давления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бацанов С. С. Неорганическая химия высоких динамических давлений // Успехи химии.— 1986.— 55.— С. 579.
2. Бацанов С. С., Болховитнинов Л. Г., Мартынов А. И. О сохранении метастабильных фаз высокого давления при ударном сжатии // Письма в ЖТФ.— 1990.— 16. № 2.— С. 53.
3. Бацанов С. С., Василевский С. В., Гурьев Д. Л. и др. Фазовые превращения В при динамико-статическом сжатии // Хим. физика.— 1991.— 10.— С. 286.
4. Бацанов С. С., Вазюлин В. А., Копанева Л. И. и др. Ударное прессование алмазного порошка // ФГВ.— 1991.— 27, № 4.— С. 139.
5. Бацанов С. С., Вазюлин В. А., Дидюков А. И. и др. Модифицирование материалов в условиях динамико-статического сжатия // V Всесоюз. совещание по детонации.— Красноярск, 1991.— Т. 1.— С. 48.
6. Тонков Е. Ю. Фазовые диаграммы соединений при высоком давлении.— М.: Наука, 1983.— С. 101, 165.
7. Бацанов С. С. Особенности металлизации неорганических веществ под давлением // ЖНХ.— 1991.— 36.— С. 2243.
8. Murnaghan F. The compressibility of media under extreme pressures // Proc. Nat. Acad. Sci. USA.— 1944.— 30.— P. 244.

*п. Менделеево*

*Поступила в редакцию 25/XII 1991,  
после доработки — 16/XI 1992*

УДК 662.22 : 662.215.12

*А. Ю. Белоус, Э. А. Петров*

### МЕТОД РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ СГОРАНИЯ АЛЮМИНИЯ В ПРОДУКТАХ ВЗРЫВА МЕТАЛЛИЗОВАННОГО СОСТАВА

Предложен расчет динамики реализации энергии металлизированных взрывчатых составов, базирующийся на построении кривых скорости и ускорения радиального расширения цилиндрической оболочки, позволяющий оценить эффективную долю прореагировавшего алюминия.

Проблема изучения поведения алюминиевых добавок во взрывчатых составах имеет важное практическое значение. В работах, посвященных этому вопросу [1—4], отмечаются трудности при расчете кинетики сгорания алюминия и его вклада в формирование ударных и детонационных волн, в мощность процесса взрыва, что связано с отсутствием методик разграничения кратковременных интервалов выделения химической энергии компонентами взрывчатых составов (ВС).

Cylinder-test — одна из методик оценки эффективности ВС по кривым разгона цилиндрической оболочки. Несмотря на высокую точность и непрерывность регистрации данных, эта кривая малоинформативна и нечувствительна к компонентному составу взрывчатой смеси.

Цель данной работы — разработка нового метода обработки экспериментальных данных и оценка доли прореагировавшего алюминия по кривым радиального расширения цилиндрической оболочки взрывом. При решении поставленной задачи необходимо учитывать, что экспериментальные данные могут содержать случайные помехи, не связанные с процессом выделения энергии. К случайным шумам на кривых расширения приводят, например, разноплотность ВС, отклонение от строгой геометрической формы и локальная разнородность оболочки. Чтобы этого избежать, была использована процедура отфильтровывания шумов

© А. Ю. Белоус, Э. А. Петров, 1993.

7\*

99