

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., Болховитников 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



при помощи сглаживающих кубических сплайнов [5]. По выполнении сглаживания экспериментальные данные дифференцируются и строятся кривые скорости и ускорения расширяющейся оболочки во времени  $\tau(u(\tau)$  и  $a(\tau)$ ).

Поскольку производная  $a(\tau)$  усиливает закономерные перегибы и экстремумы линии  $u(\tau)$ , а удельная кинетическая энергия рассчитывается по формуле

$$E(\tau) = \frac{1}{2} \int_{\tau_1}^{\tau} \frac{\partial(u^2)}{\partial t} dt, \quad (4)$$

вид функции  $a(\tau)$  выявляет ярко выраженные интервалы реализации химической энергии, выделенной на данной стадии взрыва.

Изучение модельных составов на взрывчатой основе октоген — тротил с содержанием Al от 0 до 20% показало, что кривые  $a(\tau)$  подразделяются на уни- и бимодальные. Первые в данном случае соответствуют неметаллизированному ВС (см. рисунок, 1), а вторые — составам, содержащим добавку алюминия (2). Первая мода приходится на начало временного интервала, а следующая — на восьмую микросекунду. Амплитуды мод зависят от количества сгоревшего Al при сохранении характерных времен реализации энергии. Изменение компонентного соотношения ВС за счет уменьшения основы и увеличения содержания металла (свыше 30%) приводит к унимодальности кривой  $a(\tau)$  с резким снижением начальной моды. Дисперсность частиц алюминия также оказывает влияние на амплитуды мод (кривые 2, 3). Наиболее активно горит алюминиевый сферический порошок марки АСД-4.

Как видно из рисунка, кривые 2, 3 расположены выше, хотя при равных массах заряда у металлизированного состава объемная доля взрывчатой основы меньше, чем у неметаллизированного. Такое расширение площадей под линиями 2, 3 с учетом (4) свидетельствует о реализации некоторой дополнительной химической энергии. Поскольку алюминий — единственный отличительный компонент изучаемых ВС, то энергия, выделяющаяся от его окисления, и есть та искомая дополнительная энергия. Разности площадей под кривыми 1, 2 и 3 говорят о том, что основная масса металла сгорает на 7–10 микросекунде, хотя увеличение начальной моды свидетельствует о вступлении алюминия в реакцию уже на второй микросекунде.

Проведя сравнение результатов двух составов (содержащего добавку алюминия и без него), получим вклад металла в энергию ВС

$$E_{Al}(\tau) = E_{BO+Al}(\tau) - E_{BO}(\tau),$$

где  $E_{BO+Al}(\tau)$ ,  $E_{BO}(\tau)$ ,  $E_{Al}(\tau)$  — удельные кинетические энергии оболочки, приобретенные в результате соответственно взрыва металлизированного ВС, основы и сгорания алюминия.

Следует обратить внимание на тот факт, что для определения необходимо сохранить плотность состава и соотношение компонентов ВО. Для выполнения данных условий достаточно заменить алюминий инертной добавкой фтористого лития, обладающего близкими теплофизическими свойствами.

Кратко, метод оценки эффективной доли прореагировавшего алюминия, основанный на анализе кривых  $u(\tau)$  и  $a(\tau)$ , состоит в следующем:

- 1) снятие экспериментальных кривых расширения оболочки для заданных составов;
- 2) проведение фильтрации экспериментальных данных от случайных помех методом сглаживающего кубического сплайна;
- 3) дифференцирование сглаженной кривой расширения оболочки;
- 4) определение амплитуд мод и характерных времен для оценки энергетического вклада компонентов состава по кривой  $a(\tau)$ ;
- 5) вычисление удельных кинетических энергий  $E_{\text{ВО}+\text{Al}}$  и  $E_{\text{ВО}}$ ;
- 6) определение эффективной доли алюминия в ВС.

Таким образом, предлагаемый метод обработки экспериментальных данных позволяет по-новому рассмотреть вопрос кинетики сгорания алюминия в продуктах взрыва.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьева Е. А. Скачки конденсации при горении газозвесей частиц алюминия за ударной волной // Хим. физика.— 1989.— 8. № 4.— С. 533.
2. Finger M., Hornig H. C., Lee E. L. et al. Metal acceleration by composite explosives // Fifth Symp. (Int.) on Detonation.— Pasadena, 1970.— P. 55.
3. Bjarnholt G. Effects of aluminum and lithium flow ride admixture on metal acceleration ability of Comp. B // Sixth Symp. (Int.) on Detonation.— Coronado, 1976.— P. 510.
4. Имховик Н. А., Соловьев В. С. Термодинамический расчет параметров детонации смесей ВВ с алюминием // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация.— Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1989.
5. Воскобойников Ю. Е., Преображенский П. Г., Седельников А. П. Математическая обработка эксперимента в молекулярной газодинамике.— Новосибирск: Наука, 1984.— 239 с.

г. Москва

Поступила в редакцию 1/VII 1991,  
после доработки — 4/ XI 1992