

## ЛИТЕРАТУРА

1. Морохов И. Д. и др. Физические явления в ультрадисперсных средах.— М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Котов Ю. А., Яворский Н. А. Физика и химия обработки материалов, 1974, 4, 24.
3. Анискин А. И. // Детонация и ударные волны. Материалы VIII Всесоюз. симп. по горению и взрыву.— Черноголовка, 1986.
4. Кук М. А. Наука о промышленных взрывчатых веществах.— М.: Недра, 1980.
5. Дубинина А. И., Ахтямов Р. А., Трусов Л. И. Кристаллография, 1981, 26, 3, 637.
6. Морохов И. Д., Трусов Л. И., Лаповок В. И. и др. Докл. АН СССР, 1980, 251, 79.

г. Красноярск

Поступила в редакцию 26/VIII 1988,  
после доработки — 10/VIII 1989

УДК 534.222.2

А. В. Дубовик

### СПОСОБ ОПИСАНИЯ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТВЕРДЫХ ВВ

Выполнен анализ фрикционного разогрева и воспламенения на плоскостях скольжения между частицами твердых ВВ во фронте ударной волны (УВ) и рассчитаны критические давления инициирования УВ пористых зарядов тротила, гексогена и тэна. Решающая роль механизма трения — скольжения в возбуждении взрыва в твердых ВВ при ударе подчеркивалась в работах [1—3].

Из-за случайной ориентации зерен фронт УВ в заряде пористого ВВ представляется в виде суперпозиции множества элементарных ударно-волновых возмущений, распространяющихся от зерна к зерну. Траектории этих возмущений не прямолинейны, и вызванные ими массовые движения частиц (струй) не скоррелированы между собой, по крайней мере, в течение малого времени  $\sim r/U$  ( $r$  — размер частиц,  $U$  — скорость УВ в заряде ВВ).

При выходе элементарной УВ на свободную поверхность зерна последняя, а затем и все зерно целиком (или его отколовшаяся часть) приходят в движение с удвоенной скоростью массового потока  $u_0$ . Двигаясь вдоль поры до момента столкновения с расположенным впереди зерном, струя ВВ взаимодействует боковыми сторонами с окружающими зернами вещества, часть которых в рассматриваемый момент времени может быть еще неподвижна. Максимальная сила трения на возникающих фрикционных контактах достигает предела прочности зерна на сдвиг  $\sigma/\sqrt{3}$  (выполняется условие текучести Мизеса), что позволяет рассматривать эти контактные границы как плоскости скольжения, ориентированные преимущественно по нормали к фронту УВ в заряде ВВ.

В случае открытой пористости заряда продолжительность фрикционного контакта составляет  $t_0 \neq r/2u_0$ , при замкнутой пористости  $t_0 = d/u_0$  ( $d$  — размер пор).

Температуру на плоскостях скольжения между зернами ВВ считаем по формуле Карслоу — Егера [2] с тепловым источником  $2u_0\sigma(T)/\sqrt{3}$

$$T(t) = T_0 + (u_0/\sqrt{3\pi h_0}) \int_0^t \sigma(T(\tau))(t-\tau)^{-1/2} d\tau. \quad (1)$$

Здесь  $h_0 = \lambda_0 \rho_0 c_v^0$  — тепловая активность ВВ.

В случае линейной связи  $\sigma(T) = \sigma_0(T_{пл} - T)/(T_{пл} - T_0)$  ( $T_{пл}$  — температура плавления ВВ, зависящая от давления:  $T_{пл} = T_{пл}^0 + \beta p_0$ ) запись (1) является линейным интегральным уравнением, решение которого,

полученное методом преобразований Лапласа, есть

$$T(t) = T_0 + \Delta T_{\text{пл}} [1 - \psi(\mu\sqrt{t})], \quad (2)$$

$$\psi(x) = e^{x^2} \operatorname{erfc} x, \quad \Delta T_{\text{пл}} = T_{\text{пл}} - T_0, \quad \mu = (\sigma_0 u_0 / \Delta T_{\text{пл}}) (3h_0)^{-1/2}.$$

Записывая ударную адиабату сплошного ВВ в виде  $U = c_0 + bu$ , найдем связь  $u_0$  с давлением в УВ  $p_0$  в частицах ВВ

$$u_0 = (c_0/2b) [(1 + 4bp_0/\rho_0 c_0^2)^{1/2} - 1],$$

где  $c_0$  — объемная скорость звука в ВВ;  $b = 2$  для  $p_0 < \rho_0 c_0^2$ . Таким образом, формула (2) устанавливает зависимость температуры ВВ от времени с параметром  $p_0$ .

С помощью (2) рассчитаем долю  $f \leq i$  периода индукции адиабатического теплового взрыва за время  $t_0$ . Значение  $p_0$ , при котором  $f = 1$ , примем за критическое давление УВ, отнесенное к сплошному ВВ ( $p_0^*$ ):

$$(QzE/Rc_V^0) \int_0^{t_0} T(t)^{-2} \exp(-E/RT(t)) dt = 1. \quad (3)$$

Здесь  $Q, z, E$  — реакционно-кинетические характеристики термораспада ВВ;  $R$  — газовая постоянная.

Из анализа (3) следует, что, поскольку предполагалось  $u_0 = \text{const}$  (за время  $t_0$  УВ не затухает), значения  $p_0^*$  для ВВ с открытой пористостью не должны зависеть от относительной плотности заряда  $\delta = \rho_0/\rho_0 < 1$ , если размер частиц постоянный, т. е. они не разрушаются на фронте УВ. В этом случае  $p_0^*$  определяются исключительно физико-химическими свойствами ВВ и уменьшаются с размером зерен в заряде. Если же имеет место дробление частиц ВВ, то  $p_0^*$  возрастают с уменьшением размера образующихся осколков.

Механизм разрушения зерен ВВ на фронте УВ очевидным не представляется. Однако из-за наличия свободных объемов в пористом веществе можно отдать предпочтение его откольному варианту. Из простых представлений об отколе следует, что дисперсность осколков тем выше, чем больше начальный размер зерен ВВ (увеличивается дефектность их структуры) и пористость заряда (возрастает степень расширения частиц в поры). Отсюда можно вывести следующую формулу для размера осколков:

$$r = r_0^* \exp[-(r_0/r_0^* - 1)\sqrt{(1 - \delta)/\delta}], \quad (4)$$

справедливую для  $r_0 > r_0^*$ . При  $r_0 < r_0^*$  полагаем  $r = r_0$ . В (4)  $r_0^*$  — максимальный начальный размер частиц ВВ, не разрушающихся на фронте УВ при заданных условиях эксперимента. Анализируя условия опытов [4—6], в которых получены данные по ударно-волновой чувствительности ряда твердых ВВ, можно принять для них  $r_0^* = 0,1$  мм.

В таблице приведены необходимые для расчетов физико-химические характеристики ВВ, рассчитанные по (2)—(4) величины  $p_0^*$  для зарядов с открытой пористостью и экспериментальные значения [6] критических давлений инициирующих УВ в зернах пористых ВВ.

Пересчитаем  $p_0^*$  на давления  $p_*$  на равновесных ударных адиабатах пористых ВВ и сравним их с данными по критическим давлениям инициирования, измеренными в [4, 5]. В этих экспериментах генератор УВ отделялся от заряда ВВ медной пластиной малой толщины. На  $p, u$ -диаграмме величина  $p_*$  находится в точке пересечения ударной адиабаты пористого ВВ и изоэнтропы разгрузки меди. Адиабата ВВ записывалась в виде, предложенным в [4]:

$$u_*/u_0^* = (p_*/p_0^*) (1 + \alpha p_0^*/p_*)^{1/2}, \quad \alpha = 6p_0^* (1 - \delta) / 7\rho_0 \delta u_0^{*2}. \quad (5)$$

В акустическом приближении изоэнтропа разгрузки меди, проходящая через точку  $p_0^*$  на адиабате сплошного ВВ, описывается выражением

$$u_*/u_0^* = 1 + \varepsilon (1 - p_*/p_0^*), \quad \varepsilon = p_0^*/u_0^* (\rho c)_m. \quad (6)$$

ВВ	$r_0$ , мм	$\delta$	$\frac{c_0 \sigma_0}{\Delta T_{пл}^0} \times \frac{1}{2} \times 10^6, c^{-1/2}$	$\frac{Q}{кг}$	$\frac{E}{кг \cdot моль}$	$lgz, c^{-1}$	$p_0^*$ , ГПа
Тэн Гексоген	0,1	<0,95 *	2,05	5,75	165	15,6	1,30
	0,1	<0,95 *	2,36	5,44	174	15,6	1,49(1,4)***
Тротил	0,1	<0,95 *	1,97	4,23	225	19,0	1,77(1,7)***
	0,6	0,60					6,76
	0,6	0,75					3,40
	0,6	0,90					2,34
	0,6	0,97					2,00
	0,6	<0,95 **					1,47

\* Диапазон  $0,5 < \delta < 0,95$ .

\*\* В предположении о неразрушаемости частиц;  $\beta = 0,3$  К/МПа для тэна и тротила,  $\beta = 0,25$  К/МПа для гексогена.

\*\*\* В скобках данные эксперимента, без скобок — теория.

Подстановка (6) в (5) позволяет найти

$$\frac{p_*}{p_0^*} = \frac{\alpha + 2\varepsilon(1 + \varepsilon)}{2(1 - \varepsilon^2)} \left[ \left( 1 + \frac{4(1 + \varepsilon)^2(1 - \varepsilon^2)}{(\alpha + 2\varepsilon(1 + \varepsilon))^2} \right)^{1/2} - 1 \right]. \quad (7)$$

На рисунке линиями показаны рассчитанные по (7) зависимости  $p_*(\delta)$ , а точками — экспериментальные данные [4, 5] для тэна (1), гексогена (2) и тротила 3, 4 ( $r_0$ , мм: 3 — 0,1, 4 — 0,6). Наблюдается хорошее совпадение сравниваемых величин  $p_*$  вплоть до  $\delta_0 = 0,95$ . При  $\delta > \delta_0$  поры в зарядах ВВ изолированы и экспериментальные значения  $p_*$  больше теоретических. Расчет по (2) — (7) для ВВ с замкнутой пористостью при  $d = 2r(1 - \delta)/3\delta$ , дает значения  $p_*$ , заметно превышающие экспериментальные. Очевидно, при  $\delta > \delta_0$  вступают в силу иные, отличные от фрикционного, механизмы ударно-волнового разогрева и воспламенения ВВ. Обратим внимание на следующие результаты работы.

1. Теория объясняет существование минимума на зависимости  $p_*(\delta)$ , для  $r_0 > r_0^*$  (функция  $p_0^*(\delta)$  монотонно убывает при  $\delta < \delta_0$ ).

2. Малые индукционные времена теплового взрыва ( $t_0 = 0,3 \div 0,4$  мкс для  $r_0 = 0,1$  мм) свидетельствуют о высокой эффективности фрикционного механизма разогрева ВВ на фронте УВ.

3. Близкие значения показателей чувствительности твердых ВВ (ударно-волновой характеризуемой величиной  $p_0^*$ , и механической, характеризуемой критической величиной максимума напряжений вдоль радиуса ударника  $p_1$  [7]) могут служить свидетельством общности механизмов возбуждения взрыва при обоих видах внешних воздействий ( $p_0^* \approx p_1 \approx 1 \div 2$  ГПа).

Отметим также, что для упрощения процедуры расчетов  $p_0^*$  можно воспользоваться найденным нами степенным представлением функции  $\psi(x) \approx (1 + x)^{-1,2}$ , справедливым для всех  $x > 0$  с погрешностью не более 5 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Афанасьев Г. Т., Боболев В. К. Иницирование твердых ВВ ударом. — М.: Наука, 1968.
- Амосов А. П., Бостанджиян С. А., Козлов В. С. ФГВ, 1972, 8, 3, 362.
- Дубовик А. В., Лисанов М. В. ФГВ, 1985, 21, 4, 87.
- Афанасенков А. Н., Богомолов В. М., Воскобойников И. М. // Взрывное дело, № 68/25. — М.: Недра, 1970.

5. Беляев А. Ф., Боболев В. К. и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв.— М.: Наука, 1973.
6. Афанасенков А. Н., Воскобойников И. М. Хим. физика, 1984, 3, 2, 272.
7. Дубовик А. В. Докл. АН СССР, 1986, 286, 2, 377.

г. Москва

Поступила в редакцию 13/III 1989

УДК 662.215

*Е. П. Беликов, В. Е. Храповский, Б. С. Ермолаев, А. А. Сулимов*

### ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ВЗРЫВА В ПОРОШКООБРАЗНОЙ МОДЕЛЬНОЙ СМЕСИ ПЕРХЛОРАТ АММОНИЯ — ПОЛИСТИРОЛ

На примере модельной мелкодисперсной смеси ПХА — полистирол в [1] показано, что в порошкообразном состоянии такие смеси весьма взрывоопасны и по сравнению со штатными бризантными ВВ их горение гораздо легче теряет устойчивость и переходит во взрыв и детонацию. В данной работе с помощью совместных фотографических и пьезометрических измерений получена подробная информация относительно механизма и закономерностей взрывного процесса в аналогичной смеси.

Опыты проводились на стехиометрической смеси 90 % ПХА + 10 % полистирола плотностью  $\rho = 0,66 \text{ г/см}^3$  (пористость 0,64) с газопроницаемостью около 10 Д. Средний размер частиц ПХА и полистирола, определенный по газопроницаемостям порошков, равен 25 и 10 мкм соответственно.

Исследуемую смесь помещали в цилиндрический канал прозрачной плексигласовой оболочки (в основной серии опытов внутренний диаметр 15 мм, длина  $l = 300 \text{ мм}$ ), которая крепилась к стальной пластине, имеющей ряд отверстий под высокочастотные пьезоэлектрические датчики давления. Сигнал с пьезодатчиков через усилитель записывался на регистратор быстропротекающих процессов DATALAB. Процесс горения фотографировали через щелевые диафрагмы одновременно на два ждущих фоторегистратора ЖФР-3 и ФР-11, скорости развертки которых (15—100 и 0,1—10 м/с соответственно) обеспечивали надежную регистрацию скорости фронта свечения, изменяющуюся в диапазоне от 0,1 до 2000 м/с. Горение инициировали спиралью накаливания по двум вариантам. В первом спираль вводили через открытый верхний торец канала оболочки и размещали сверху на слое горючей смеси (поджигание от открытого торца). Во втором варианте спираль вводили в канал оболочки снизу через отверстие в заглушке (поджигание от закрытого торца).

Для синхронизации фоторазверток и профилей давления совмещали середину участка нарастания сигнала, записанного датчиком давления, который попадал в область реализации низкоскоростной детонации (длительность этого участка  $\sim 20 \text{ мкс}$ ), с моментом, когда фронт свечения проходил место расположения этого датчика. Точность такой синхронизации не хуже  $\pm 10 \text{ мкс}$ .

Рассмотрим результаты эксперимента. При поджигании от открытого торца заряда длиной 150 мм смесь выгорает без взрыва с равномерной скоростью  $u \approx 2,4 \text{ мм/с}$ , отвечающей послойному горению. Если же к оболочке присоединить газоотводящую трубку длиной 1,3 м, то горение ускоряется и переходит в низкоскоростную детонацию. Картина развития взрывного процесса, полученная с помощью фоторегистрации, показана на рис. 1 и 2. Здесь координата  $x$  отсчитывается от поверхности в глубину заряда в направлении оси канала оболочки. Можно выделить следующие три стадии процесса.