

скорости 5, длительности химического пика 10%. Результаты являются средними из 5—10 экспериментов.

Качественная картина изменения параметров детонации согласуется с результатами работ [1, 2]. По-видимому, увеличение скорости детонации связано с увеличением плотности ВВ. Изменение τ в 1,5 раза по сравнению с ожидаемым на основе расчетов [2] может быть связано с тем, что из-за зависимости теплоемкости ВВ от температуры изменение температуры за фронтом детонации меньше, чем перед фронтом.

Автор благодарит П. Г. Попова за помощь в проведении экспериментов.

T, K	$D, \text{ км/с}$	$u_{\text{ц-ж}}, \text{ км/с}$	$\tau, \text{ мкс}$
300	7,64	1,95	0,25
77	7,8	1,92	0,4
20,4	7,8	1,92	0,4

Поступила в редакцию
13/VIII 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Беляев. Горение, детонация и работа взрыва в конденсированных системах. М., «Наука», 1968, с. 135.
2. К. К. Шведов, С. А. Колдунов. В. сб. «Горение и взрыв». М., «Наука», 1972, с. 439.
3. А. Н. Дремин, К. К. Шведов. ПМТФ, 1964, 2, с. 155.

УДК 532.593

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ ВОЛН СЖАТИЯ В ВВ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

Б. С. Ермолаев, Б. А. Хасанов, А. И. Коротков

(Москва)

Волны сжатия амплитудой от нескольких до 10—15 кбар в твердых ВВ высокой плотности представляют интерес в связи с изучением низкоскоростного режима взрывчатого превращения (НСР), который является одним из переходных режимов между горением и детонацией [1]. Эти волны слабые в том смысле, что их амплитуда много меньше модуля объемного сжатия K (для ВВ K имеет порядок 100 кбар), и поэтому в волне объем вещества изменяется мало. Однако, с другой стороны, амплитуда этих волн выше предела текучести P_t , и, следовательно, в веществе развиваются пластические деформации. Для ВВ P_t составляет, по-видимому, 1—2 кбар и несколько растет при увеличении амплитуды волны [2].

Если давление в волне сжатия немного выше P_t , то в случае идеального упругопластического вещества волна расщепится на упругий предвестник, имеющий амплитуду P_t , и пластическую волну, которая имеет амплитуду P и движется вслед за упругой волной с более низкой скоростью.

Заряд ВВ, изготовленный литьем или прессованием, всегда имеет небольшую пористость m порядка нескольких процентов, которая образована сетью мельчайших пор и трещин. Обычно считается, что столь малая пористость не может заметно влиять на скорость волн сжатия.

Действительно, при упругом сжатии под нагрузкой P_T объем пор уменьшается на величину порядка P_T/K , и, следовательно, при малой пористости наличие пор практически не изменяет сжимаемость вещества в упругой волне. Однако поскольку из-за наличия пор деформированное состояние вещества оказывается более сложным, скорость упругой волны C_e уменьшается. В случае импульсного продольного нагружения C_e будет лежать между C_l (продольная скорость звука) и C_0 (объемная скорость звука). Последняя в зависимости от коэффициента Пуассона обычно на 20—40% меньше C_l .

Значительно сильнее влияет малая пористость на скорость пластической волны. В случае сплошного вещества ($m=0$) минимальная скорость пластической волны равна C_0 , а при наличии малой пористости она значительно ниже. Дело в том, что в веществе, которое в упругом предвестнике нагружено до P_T , пористость и давление в порах остаются практически такими же, как в исходном веществе. При повышении давления во фронте пластической волны сверх P_T в результате пластического течения поры схлопываются. Поскольку волна сжатия является слабой, то даже при малой пористости схлопывание пор вызовет резкое увеличение объемного сжатия вещества, в результате скорость волны будет низкой.

Для расчета зависимости скорости пластической волны D от амплитуды волны P при наличии малой пористости допустим, что в упругом предвестнике сплошное вещество сжато до давления P_T , при этом давление в порах остается много меньше P_T , а пористость равна исходной m . Во фронте пластической волны, которая идет вслед за упругой волной и имеет амплитуду P , вещество переходит в идеально пластическое состояние, поры схлопываются и их объем уменьшается до нуля. При записи уравнений сохранения массы и импульса на фронте пластической волны можно пренебречь массой и импульсом газа, содержащегося в порах, что вполне допустимо по порядку величины

$$(D - u_T)^2 = \frac{\rho [P - (1 - m) P_T]}{(1 - m) \rho_T^2 [m + (\rho - \rho_T)/\rho_T]} \quad (1)$$

Здесь ρ — плотность вещества в пластической волне (зависимость ρ от давления определяется ударной адиабатой сплошного вещества), ρ_T и u_T — плотность и скорость сплошного вещества в упругой волне

$$\rho_T = \rho_* (1 + P_T/K), \quad (2)$$

$$u_T = P_T/\rho_* C_e, \quad (3)$$

ρ_* — максимально возможная начальная плотность сплошного вещества. Формулы (1)—(3) вместе с ударной адиабатой сплошного вещества определяют зависимость скорости пластической волны от давления при наличии малой пористости. Она справедлива при давлениях, когда $D < C_e$. При больших давлениях волна не расщепляется, и в формулах нужно положить $P_T = 0$. В результате получится привычная зависимость, описывающая ударное сжатие пористого вещества.

Выражение в знаменателе формулы (1), заключенное в квадратные скобки, есть изменение удельного объема пористого вещества в пластической волне. Оно складывается из объема пор и относительного сжатия сплошного вещества. Таким образом, влияние малой пористости будет проявляться при давлениях, когда сжатие сплошного вещества порядка начальной пористости.

На рис. 1 и 2 приведены результаты расчета скорости пластической волны, полученные с помощью формул (1)—(3) при использовании обобщенной ударной адиабаты органических веществ [4]. Видно, что в зависимости от давления скорость пластической волны может быть значительно ниже C_0 . Минимальной скорости пластической волны соответ-

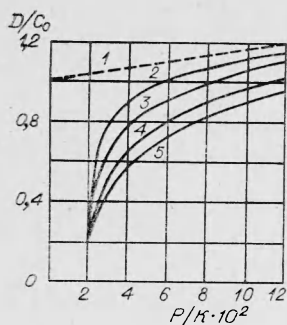


Рис. 1. Зависимость скорости пластической волны от давления (влияние пористости m):

1 — обобщенная ударная адиабата органических веществ [4]; $P_T/K = 0,02$ при $m, \%$: 2 — 1; 3 — 2; 4 — 4; 5 — 6.

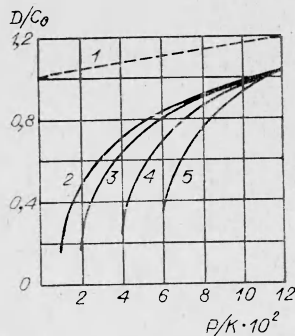


Рис. 2. Зависимость скорости пластической волны от давления (влияние предела текучести P_T):

1 — обобщенная ударная адиабата органических веществ [4]; $m=4\%$, P_T/K : 2 — 0,01; 3 — 0,02; 4 — 0,04; 5 — 0,06.

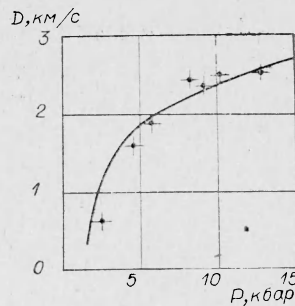


Рис. 3. Зависимость скорости пластической волны от давления для тротила плотностью $1,6 \text{ г/см}^3$ (кривая — расчет при $P_T = 1,5 \text{ кбар}$, $C_0 = 2,2 \text{ км/с}$, точки — экспериментальные данные из работы [2]).

ствует предельный переход $P \rightarrow P_T$ при фиксированном m в формуле (1). Этот предел эквивалентен звуковой волне, которая распространяется по веществу, сжатому упруго до предельной нагрузки P_T , и, следовательно, схлопывает поры. В результате скорость звуковой волны C_+ оказывается очень низкой

$$C_+ = \sqrt{\frac{P_T}{(1-m)\rho_T}} \quad (4)$$

Типичная величина C_+ по оценкам составляет 300—350 м/с.

Известно [1], что НСР поддерживается пластической волной, причем скорость его распространения может быть в некоторых условиях заметно ниже скорости звука в исходном веществе (C_0 или C_e). Последнее обстоятельство создавало трудности для понимания НСР, поскольку детонация даже с малой скоростью не может распространяться медленнее, чем звук в веществе. В свете полученных результатов становится ясно, что в любом случае скорость НСР является сверхзвуковой относительно вещества перед пластической волной, которое сжато упруго до давления P_T . Это дает возможность в принципе рассматривать НСР как детонацию с малой скоростью.

Проведенный анализ фактически основан на допущении, что характерное время схлопывания пор, вызванного пластическим течением, по крайней мере не больше времени нарастания давления во фронте пластической волны. О справедливости этого допущения свидетельствует хорошее согласие между расчетом и экспериментальными данными относительно зависимости скорости пластической волны от давления в прессованном тротиле (рис. 3). Эти данные получены с помощью электромагнитной методики и взяты из работы [2].

Поступила в редакцию
15/IV 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Беляев, В. К. Боболев и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М., «Наука», 1973.
2. А. А. Сулимов, А. В. Обменин и др. Горение и взрыв. М., «Наука», 1972, с. 464.
3. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных явлений. М., Физматгиз, 1963.
4. А. Н. Афанасенков. Канд. дисс., ИХФ АН СССР, 1969.