

## О СТРУКТУРЕ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В ЛИТОМ ТИТ

Л. А. Гагилов, Р. А. Ибрагимов, А. В. Кудашов

(Москва)

Для определения структуры детонационной волны (ДВ) с разрешением 2,6 нс измерялась скорость ударной волны (УВ) в датчиках-пакетах из пластинок Al с размерами  $10 \times 10 \times 0,1$  мм (рис. 1), прижатых к торцу заряда ТНТ диаметром 120 и толщиной 60 мм с плотностью  $1,56$  г/см<sup>3</sup>. Заряды инициировали плоской УВ с амплитудой  $\sim 10$  ГПа. Пластинка 2 диаметром 16 мм прикрывала датчик от преждевременного замыкания продуктами взрыва, через пакеты пропускали постоянный ток. На осциллографе С9-4А регистрировали разность потенциалов между выводом 1 из алюминиевой фольги толщиной 18 мкм и выводом 3, скачкообразно падающую в момент выхода УВ к очередному замкнутому контакту пластинок (рис. 2). Фотопленки обсчитывали на микроскопе БМИ-1Ц. Зависимость  $t(x)$  ( $t$  — время,  $x$  — положение луча на экране ЭЛТ) определяли численным интегрированием средних значений обратной величины скорости развертки луча, измеряемым по осциллограммам меток времени с частотой 200 МГц.

Для определения зазора между пластинками  $d$ , обусловленного шероховатостью их поверхностей, проводили опыты по регистрации движения в пакете стационарной УВ. Использовали соотношение

$$\tau = (l - 2R_a)/D + d/2u, \quad (1)$$

где  $\tau$  — интервал времени, определяемый по осциллограммам;  $l = 102,08 \pm 0,28$  мкм (30) — толщина фольги (здесь и далее приводимая погрешность — удвоенное среднеквадратичное отклонение, в скобках — число усредненных значений);  $R_a = 0,22 \pm 0,03$  мкм (15) — среднее арифметическое отклонение профиля поверхности;  $D$  — скорость УВ в сплошном Al;  $u$  — массовая скорость (для Al  $D = 5,333 + 1,356u$  км/с [1]).

Для УВ с  $D = 7,32 \pm 0,04$  км/с, входящей в пакет, измерено  $\tau = 14,36 \pm 0,08$  нс (83) и определено  $d = 1,40 \pm 0,23$  мкм. Зазор, как и следовало ожидать, близок к высоте перовностей профиля по десяти точкам  $R_z$ . В дальнейшем, измерив суммарное время выбирания зазора и движения УВ по  $i$ -й пластинке  $\tau_i$ , определяли по (1) скорость УВ в  $i$ -й пластинке  $D_i$ . Результаты 7 опытов представлены в таблице. Однородность зарядов контролировали с помощью рентгенографии.

Повышенная величина  $\tau_i$  обусловлена неоднородностью выхода ДВ к датчику и повышенными размерами 1-й пластинки. Расположение замкнутых контактов с одинаковыми размерами точно один над другим вдоль направления УВ уменьшает ошибку измерения, связанную с неодновременностью выхода УВ. Так, для опытов с ТНТ возможный перекоп ДВ  $\sim 1$  нс/мм приводит к завышению  $\tau_i$  при  $i > 1$  не более чем на  $\sim 0,1$  нс.

Скорость УВ в пластинках 2–7 и давление в примыкающем к газодинамическому скачку фронту ДВ (области толщиной 0,13 мм) изменяются

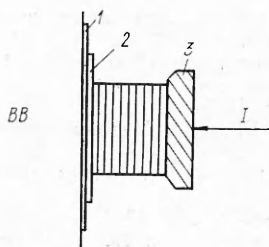


Рис. 1. Схема датчика скорости УВ. 1 — вывод из алюминиевой фольги; 2 — первая пластинка; 3 — вывод, прижимающий датчик к ВВ.

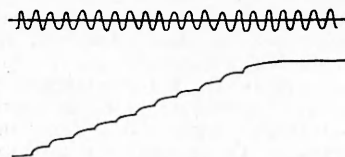


Рис. 2. Типичная осциллограмма. Период меток времени 10 нс.

<i>N</i>	$\tau_i$ , нс	<i>D</i> , км/с	<i>n</i>	<i>N</i>	$\tau_i$ , нс	<i>D</i> , км/с	<i>n</i>
1	16,6±2,2	—	12	7	14,13±0,33	7,43±0,17	12
2	14,01±0,39	7,49±0,2	10	8	14,34±0,20	7,33±0,11	10
3	13,84±0,31	7,57±0,17	13	9	14,51±0,30	7,25±0,15	9
4	14,11±0,25	7,44±0,13	12	10	14,48±0,33	7,27±0,16	7
5	14,11±0,14	7,44±0,09	14	11	14,61±0,34	7,21±0,16	4
6	14,19±0,26	7,40±0,14	13				

Примечание. *N* — номер пластинки; *n* — количество усредненных значений.

слабо, что, по-видимому, связано с периодом индукции. Усредняя  $\tau_i$  при  $i = 2 \div 7$ , получим  $\tau = 14,07 \pm 0,11$  нс (74),  $D = 7,46 \pm 0,08$  км/с и  $p_1^{Al} = 31,7 + 1,5$  ГПа. Используя результаты [2], получим для ТНТ с  $\rho_0 = 1,56$  г/см<sup>3</sup>:  $p_2^{ТНТ} = 18,3$  ГПа,  $D^{ТНТ} = 6,73$  км/с.

Для адиабаты продуктов взрыва в виде  $p \sim \rho^3$ , где  $\rho$  — плотность, давление в Al, соответствующее давлению детонации,  $p_2^{Al} = 23,6$  ГПа. Измеренное давление, соответствующее состоянию в зоне индукции, превышает значение, соответствующее состоянию Чепмена — Жуге, в  $\eta^{Al} = p_1^{Al}/p_2^{Al} \approx 1,34$  раза, что находится в согласии с максимальным значением  $\eta^{Al}$ , полученным при измерении скорости свободной поверхности пластинки алюминия, прижатой к заряду прессованного ТНТ с  $\rho_0 = 1,55$  г/см<sup>3</sup> [3]. Зависимости скорости от расстояния в [3, 4] качественно отличаются от данной из-за отнесения значений скорости к начальным толщинам пластинок, а не к серединам измеряемых баз полета.

Данные об ударной сжимаемости ТНТ различной пористости [5] позволяют определить  $D-u$ -соотношение для ударной адиабаты в диапазоне давлений 2—12 ГПа:  $D = 2,19 + 1,84u$  км/с для  $\rho_0 = 1,56$  г/см<sup>3</sup>. Предполагая, что ТНТ не подвержено физико-химическому превращению при ударном сжатии со скоростью УВ, равной скорости нормальной детонации, и что линейность соотношения  $D-u$  не нарушается, получим для давления в химике и в квазиакустическом приближении для соответствующего давления в Al:  $p_3^{ТНТ} = 25,8$  ГПа,  $p_3^{Al} = 38,4$  ГПа. Взаимное расположение всех точек показано на рис. 3.

Запущенное значение  $p_1^{Al}$  по сравнению с  $p_3$  можно объяснить тем, что ВВ испытывает заметное разложение перед зоной индукции. За газодинамическим скачком ВВ попадает в состояние на некоторой метастабильной адиабате, которая проходит в координатах  $p-v$  ( $v$  — удельный объем) выше расчетной ударной адиабаты холодного ВВ. И на  $p-u$ -диаграмме она будет проходить круче ударной адиабаты и адиабаты продуктов взрыва. Тогда отношение давлений в зоне индукции и детонации будет заметно меньше отношения соответствующих давлений в Al ( $\eta = p_1/p_2 \approx 1,1$ ). Эти предположения находятся в согласии с данными [6—11]. Следует ожидать (и это подтверждается настоящими измерениями), что с увеличением динамической жесткости ВВ  $\rho_0 D^{ВВ}$  и приближением детонационного луча на диаграмме  $p-u$  к адиабате алюминия значение  $\eta^{Al}$  будет уменьшаться. Так, для состава В  $\eta^{Al} = 1,27$  [4].

Совокупность экспериментальных данных позволяет предположить

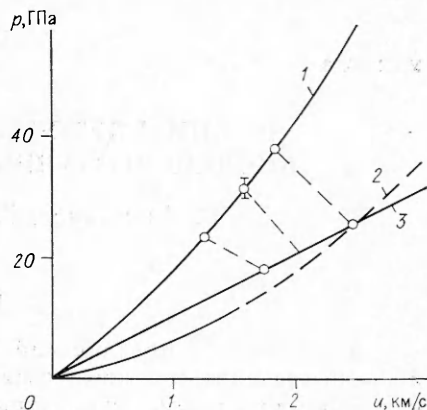


Рис. 3.  $p-u$ -диаграмма.

1 — ударная адиабата Al; 2 — ударная адиабата ТНТ; 3 — детонационный луч.

существование в твердых ВВ двухфронтного детонационного комплекса, в котором за газодинамическим скачком с основным энерговыделением следует запаздывающий на время индукции фронт горения, точнее, догорания. Задержка выхода в инертную преграду состояния, соответствующего состоянию Чепмена — Жуге (за фронтом горения), по-видимому, будет расти с уменьшением динамической жесткости преграды из-за снижения плотности ВВ в зоне индукции за отраженной волной. При выходе ДВ в низкоплотную среду отраженная волна разрежения может сорвать горение и метастабильное состояние индукции окажется на некоторое время замороженным (ср. [6] с. 45).

Газодинамический скачок, в котором происходит основное разложение ВВ, по-видимому, отличается от обычной УВ и относится к автоволнам [12, 13]. Скорость распространения последних, как и нормальной ДВ, определяется параметрами среды и не зависит от начальных условий. Существует критический диаметр детонации и критическое значение кривизны фронта автоволны, при превышении которых волна распространяться не может. Для ДВ, как и для автоволн, характерен негладкий фронт. Сверхзвуковая скорость ДВ может быть обеспечена процессами переноса неравновесных носителей заряда, вызывающих электрополевое разложение ВВ [14].

Итак, представлены результаты измерения скорости УВ на базах 0,1 мм в преграде из Al, прижатой к заряду ТНТ. Предложено качественное объяснение этих результатов и данных других авторов в рамках двухфронтной модели. Предполагается, что основное энерговыделение происходит в первом фронте — газодинамическом скачке, структура которого определяется кинетикой разложения ВВ неравновесными носителями заряда.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Альтшулер Л. В. и др. ПМТФ, 1981, 2, 3.
2. Kamlet M. J. et al. J. Chem. Phys., 1968, 48, 1.
3. Дремин А. П., Похил П. Ф. ЖФХ, 1960, 34, 11, 2560.
4. Duff R. E., Houston E. J. Chem. Phys., 1955, 23, 7.
5. Compendium of Shock Wave Data. Univ. California, 1977. Sec. C.
6. Кук М. А. Наука о промышленных взрывчатых веществах. — М.: Недра, 1980.
7. Трофимов В. С. // Детонация. Критические явления. Физико-химические превращения в ударных волнах. — Черногоровка, 1978.
8. Воскобойников И. М., Гоголя М. Ф. Хим. физика, 1984, 3, 7, 1036.
9. Воробьев А. А. и др. ФГВ, 1985, 21, 2, 106.
10. Авеян В. А. и др. // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация и ударные волны: Материалы VIII Всесоюз. симпозиума по горению и взрыву. — Черногоровка, 1986.
11. Уртъев П. А. и др. ФГВ, 1986, 22, 5, 113.
12. Васильев В. А. и др. УФН, 1979, 128, 4, 625.
13. Кринский В. И., Михайлов А. С. Автоволны. — М.: Знание, 1984.
14. Сухущин Ю. И., Захаров Ю. А. // Кинетика и механизм химических реакций в твердом теле. — Черногоровка, 1981.

Поступила в редакцию 25/VI 1987,  
после доработки — 25/XII 1987

УДК 662.3

### РЕЖИМЫ ДЕТОНАЦИИ И ПАРАМЕТРЫ ЖУГЕ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

*Л. В. Альтшулер, Г. С. Дорони, В. С. Жученко*  
(Москва)

#### Введение

Для определения давлений Жуге, режимов стационарной детонации и продолжительности химических реакций применяется обширный арсенал динамических методов, основанных на различных физических прин-