

8. J. H. Lee, R. Knystautas, C. M. Cuirao. 15-th Symp. (Intern.) on Combustion, Pittsburgh, 1974.
9. Я. Б. Зельдович, С. М. Когарко, Н. Н. Симонов. ЖТФ, 1956, 26, 8.
10. А. А. Васильев. ФГВ, 1978, 14, 3.
11. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчийн. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963.
12. Т. В. Баженова и др. Ударные волны в реальных газах. М., Наука, 1968.
13. Баллистические установки. Под ред. Н. А. Златина, Г. И. Мишина. М., Наука, 1974.
14. Ю. Н. Дьяконов, Л. В. Пчелкина, И. Д. Сандомирская. Сверхзвуковое обтекание затупленных тел. М., Изд-во МГУ, 1971.
15. H. F. Lehr. Astr. Acta, 1972, 17, 4—5.
16. R. A. Strehlow, R. E. Maurer, S. Rajan. AIAA J., 1965, 7, 2.

## ИНИЦИИРОВАНИЕ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ ДЕТОНАЦИИ ВОДОНАПОЛНЕННЫХ ВВ С РАЗЛИЧНОЙ СТРУКТУРОЙ ЗЕРНА

*Б. Зыгмунт*

(Варшава)

Жидкости, введенные в насыпное взрывчатое вещество (ВВ), вызывают изменение его взрывных свойств [1]. Характер этих изменений зависит от кристаллической структуры зерен ВВ [2]. Для таких смесей, как правило, наблюдается более высокая скорость детонации, чем для сухого ВВ, причем максимальное увеличение наблюдается для системы, в которой жидкость полностью заполняет объем, занимаемый воздухом. Авторы работ [3, 4] с помощью электромагнитного метода показали, что тип жидкости в некоторой степени также влияет на параметры детонационной волны. Упомянутый метод обладает большими возможностями для исследования как стационарных, так и нестационарных детонационных процессов в конденсированных средах. С его помощью исследована эволюция инициирующей ударной волны в детонационную в ВВ различной структуры: насыпном, литом, прессованном и жидком [5]. При этом установлено, что процесс инициирования детонации физически однородных (например, жидких) ВВ происходит качественно иначе, чем для неоднородных материалов.

Превращение инициирующей ударной волны в детонационную в водонаполненном гранулированном тротиле исследовано в работе [6]. Показано, что характер этого процесса аналогичен развитию детонации в неоднородных ВВ. В [7] при исследовании возникновения детонации в смесях кристаллических ВВ и воды обнаружено сильное влияние на переходный процесс структуры зерен ВВ. Стмечено также, что в некоторых случаях наблюдается качественное изменение механизма развития детонации после заполнения ВВ водой. В настоящей работе этот эффект исследуется более детально.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Помещая датчики на разных расстояниях от места входа инициирующей ударной волны в исследуемое ВВ, с помощью электромагнитного метода можно наблюдать возникновение детонационной волны. Применяемые датчики регистрации массовой скорости имели одну, две или три рабочие плоскости. Датчик с двумя рабочими плоскостями позволяет дополнительно определить среднюю скорость распространения волны между плоскостями, а датчик с тремя плоскостями — среднюю скорость распространения волны на двух отрезках. Сравнивая измеренные скорости, можно на сравнительно коротком заряде оценить, сумеет ли ударная волна с из-

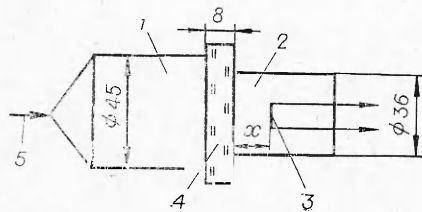


Рис. 1. Схема заряда для исследования развития детонации в ВВ.  
1 — волновой генератор; 2 — исследуемое ВВ; 3 — алюминиевый датчик; 4 — барьер из оргстекла; 5 — детонатор.

вестной амплитудой давления возбудить исследуемое ВВ. Для неоднородных ВВ достаточным доказательством развития инициирующей ударной волны в детонацию является увеличение скорости ее фронта с расстоянием. Критическое давление инициирующей ударной волны  $p_{кр}$  определялось как среднее значение между наименьшим давлением на фронте ударной волны, которая сумеет вызвать детонацию, и наибольшим давлением волны, которая не возбуждает ВВ.

Для экспериментов избраны два типа ВВ: гексоген и гранулированный сплав тротила с гексогеном. Гексоген получен путем медленной кристаллизации из ацетона с целью образования прозрачных кристаллов с минимальным количеством дефектов. Из кристаллов выделена ситовая фракция  $1 \div 3 \cdot 10^{-4}$  м путем отсева под водой. Второе ВВ получено при разливе взвеси мелкокристаллического гексогена в сплавленном тротиле в холодную воду. Образованные гранулы размельчались механически и из них выделена ситовая фракция  $2 \div 5 \cdot 10^{-4}$  м. Избранные ВВ отличались структурой отдельных зерен. Зерна гексогена — монокристаллы с плотностью  $1,80 \text{ г/см}^3$ , гранулы же второго ВВ имели поликристаллическую структуру и содержали два рода внутренних неоднородностей: включения мелких кристаллов гексогена и пустые пространства между кристаллами тротила (поры). Пористость гранул равнялась примерно 4%. Такая структура гранул — результат метода их получения. В таблице представлены результаты измерений значения критического давления инициирующей ударной волны и критического диаметра для обоих исследуемых ВВ, а также их смесей с водой, которая полностью заполняет объем, занимаемый в сухом заряде воздухом.

Для изучения процесса развития инициирующей ударной волны в детонацию амплитуды давления входящей ударной волны подбирались так, чтобы, с одной стороны, возможно меньше превышать критическое значение, а с другой, чтобы обеспечить хорошую повторяемость измерений. Развитие ударной волны до детонации в сухих и водонаполненных ВВ иллюстрируется осциллограммами, представленными на рис. 2 и 3. На рис. 4 приведены графики массовой скорости на фронте  $u_f$ , скорости ударного фронта  $D$  и давления на фронте  $p_f$  развивающейся детонационной волны в функции проходимого расстояния  $x$  в исследуемых ВВ.

Разная структура зерен исследуемых ВВ проявляется особенно отчетливо в изменении детонационной способности после наполнения заряда водой. Так, наполнение гексогена водой вызывает рост критического диаметра на порядок величины, а для смеси гранул сплава с водой критический диаметр меньше, чем для сухого материала. Здесь следует отметить аналогию с микропористыми материалами, описанными в [2]. Чувствительность к возбуждению детонации после наполнения заряда водой также в значительно большей степени возрастает для гексогена, чем для гранулированного сплава.

Качественный характер развития детонации в сухих исследуемых ВВ такой же, как и в других насыпных ВВ (см. рис. 2, 3). Амплитуда давления на фронте волн

ВВ	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$d_{кр}$ , мм	$p_{кр}$ , ГПа
Гексоген	0,95	3	$0,2 \pm 0,02$
Гексоген + вода	1,42	24	$4,5 \pm 0,3$
Гранулированное ВВ	0,92	10	$0,6 \pm 0,1$
Гранулированное ВВ + вода	1,35	6	$2,4 \pm 0,2$

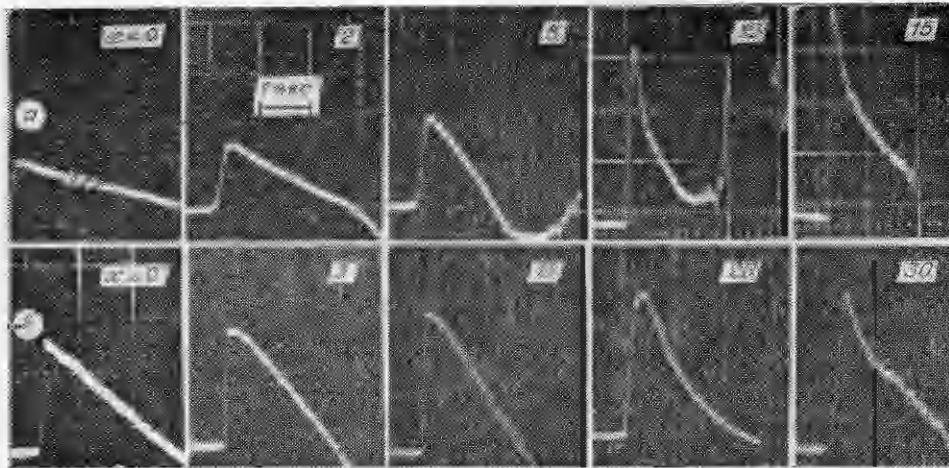


Рис. 2. Осциллограммы массовой скорости продуктов взрыва для сухого (а) и водонаполненного гексогена (б) на разных расстояниях ( $x$ , мм). Давление иницирующей ударной волны 0,7 и 5,2 ГПа соответственно.

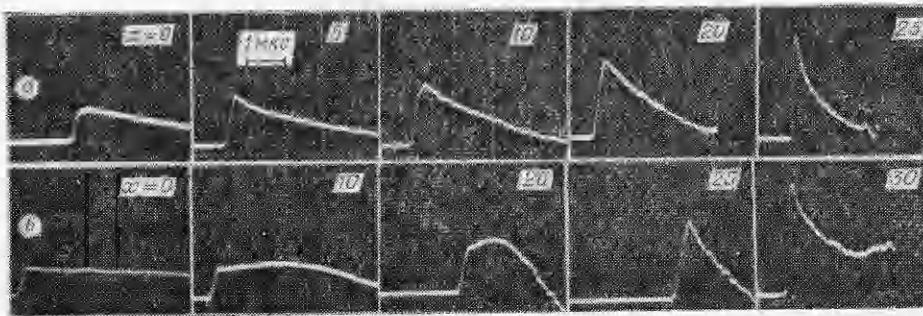


Рис. 3. Осциллограммы массовой скорости продуктов взрыва для сухого (а) и водонаполненного гранулированного ВВ (б). Давление иницирующей ударной волны 1,0 и 2,8 ГПа соответственно.

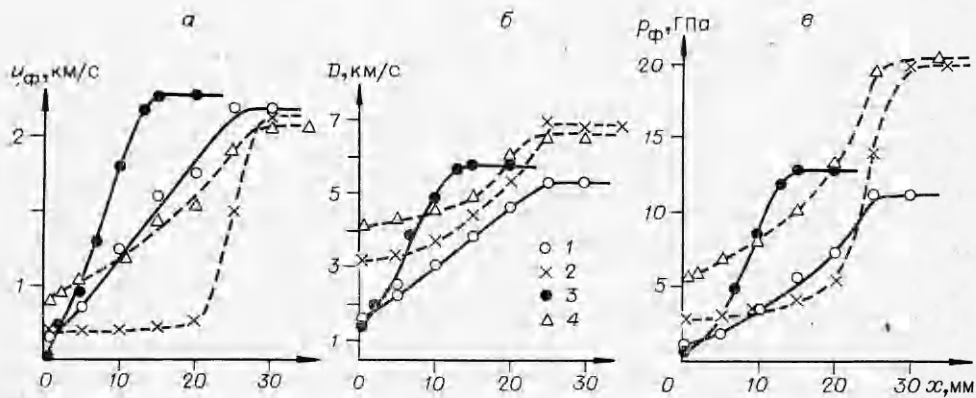


Рис. 4. Зависимость массовой скорости на фронте (а), волновой скорости фронта (б) и давления на фронте (в) развивающейся детонационной волны от расстояния до границы раздела инертный барьер — ВВ.

1 — гранулированное ВВ; 2 — водонаполненное гранулированное ВВ; 3 — гексоген; 4 — водонаполненный гексоген.

растет с расстоянием монотонно. При этом за фронтом наблюдается быстрое падение массовой скорости, о чем свидетельствует треугольный профиль этого параметра от времени. Для водонаполненного гексогена в процессе развития ударной волны на начальном этапе на осциллограммах (см. рис. 2, а) можно заметить отрезок с постоянным значением массовой скорости сразу за фронтом и только далее — быстрое падение этого параметра. Этот эффект описан в [5, 8], где при развитии детонации в литом тротиле наблюдается именно такой профиль с «полкой».

Для гранулированного водонаполненного ВВ процесс развития детонации проходит следующим образом: инициирующая ударная волна распространяется вначале с постоянным значением массовой скорости на фронте, в то время как скорость распространения фронта постоянно растет. Одновременно можно наблюдать нарастание массовой скорости продуктов взрыва на некотором расстоянии за фронтом. В некоторый момент массовая скорость за фронтом больше, чем на фронте, и на осциллограмме виден характерный «горб» (см. рис. 3, б). Далее «горб» догоняет фронт и образуется типичный химический пик детонационной волны. Аналогичный ход развития ударной волны наблюдался для пресованного тротила с большой плотностью [5].

Из графиков, представленных на рис. 4, следует, что для смеси водонаполненного гексогена параметры детонации устанавливаются на значительно больших расстояниях, чем для сухого гексогена, несмотря на то, что амплитуда давления инициирующей ударной волны была в этом случае на порядок величины больше. Для сухого и водонаполненного гранулированного ВВ параметры детонации устанавливаются на близких расстояниях.

Оценивая влияние воды на взрывные свойства и характер развития детонационных процессов, можно констатировать, что он зависит от кристаллической структуры зерен ВВ. Если ВВ состоит из кристаллов с большей физической однородностью, водонаполнение вызывает радикальное уменьшение чувствительности к возбуждению. Такие параметры, как критический диаметр и критическое давление инициирующей ударной волны, заметно возрастают. Уменьшается скорость нарастания детонационных параметров (тепловыделения) при ударном инициировании таких смесей. Если частицы ВВ содержат значительное количество неоднородностей, например границы между кристаллами в поликристалле или включения кристаллов других ВВ, тогда смеси этого материала с водой могут характеризоваться большей детонационной способностью, чем сухой материал. Скорость нарастания детонационных параметров не претерпевает больших изменений.

Описанные выше изменения взрывных свойств ВВ после их водонаполнения нельзя рассматривать в отрыве от теории горячих точек [9], рассматривающей процессы инициирования неоднородных ВВ. В работе [7] предложено разделение горячих точек на внутренние и внешние: в сухих ВВ главную роль в развитии детонации играют внешние. Причину их возникновения следует связать с проникновением продуктов взрыва в пространство между зернами ВВ. Водонаполнение исключает проникновение продуктов взрыва и, следовательно, в смеси ВВ с водой эти точки отсутствуют. Если частица ВВ не содержит внутренних горячих точек, водонаполненные ВВ характеризуются значительно меньшей чувствительностью по сравнению с сухим материалом.

Введение воды в насыпное ВВ приводит к тому, что такая смесь характеризуется другими волномеханическими свойствами. В частности, энергия взрыва передается очередным слоям материала не через продукты взрыва, а через ударную волну в воде. Этот способ более эффективен, поэтому слои ВВ сжимаются ударной волной с большей интенсивностью, чем в сухом материале. Отсюда следует, что при наличии

внутри зерен ВВ неоднородностей, они сыграют роль горячих точек в значительной степени, чем в сухом материале.

Представленные на рис. 2 и 3 осциллограммы показывают, что водонаполнение насыпных ВВ изменяет качественную картину перехода ударной волны в детонационную. Характер этих изменений определяется физической структурой зерен ВВ. Заполнение водой состоящего из монокристаллов гексогена исключает возникновение внешних горячих точек. Из-за ухудшенных условий возникновения внутренних точек такая смесь имеет радикально уменьшенную детонационную способность. Можно предполагать, что в механизме развития детонации значительную роль начинает играть пластическая деформация или даже однородный ударный разогрев вещества. Аналогии в характере развития детонации водонаполненного гексогена и литого тротила можно обосновать малой объемной концентрацией структурных неоднородностей. Так же можно объяснить изменение характера развития детонации после заполнения водой гранулированного ВВ с поликристаллической структурой зерна. Вода погасит внешние, но в большей степени активизирует внутренние горячие точки. Их объемная концентрация значительно возрастает, что делает смесь структурно подобной прессованному ВВ.

Для сухих насыпных ВВ процесс перехода ударной волны в детонацию в меньшей степени зависит от структуры зерен. Фактором, определяющим скорость развития детонации, является чувствительность ВВ и объемная концентрация внешних горячих точек, пропорциональная начальным размерам зерен. На основе сравнения взрывных свойств и картины процесса развития детонации в исследуемых ВВ можно констатировать, что эффективность действия внешних горячих точек более высокая, чем внутренних.

В заключение следует подчеркнуть, что обнаруженные эффекты можно использовать в практике при разработке водонаполненных ВВ (слярри), сенсибилизированных твердыми ВВ.

Автор глубоко благодарен А. Н. Дремину за внимательное рассмотрение рукописи и ценные советы.

*Поступила в редакцию  
25/IX 1979*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. T. Urbaiński. Arch. Proc. Spal., 1972, 3, 2.
2. А. Я. Апин, Н. Ф. Велица.— В сб.: Взрывное дело, № 63/20. М., Недра, 1967.
3. А. Л. Кривченко, К. К. Шведов и др. ФГВ, 1972, 8, 4.
4. К. К. Шведов, А. Л. Кривченко, В. Н. Сальников. ФГВ, 1978, 14, 5.
5. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., Наука, 1970.
6. К. К. Шведов, А. Н. Дремин и др. ФГВ, 1974, 10, 4.
7. В. Zygmunt. Arch. Proc. Spal. (in print).
8. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов.— В сб.: Взрывное дело, № 63/20. М., Недра, 1967.
9. F. P. Bowden, A. D. Yoffe. Initiation and growth of explosion in liquids and solids. Cambridge, Univ. Press, 1952.

### ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И ОТКОЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ЖЕЛЕЗА «АРМКО» В УДАРНОЙ ВОЛНЕ

*Г. И. Канель, В. В. Щербань  
(Черноголовка)*

Известно, что отражение импульса сжатия от свободной поверхности образца приводит к возникновению внутри образца растягивающих напряжений и к разрушению — отколу [1—6]. Исследования откольных