

где $\kappa = 2\pi/\lambda$; λ — длина волны освещающего света; β' — новый угол наблюдения объекта; Δx и Δy — проекции вектора смещения точки A на координатные оси.

Если, например, при угле β через выбранную точку объекта проходит максимум интерференционной полосы, то изменение угла наблюдения на β' приведет к изменению δ . Это выразится в том, что полосы будут попеременно чередоваться относительно поверхности объекта. Определив число полос k , проходящих через данную точку объекта, получим уравнение относительно неизвестных Δx и Δy . Сделав еще одно наблюдение под другим углом β'' , получим дополнительное уравнение для нахождения (с точностью до знака) проекций вектора перемещения.

На рис. 3 представлены интерферограммы взрыва сферического заряда азида свинца в образце из полиметилметакрилата размером 70×70 мм, полученные описанным методом. На рис. 3, *а* четко виден фронт ударной волны, образующейся при переходе детонационной волны заряда в образец. На рис. 3, *б* представлена интерферограмма более поздней фазы деформированного образца, деформации которого вызваны растягивающими и сжимающими напряжениями при отражении ударной волны от свободной поверхности. Интерферограмма в более поздний момент времени изображена на рис. 3, *в*. На рис. 3 наглядно просматривается различие в интерференционных полосах, которое характеризует различные напряженные состояния объекта.

Таким образом, применение названного метода позволяет получить объемные качественные изображения образца при действии на него взрывной нагрузки, а также дает возможность рассчитать перемещения точек образца, которые характеризуют различные напряженные состояния в последовательные моменты времени, что позволяет более полно изучить процесс разрушения твердой среды под действием взрыва.

*Поступила в редакцию
13/VI 1978*

ЛИТЕРАТУРА

1. Кольер. Оптическая голография. М., «Мир», 1976.
2. Б. Б. Александров, А. М. Бонч-Бруевич. ЖТФ, 1967, 37.

ВЛИЯНИЕ НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПАРАМЕТРЫ ДЕТОНАЦИИ ЛИТОГО ТРОТИЛА

В. В. Кравцов, В. В. Сильвестров

(Новосибирск)

Неоднородные ВВ используются в широком диапазоне начальных температур T_0 , в том числе и при криогенных температурах до 20 К [1]. Начальная температура есть важная физическая характеристика исходного состояния ВВ, которая определяет его агрегатное состояние и существенно влияет на величину разогрева за фронтом ударной волны, распространяющейся по веществу. Температура ударного разогрева определяет, в свою очередь, результаты ряда оценок [2, 3] и теоретических работ, связанных с расчетом детонационных характеристик и с количественной интерпретацией данных для неоднородных ВВ [4—6].

Поэтому с практической и с теоретической точки зрения интересно знать, как изменяются характеристики стационарной детонации: скорость детонации D , критический диаметр $d_{кр}$ и параметры Чепмена — Жуге для неоднородных ВВ при низких T_0 . С экспериментальным анализом этого вопроса для литого тротила при $T_0 \approx 20—77$ К и связана настоящая работа (влияние криогенных T_0 на ударный порог иницирования ТНТ рассмотрено в [7]).

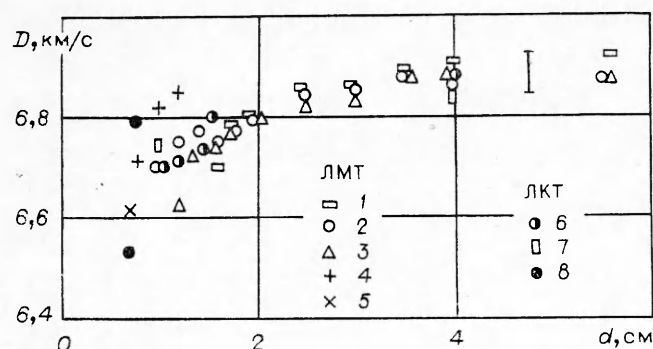
Выбор литого ТНТ обусловлен тем, что он хорошо изучен при нормальной T_0 и имеются основания полагать, что для него химическое превращение за детонационным фронтом происходит в форме теплового взрыва при гомогенном разогреве гетерогенной среды [8]. Иначе, для литого тротила можно было бы ожидать значительного влияния T_0 на детонационные параметры, связанные с кинетикой превращения ВВ.

Известно несколько работ, в которых изучалось влияние криогенных температур на характеристики неоднородных ВВ. Для тротила с плотностью 1 г/см^3 наблюдается увеличение $d_{кр}$ и времени реакции τ_r в детонационной волне в 1,7—2 раза при понижении T_0 от 300 до 77—140 К [2, 3]. Для литого мелкокристаллического тротила τ_r также возрастает в 2 раза при $T_0 \approx 20—77$ К [3]. Для литого ТГ 50/50 τ_r увеличивается в 1,6 раза, а скорость детонации и детонационное давление практически не изменяются при той же T_0 [9—11]. Таким образом, имеющиеся данные носят ограниченный, разрозненный характер, и целесообразны дальнейшие исследования влияния T_0 на параметры детонации.

Заряды готовились из отливок двух типов, получаемых при остывании шимозированного расплава с добавлением 5—10% мелкодисперсного порошка, при перемешивании (тип 1) и при остывании чистого расплава тротила без перемешивания (тип 2). Отливки типа 1 имели однородную мелкокристаллическую структуру и плотность $\rho_0 = 1,62 \text{ г/см}^3$; отливки типа 2 состояли из радиальных крупных кристаллов с $\rho_0 = 1,60 \text{ г/см}^3$. При низких T_0 из-за теплового сжатия плотность изменялась, она определялась при помощи аналитического взвешивания образцов ВВ на воздухе, в жидких азоте и водороде.

Скорость детонации заряда диаметром d измерялась при помощи ионизационных зондов, расположенных в пяти позициях вдоль столбика ВВ, заключенного в бумажную оболочку толщиной менее 0,2 мм. Заряд длиной 10—12 диаметров инициировался зарядом из ТГ 50/50, скорость детонации определялась в установившемся режиме. В опытах при низкой температуре заряд помещался в стакан из пенопласта, заполняемый жидким азотом ($T_0 = 77,4 \text{ К}$) или жидким водородом ($T_0 = 20,4 \text{ К}$). Время охлаждения заряда до необходимой температуры составляло 3—20 мин в зависимости от общей массы ВВ. Непосредственно перед подрывом жидкость сливалась. Для каждого d и T_0 ставилось по 3—4 опыта и погрешность определения D составляла менее 0,5% (временные интервалы измерялись при помощи хронографов с разрешением 10 нс). Критический диаметр определялся как среднее между диаметрами, при которых наблюдается устойчивая детонация и ее затухание.

Результаты измерений приведены на рисунке (указана также типичная ошибка эксперимента). Значения D при низких T_0 приведены с учетом теплового сокращения размеров заряда в предположении его изотропности, которое рассчитано по измеренному изменению плотности ВВ (табл. 1). Видно, что для литого мелкокристаллического тротила (ЛМТ) в пределах точности измерений при $d \geq 14$ мм значения скорости совпадают при $T_0 \approx 20—77$ К, а при $d \geq 16$ мм — практически во всем диапазоне температур. В то же время при линейной зависимости D от ρ_0 с коэффициентом пропорциональности $3,23 \text{ км/с на } 1 \text{ г/см}^3$.



Экспериментальные значения скоростей детонации тротила.
 1 — 290 К, $\lambda=0$; 2 — 77,4 К, $\lambda=1$; 3 — 20,4 К, $\lambda=1$; 4 — 290 К, $\lambda=1$;
 5 — 290 К, $\lambda=2$; 6 — 77,4 К, $\lambda=1$; 7 — 290 К, $\lambda=1$; 8 — 290 К, $\lambda=2$.

определенным для тротила варьированием плотности при $T_0 \approx 290$ К [12], из-за увеличения ρ_0 следовало бы ожидать роста D примерно на 290 м/с. Это несоответствие является, по-видимому, следствием изменения температуры в зоне реакции и сдвига химического равновесия, приводящим к изменению теплового эффекта реакции.

Неожиданно уменьшение для ЛМТ $d_{кр}$ до 9—11 мм при 77—20 К. Возможно, это связано с нарушением исходной физико-механической структуры литого ТНТ, с увеличением ее дефектности при понижении T_0 за счет возникающих градиентов температуры и локальных механических напряжений. В пользу этого говорят: существенное уменьшение прочности отливок при низких T_0 и при последующем нагреве до комнатной температуры, а также заметное изменение плотности ВВ (см. табл. 1). Видимого изменения микроструктуры образцов тротила не происходит при охлаждении до 77,4 К и последующем медленном нагреве их до комнатной температуры (ниже λ — кратность подобной «низкотемпературной обработки»), хотя на поверхности отливок наблюдаются выраженные слабо макроскопические трещины. Вероятно, нарушение структуры происходит на микроскопическом уровне, и нужны более тонкие методы его регистрации.

Поставлены опыты с тротилом при $T_0 \approx 290$ К и $\lambda=1$. Критический диаметр уменьшается при этом до 7 мм, что в 2 раза меньше $d_{кр}$ для ЛМТ, не подвергнувшегося действию низких температур. Это означает, что происходит необратимое изменение структуры отливок при относительно быстром понижении T_0 до 77,4 К, и, по-видимому, правильное при определении влияния T_0 в качестве исходного $d_{кр}$ выбрать значение для тротила с $\lambda=1$ при 290 К. Тогда при понижении T_0 $d_{кр}$ растет в соответствии с качественно понятным уменьшением скорости реакции за детонационным фронтом, но в отличие от однородных ВВ [2, 13] это изменение мало.

Аналогичный эффект наблюдается и для литого крупнокристаллического тротила (ЛКТ), имеющего при нормальной температуре $d_{кр} =$

Т а б л и ц а 1

T_0 , К	λ	ЛМТ		ЛКТ	
		ρ_0 , г/см ³	$d_{кр}$, мм	ρ_0 , г/см ³	$d_{кр}$, мм
290	0	1,62	15±1	1,60	27,5
	1	1,61	7±1	1,59	9±1
	2	—	6,5±0,5	—	6,5±0,5
77,4	1	1,70	9±1	1,67	9±1
20,4	1	1,71	11±1	—	—

Т а б л и ц а 2

T_0 , К	λ	D , км/с	u_1 , км/с	τ_p , мкс	p_1 , кбар	n	Литература
290	0	6,74	1,49	0,32	160	3,52	[8]
290	1	6,83	1,60	0,30	174	3,27	—
77,4	1	6,88	1,65	0,38	190	3,17	—
290*	—	6,91	1,61	0,20	178	3,3	[8]

* Данные для прессованного тротила.

$=25,7$ мм [8]: $d_{кр}$ уменьшается до 9 мм при $\lambda=1$, $T_0=77-290$ К (см. табл. 1). При этом разница в значениях скоростей детонации для ТНТ обоих типов отливок при равных d и T_0 практически отсутствует (см. рисунок), т. е. уже однократная «низкотемпературная обработка» нивелирует существенную разницу в значениях D , наблюдаемую при нормальной температуре и $\lambda=0$ (см. табл. 2 из [7]). Это связано, по-видимому, со сближением $d_{кр}$ при $\lambda=1$ для двух типов литого тротила.

Более того, повышением кратности «обработки» можно уравнивать величину $d_{кр}$ для ЛМТ и ЛКТ: $d_{кр}=6,5$ мм при $\lambda=2$ (см. табл. 1). Значения скоростей при этом для $d=7$ мм также близки (см. рисунок). Дальнейшее увеличение λ до 5 уже не влияет существенно на величину $d_{кр}$: при $\lambda=5$ и $d=4$ мм заряды двух типов тротила не детонируют, т. е. не удастся довести $d_{кр}$ до 2,5—3 мм, характерных для прессованного ТНТ [14]. Иначе, заряд «помнит историю своего происхождения» и остается менее неоднородным ВВ в смысле физико-механической структуры, чем прессованный тротил. Разница в дефектности структуры проявляется, возможно, через возбуждение при высоких детонационных давлениях дополнительных «горячих точек», существенно влияющих на факторы, определяющие конкретное значение $d_{кр}$. Обнаруженный эффект можно рекомендовать для применения в тех случаях, когда необходимо простым образом существенно уменьшить величину критического диаметра литого ТНТ.

Для определения корреляции между значениями $d_{кр}$ и τ_p найдены при помощи электромагнитного метода [8] параметры Чепмена — Жуге для заряда литого крупнокристаллического тротила с $d=40$ мм. Датчик находился в ВВ на расстоянии 100 мм от плосковолнового генератора, инициирующего заряд. Экспериментальные результаты осреднялись по 5—6 опытам; точность определения массовой скорости u_1 в точке Чепмена — Жуге около 5%, τ_p — 10%. Рассчитывались также детонационное давление p_1 и показатель политропы продуктов взрыва n (табл. 2). Оказалось, что для ЛКТ, подвергнутого низкотемпературной обработке, τ_p практически не изменяется сравнительно с τ_p для исходного ВВ, хотя $d_{кр}$ уменьшается в 3 раза. При $T_0=77,4$ К увеличение τ_p более существенно, но меньше зарегистрированного в [3] значения $\tau_p=0,5$ мкс для ЛМТ при $T_0 \approx 140$ К, что, возможно, связано с разными способами или скоростями охлаждения ВВ.

Причины слабого влияния T_0 на время реакции в рамках представлений теории теплового взрыва не ясны. Можно повторить по этому поводу только сказанное в [3]. Видимо, вообще некорректно применять для оценки зависимости τ_p от температуры ударного разогрева для неоднородных ВВ известное выражение для периода индукции [2, 12]. Это связано с влиянием «горячих точек» и при высоких ударных давлениях, статическим характером их параметров и взаимодействием друг с другом, что значительно усложняет описание ударного разогрева неоднородного ВВ и кинетики его превращения за детонационным фронтом.

Ранее в [8] уже указывалось на невыполнение сравнительной оценки τ_p по величине $d_{кр}$ на основе соотношения Харитона. Полученные данные дают еще одно убедительное доказательство этого. В [8] сравниваются значения $d_{кр}$ и $\tau_{p,кр}$ для ЛМТ и ЛКТ при нормальной температуре: $d_{кр2}/d_{кр1} \simeq 1,7$, а $\tau_{p,кр2}/\tau_{p,кр1} \simeq 1$, т. е. равенство $\tau_{p,кр2}/\tau_{p,кр1} = d_{кр2}/d_{кр1}$, следующее из соотношения Харитона, нарушается и имеет место неравенство $d_{кр2}/d_{кр1} > \tau_{p,кр2}/\tau_{p,кр1}$. Сравним аналогичным образом данные для ЛКТ при различных T_0 : при 290 К — $d_{кр2} = 27,5$ мм, $\tau_{p,кр2} = 0,35$ мкс [8, табл. 2], при 77,4 К — $d_{кр1} = 9$ мм, $\tau_{p,кр1} > \tau_{p1} = 0,38$ мкс (табл. 1, 2). Получаем $d_{кр2}/d_{кр1} \simeq 3$ и $\tau_{p,кр2}/\tau_{p,кр1} < 1$, т. е. имеет место более сильное неравенство. Это означает, что для твердых ВВ не существует прямой связи между τ_p и $d_{кр}$, как и в теории А. Н. Дремина для однородных ВВ [8].

Из данных табл. 2 следует, что u_1 , p_1 увеличиваются при понижении T_0 : при 77,4 К p_1 возрастает примерно на 19% сравнительно с определенным при 290 К, $\lambda = 0$. Это обстоятельство необходимо учитывать при расчете давления в контактирующей преграде при низких температурах. При $T_0 = 290$ К, $\lambda = 1$ параметры детонации также повышаются (давление на 9%) и приближаются к аналогичным величинам (кроме τ_p) для прессованного тротила с той же начальной плотностью (см. табл. 1, 2). Таким образом, «низкотемпературная обработка» улучшает и параметры Чепмена — Жуге стационарной детонации литого тротила. Это происходит в основном за счет уменьшения $d_{кр}$, так как параметры детонации зависят от диаметра заряда и растут при увеличении отношения $d/d_{кр}$.

В заключение приведем интересный экспериментальный факт. Известно, что для инициирования литого ТНТ необходим промежуточный заряд из более чувствительного ВВ [8]; непосредственно литой тротил не инициируется при помощи детонатора. Оказывается, что после двукратной «низкотемпературной обработки» заряд литого мелкокристаллического тротила диаметром 25 мм с углублением под капсюль диаметром 8 и глубиной 10 мм инициируется детонатором ЭД-8Э непосредственно без промежуточного заряда из более чувствительного ВВ в 70% случаев (статистика по 10 опытам). При $\lambda = 1$ процент взрывов — 20. Литой крупнокристаллический тротил в этих условиях не инициируется. Возможно, эффект связан как с уменьшением величины критического диаметра, так и с разницей в ударной чувствительности до и после «низкотемпературной обработки» для тротила двух типов отливок.

Таким образом, изменение начальной температуры в диапазоне 20—300 К оказывает относительно слабое влияние на детонационные характеристики литого ТНТ. На основании данных настоящей работы и [1—3, 9—11] это заключение, видимо, справедливо вообще для неоднородных ВВ. Представляется полезным учитывать этот вывод при построении теоретических моделей расчета детонационных характеристик неоднородных ВВ, например при расчете величины критического диаметра.

Обнаружен эффект улучшения детонационной особенности литого тротила при охлаждении заряда жидким азотом: $d_{кр}$ уменьшается в 2—4 раза. При этом «улучшаются» и параметры Чепмена — Жуге.

Поступила в редакцию
12/VII 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. S. A. Bordzilovskii, V. V. Silvestrov, V. M. Titov. Acta Astronautica, 1976, 3, 11—12, 1015.
2. А. Ф. Беляев, Р. Х. Курбангалина. ЖФХ, 1960, 34, 3, 603.
3. К. К. Шведов, С. А. Колдунов. — В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972, с. 439.

4. R. F. Chairen, J. C. Edwards. *Acta Astronautica*, 1976, 3, 9—10, 795.
5. C. L. Mader. *Proc. of the Sixth (International) Symposium on Detonation*, 1976, p. 405.
6. К. М. Михайлюк, В. С. Трофимов. *ФГВ*, 1977, 13, 4, 606.
7. V. M. Titov, V. V. Silvestrov et al. *Proc. of the Sixth (International), Symposium on Detonation*, 1976, p. 36.
8. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. *Детонационные волны в конденсированных средах*. М., «Наука», 1970.
9. В. Ф. Нестеренко. *ФГВ*, 1975, 11, 2, 324.
10. С. А. Бордзиловский, С. М. Караханов. *ФГВ*, 1975, 11, 3, 506.
11. В. В. Сильвестров, Н. Н. Горшков и др. *ФГВ*, 1975, 11, 5, 786.
12. Ф. А. Баум, Л. П. Орленко и др. *Физика взрыва*. М., «Наука», 1975.
13. J. W. Enig, F. J. Petrone. *Proc. of the Fifth (International) Symposium on Detonation*, 1970, p. 98.
14. D. Price. *Proc. of the Fifth (International) Symposium on Detonation*, 1970, p. 207.

СФЕРИЧЕСКИЙ ВЗРЫВ В РАДИАЛЬНО-НЕОДНОРОДНОЙ НАСЫЩЕННОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Е. Е. Ловецкий, А. М. Масленников, В. С. Фетисов

(Москва)

Создание радиальной неоднородности вокруг заряда — один из способов воздействия на механический эффект взрыва в твердой среде. Например, снижение давления в ударной волне можно получить с помощью зазора между зарядом и окружающей средой [1]. В настоящей работе рассматривается взрыв в радиально-неоднородной пористой среде с сообщающимися порами, которые насыщены газом или водой. Радиальную неоднородность можно создать следующим образом: в некоторой сферической области, окружающей заряд, газ (вода), первоначально находившийся в порах, заменяется соответственно водой (газом). Такое обводнение или осушение среды можно осуществить закачивая воду или газ в окрестность заряда.

Задачу о взрыве в среде с радиально-неоднородными свойствами можно сформулировать следующим образом. Пусть в начальный момент времени в сферической области размером a_0 мгновенно выделяется энергия взрыва W . Вещество в полости будем считать идеальным газом с постоянным показателем адиабаты $\gamma = 1,4$. Для описания движения среды воспользуемся гидродинамическими уравнениями, учитывая прочностные эффекты. В лагранжевых координатах эти уравнения имеют вид [4].

$$\begin{aligned}\frac{\partial v}{\partial t} &= v_0 \frac{r^2}{r_0^2} \frac{\partial u}{\partial r_0} + 2v \frac{u}{r}, \\ \frac{\partial u}{\partial t} &= v_0 \frac{r^2}{r_0^2} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r_0} + 2v \frac{\tau}{r}, \\ \frac{\partial E}{\partial t} + p \frac{\partial v}{\partial t} &= \frac{2}{3} \tau \left(v_0 \frac{r^2}{r_0^2} \frac{\partial u}{\partial r_0} - v \frac{u}{r} \right), \\ r &= r_0 + \int_0^t u dt.\end{aligned}\tag{1}$$

Здесь v и E — удельный объем и удельная энергия многокомпонентной среды; v_0 — начальный удельный объем; u — скорость; σ_r и σ_φ — ра-