

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ ОБОЛОЧЕК НА КРИТИЧЕСКУЮ ТОЛЩИНУ ДЕТОНАЦИИ НИЗКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ВВ

М. А. Соколов, С. М. Долгих, Е. Б. Смирнов

РФЯЦ, ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина, 456770 Снежинск, vniitf@vniitf.ru

Фотохронографическим методом определена связь критической толщины детонации в поперечных клиньях из пластифицированного ТАТБ с акустической жесткостью граничащего материала и скоростью звука в нем. Инициирование клиновидного заряда осуществлялось по всей боковой поверхности детонационной волной, распространяющейся в стационарном режиме.

Ключевые слова: взрывчатое вещество (ВВ), ударная волна (УВ), детонационная волна (ДВ), фотохронограммы, скорость детонации, скорость звука, боковая разгрузка, критическая толщина детонации.

DOI 10.15372/FGV2023.9294
EDN GJGLOJ

ВВЕДЕНИЕ

Критическая толщина детонации — одна из важных характеристик взрывчатых веществ (ВВ), определяющая их детонационную способность. Критическая толщина детонации — величина непостоянная и зависит от различных факторов, связанных как с технологией изготовления, так и с условиями применения ВВ.

Одним из первых советских ученых, занимавшихся исследованием критического диаметра детонации ВВ открытых зарядов, был Ю. Б. Харитон [1]. В основе большинства представлений о природе критического диаметра детонации лежит его известный физический принцип, согласно которому с уменьшением диаметра заряда ВВ увеличивается относительное количество реагирующего ВВ, разлетающегося из зоны химической реакции в стороны. Начиная с некоторого диаметра, называемого предельным, становится заметным уменьшение скорости детонации по мере уменьшения диаметра заряда ВВ. Наконец, при диаметре заряда, который называют критическим, относительная потеря энергии возрастает настолько, что в зоне химической реакции нарушается равновесие между выделением энергии и ее рассеиванием и самоподдерживающееся распространение детонации становится невозможным.

Разработанная в дальнейшем И. Ф. Ко-

былкиным с соавторами теория критического диаметра стационарной детонации [2–5] позволила связать критический радиус кривизны детонационного фронта с критическим диаметром детонации (d_{cr}). Также впервые было обращено внимание на определяющую роль начальной скорости разложения в зоне химической реакции [6]. Анализ влияния оболочки на величину d_{cr} с точки зрения рассмотренной выше теории критического диаметра был выполнен в работах [3, 4].

Исследование критических условий распространения детонации, в том числе критической толщины детонации, кроме pragma-тического интереса имеет важное фундаментальное значение. В области окологритических условий распространения детонации, реализующихся при приближении к критической толщине детонации, в значительной степени проявляются факторы, определяющие кинетику химической реакции в детонационной волне [2, 5]. Влияние этих факторов легче всего обнаруживается для ВВ, обладающих большой критической толщиной детонации. Яркими их представителями являются ВВ на основе триаминотринитробензола (ТАТБ). В данной работе экспериментально определялась критическая толщина детонации ВВ на основе ТАТБ, находящегося в контакте с материалами, различающимися динамической жесткостью (ρ_c).

Для определения критической толщины детонации ВВ традиционно используются методики продольного и поперечного клина. В

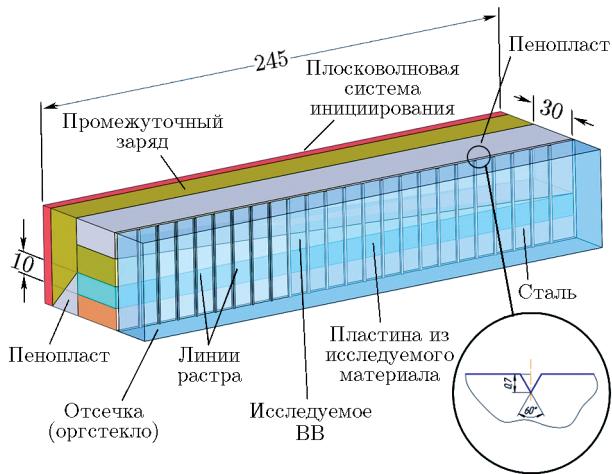


Рис. 1. Схема экспериментального узла

данной работе исследования проводились по методике поперечного клина с регистрацией места затухания детонации по прерыванию свечения в отсечке из оргстекла. Была проведена серия экспериментов с клиньями из ВВ пористостью $\approx 1.5\%$, граничащих с пластинами из ПММА (оргстекло), магния, алюминия, бериллия и меди.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальный узел (рис. 1) состоял из исследуемого образца ВВ на основе ТАТБ, выполненного в виде клина и расположенного на пластине из исследуемого материала толщиной 10 мм. Угол раствора клина ВВ $\alpha = 3^\circ$, ширина клина 245 мм, длина 30 мм. Для обеспечения технологичности сборки клин из ВВ приклеивался на подложку из пенопласта (ППС).

Инициирование клина из исследуемого ВВ осуществлялось от плосковолновой системы инициирования размером 245×45 мм через промежуточный заряд из аналогичного ВВ толщиной 20 мм. Чтобы не нагружать исследуемую пластину от промежуточного заряда, его подрезали и он контактировал только с клиновидным зарядом ВВ. Над клиновидным зарядом из исследуемого ВВ размещался пенопласт.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В экспериментах с помощью скоростного фотохронографа со скоростью развертки $v = 2.25$ мм/мкс в оконном режиме регистрировалось свечение ударных (УВ) и детонационных

(ДВ) волн при выходе на поверхность, прилегающую к отсечке из оргстекла, через выполненные в ней растровые линии. Такая постановка позволила определить форму детонационного фронта в заряде ВВ, форму УВ в пластине из исследуемого материала, место затухания детонации.

На рис. 2–6 представлены типичные фотохронограммы, полученные в опытах. Фотохронограммы развернуты по отношению к экспериментальному узлу на 180° , так как их регистрация осуществлялась через зеркало.

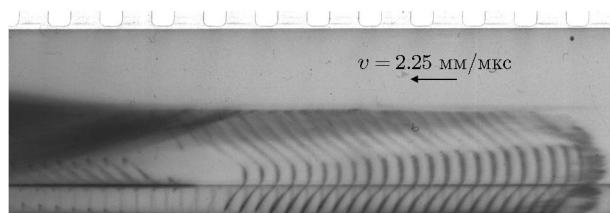


Рис. 2. Фотохронограмма опыта с пластиной из ПММА

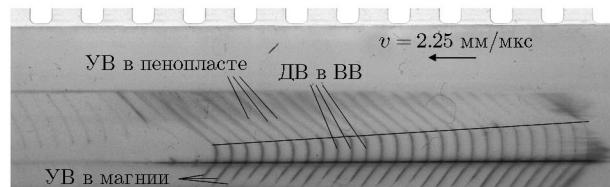


Рис. 3. Фотохронограмма опыта с пластиной из магния

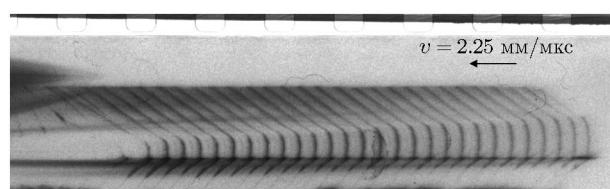


Рис. 4. Фотохронограмма опыта с пластиной из алюминия

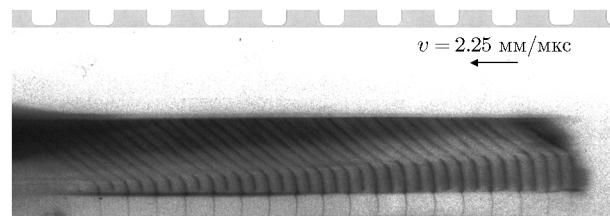


Рис. 5. Фотохронограмма опыта с пластиной из бериллия (растровые линии напротив пластины из бериллия выполнены с шагом 10 мм)

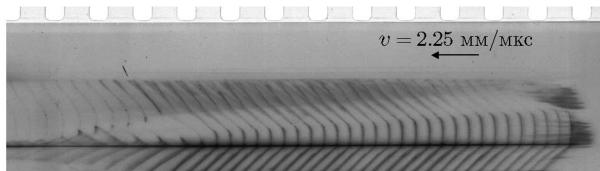


Рис. 6. Фотохронограмма опыта с пластиной из меди

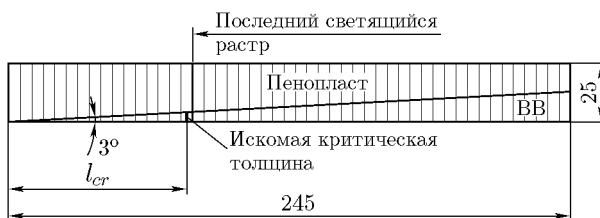


Рис. 7. Определение критической толщины детонации



Рис. 8. Фотография фрагмента алюминиевой пластины после опыта

На фотохронограммах рис. 2–6 видны сечения клина из ВВ, где отсутствовало взрывное превращение (нет свечения в растровых линиях) и где распространялась детонация (имеется свечение в растровых линиях). Так же видны формы УВ в пластинах под клином и в пенопласте над клином.

По полученным фотохронограммам критическая толщина детонации определялась, согласно рис. 7, по формуле

$$h_{cr} = l_{cr} \operatorname{tg}(3^\circ), \quad (1)$$

где l_{cr} — сечение, после которого отсутствовало свечение в растровых линиях; 3° — угол раствора клина из ВВ.

С учетом возможности прекращения детонации между линиями растра в качестве величины l_{cr} принималось сечение, расположенное на расстоянии 2.5 мм (половина расстояния

между линиями растра) от линии растра, после которой отсутствовало свечение в области клина из ВВ. Погрешность определения критической толщины составила $\Delta h_{cr} = \pm 0.2$ мм.

Место прерывания детонации в опытах с пластиинами из алюминия определялось также по отпечатку, оставленному детонационной волной на пластиине. На рис. 8 приведена фотография алюминиевой пластины, сохраненной после опыта. На ней видны следы от затекания материала в канавки растра, отпечатавшиеся линии растра и поверхность, подверженная и не подверженная воздействию ДВ. Пластины из других исследуемых материалов сохранить не удалось.

3. ОБСУЖДЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные в серии экспериментов результаты показаны на рис. 9 в виде зависимости критической толщины детонации исследуемого ВВ (h_{cr}) от жесткости материала контактирующей пластины pc .

Характер зависимости согласуется с результатами, полученными ранее в работе [7]. При этом погрешность определения места прекращения детонации в этом случае по данным электроконтактных измерений составляет ± 2.5 мм, а по сохраненной подложке — 0.1 мм. Соответственно погрешность определения критической толщины по данным электроконтактных измерений составляет ≈ 0.25 мм, а в случае измерения по сохраненной подложке находится на уровне ≈ 0.1 мм. Отличие в определении значений h_{cr} в методиках продольного и поперечного клина составляет $\approx 30\%$. При этом около 0.3 мм приходится на методическую погрешность, а оставшиеся 2.2 мм связаны с проскоком детонации при использовании продольного клина. Под проскоком подразумевается распространение ДВ по инерции в таких условиях, в которых при стационарном режиме детонация распространяться не может. Для поперечного клина проскок ДВ от системы инициирования также хорошо заметен на начальном этапе, при входе детонации в клин (на сохранившейся алюминиевой пластиине рис. 8 видно изменение границы между поверхностями, подверженной и не подверженной воздействию детонации). Тем не менее при выходе из поперечного клина эффект поддержки детонации со стороны толстых слоев ВВ незначителен из-за достаточно большого пути распростране-

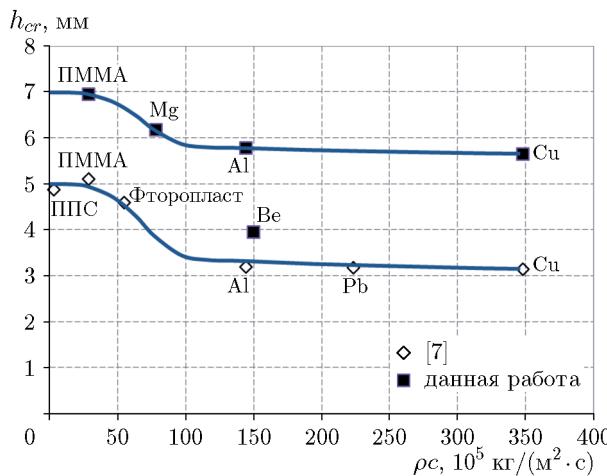


Рис. 9. Зависимость критической толщины детонации от жесткости материала, граничащего с исследуемым ВВ

ния детонации в критических условиях (30 мм) и малого угла раствора (3°) клина.

Из данных рис. 9 видно, что сжимаемость материала контактирующей пластины оказывает влияние на критическую толщину детонации ВВ на основе ТАТБ. Полученные результаты подтверждают сделанный в работе [8] вывод, что в контакте с плоским зарядом ВВ материал с более высокой сжимаемостью, чем сжимаемость заряда ВВ, не приводит к изменению формы фронта вдоль контактной границы и, соответственно, к уменьшению критической толщины детонации. Когда ВВ более сжимаемо, чем контактирующий материал, угол наклона детонационного фронта к контактной границе уменьшается, что приводит к снижению критической толщины детонации.

Результаты измерений, представленные на рис. 9, показывают, что из общей зависимости выпадает значение критической толщины детонации, полученной в опыте с пластиной из бериллия. Сжимаемость бериллия близка к алюминию и вдвое меньше меди, однако критическая толщина детонации исследуемого ВВ, контактирующего с бериллием, на $\approx 30\%$ меньше, чем при контакте с двумя последними материалами.

Более низкое значение критической толщины детонации исследуемого ВВ, контактирующего с бериллием, можно объяснить особенностями в распространении детонационного фронта вдоль данного материала, связанными с соотношением скорости детонации ВВ со скоростью звука в бериллии.

В случае, когда скорость детонации пре-

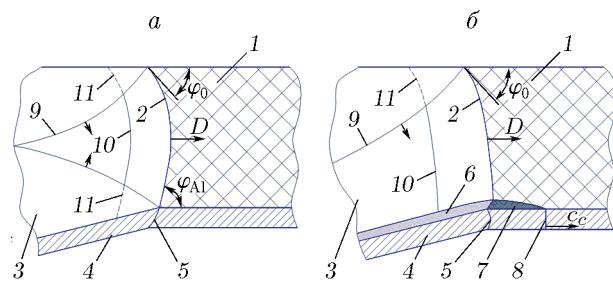


Рис. 10. Форма фронта ДВ при контакте с алюминием (а) и бериллием (б):

1 — ВВ, 2 — фронт ДВ, 3 — продукты детонации, 4 — оболочка Be (Al), 5 — пластическая (ударная) волна, 6 — недетонирующий слой ВВ, 7 — область уплотненного ВВ, 8 — упругий предвестник, 9 — волны разгрузки, 10 — граница зоны химической реакции, не подверженной боковой разгрузке, 11 — граница зоны химической реакции, подверженной боковой разгрузке

вышает скорость звука в контактирующем материале ($D > c$), угол наклона детонационного фронта в ВВ определяется жесткостью контактирующего материала ρ_c . Из фотохронограмм видно, что угол наклона детонационного фронта к контактной границе составляет менее 90° , но больше угла φ_0 , под которым детонационный фронт распространяется вдоль свободной поверхности заряда (рис. 10, а). При этом опережающая точка детонационного фронта находится вблизи центра поперечного сечения ВВ.

В случае распространения детонации вдоль бериллия, когда скорость детонации ниже скорости звука в контактирующем материале ($D < c$), упругий предвестник в бериллии опережает детонационный фронт и оказывает предварительное воздействие, уплотняя его (рис. 10, б). Вблизи контактной границы возможно наличие недетонирующего тонкого слоя ВВ, а также воздушного зазора между зарядом и контактирующим материалом в области уплотненного ВВ. Угол наклона детонационного фронта к границе с бериллием превышает 90° , и его опережающая точка находится вблизи контактной границы. Размер зоны химической реакции, не подверженной разгрузке, в опытах с бериллием больше, чем в остальных опытах. Это обуславливает меньшее значение критической толщины детонации при ее распространении вдоль бериллия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью фотохронографической методики проведены экспериментальные исследо-

вания критической толщины детонации в по-перечных клиньях из пластифицированного ТАТБ. Определена связь критической толщины детонации с акустической жесткостью и скоростью звука граничащего с ВВ материала.

Результаты проведенных экспериментов показали, что на критическую толщину детонации оказывает влияние как сжимаемость контактирующего материала, когда $D > c$, так и скорость звука в контактирующем материале, когда $D < c$. Аналогичные выводы отмечаются в работе [8].

Полученные экспериментальные данные можно использовать для калибровки численных методик расчета распространения детонации в зарядах из пластифицированного ТАТБ, граничащих с материалами различной динамической жесткости, с учетом кинетики детонации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет средств бюджета РФЯЦ-ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Харитон Ю. Б.** Вопросы теории ВВ. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1947. — Кн. 1. — С. 7–28.
2. **Кобылкин И. Ф., Соловьев В. С., Бойко М. М.** Природа критического диаметра стационарной детонации в конденсированных ВВ // Тр. МВТУ № 387. Механика импульсных процессов. — М.: Изд-во МВТУ, 1982.
3. **Кобылкин И. Ф., Соловьев В. С., Бойко М. М.** Влияние оболочки на величину критического диаметра детонации // Тр. МВТУ № 399. Механика импульсных процессов. — М.: Изд-во МВТУ, 1983.
4. **Кобылкин И. Ф., Соловьев В. С., Бойко М. М.** Критический диаметр стационарной детонации высокоплотных ВВ. Влияние оболочки // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19, № 4. — С. 120–123.
5. **Кобылкин И. Ф., Соловьев В. С.** Критические условия распространения детонационных процессов. — М.: Изд-во МГТУ, 1991.
6. **Михайлюк К. М., Трофимов В. С.** О возможном газодинамическом пределе распространения стационарной детонации // Физика горения и взрыва. — 1977. — Т. 13, № 4. — С. 606–613.
7. **Просвирнин К. М., Лобайко Б. Г., Ко-стицын О. В., Смирнов Е. Б., Беленовский Ю. А. и др.** Влияние динамической жесткости оболочки на величину критической толщины детонации ВВ на основе ТАТБ // Тр. междунар. конф. «ХIII Харитоновские тематические научные чтения». — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. — С. 308–313.
8. **Кобылкин И. Ф.** Критический диаметр детонации зарядов промышленных взрывчатых веществ. Влияние оболочки // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 1. — С. 108–114.

Поступила в редакцию 09.01.2023.

После доработки 17.04.2023.

Принята к публикации 24.05.2023.