

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ ОБОЛОЧКИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ПЛОСКИХ ЗАРЯДАХ ИЗ НИЗКОУЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ВВ НА ОСНОВЕ ТАТЬ.

С.М. Долгих, М.А. Солодов, В.Н. Смирнов, Е.Б. Смирнов  
solokovm1982@mail.ru

Российский федеральный ядерный центр - ВНИИФ им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск  
XXXIV международная конференция «Физика экстремальных состояний вещества»

Детонационный фронт, распространяющийся в зарядах конечных поперечных размеров, имеет искривленный вид. Угол наклона детонационного фронта к границе пластины зависит от жесткости (акустического импеданса) ее материала. Особые свойства бериллия (большой модуль Юнга, малый коэффициент Пуассона и пр.) известны, и они есть следствие повышенной скорости звука в этом материале. Наличие границей с зарядом ВВ стенки из бериллия, обладающего большой жесткостью должно приводить к выпрямлению детонационного фронта. Однако из-за большой величины скорости звука в бериллии ( $c \approx 8,1$  км/с) в нем распространяется ударная волна со скоростью, превышающей скорость детонации. Такая ударная волна, движущаяся перед фронтом детонации, поджимает граничащий с бериллием тонкий слой ВВ. В результате тонкий слой ВВ вблизи границы заряда низкочувствительного ВВ может не детонировать.

В опытах, представленных в докладе, детонация по ВВ распространялась в скользящем режиме. При этом в бериллии формируются две волны сжатия. Первая волна – упругая. Ее скорость в 1,8 раза превышает скорость детонации ВВ. Эта волна всегда уходит вперед по отношению к фронту детонации, то есть является отсоединенной волной. Она подвергает нереагирующее ВВ небольшому предварительному сжатию в области бокового контакта, что в итоге сказывается на характере детонации. Вторая волна – пластическая. Эта волна может быть ударной или простой волной сжатия. Для нее возможны разные ситуации: быть присоединенной или уходить вперед, хотя и на меньшее расстояние, чем упругая волна [1]. Присоединенная волна не создает упреждающего сжатия ВВ. Фронт пластической волны, реализованный в опытах, немного выпуклый в направлении движения и даже вовсе плоский и не строго перпендикулярный к боковой поверхности (рисунок 1).

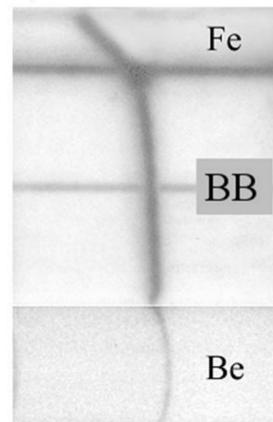


Рисунок 1 – Фотохронограмма формы фронта детонации в заряде ВВ и УВ в бериллии (развертка справа налево  $V_p=3$  мм/мкс по фотопленке)

В данной работе обсуждаются результаты экспериментов по исследованию взаимодействия УВ и ДВ для схемы плоского заряда из низкочувствительного ВВ, заключенного с боков в оболочки из стали и бериллия (рисунок 2).

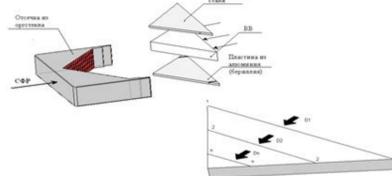


Рисунок 2 – Экспериментальный узел без корпуса

Достоинство постановки опытов с использованием фотохронографической (растровой) методики и клиновидных образцов заключалось в возможности одновременно наблюдать детонационный фронт в ВВ, пластическую волну в бериллии и УВ в стали, а также передачу ударного импульса от ВВ к стали через прослойку изотропически сжатого бериллия. Причем весь комплекс волн изучался в зависимости от времени. Получены результаты по уплощению и развороту фронта ДВ вследствие влияния бериллия. Показано, что неравенства  $D_{ВВ} > D_{ВВ}$  и  $C_{ВВ} > C_{ВВ}$  создают условия для формирования опережающих возмущений в детонирующем ВВ. Опережающие возмущения, в отличие от отстающих, особенно заметны и в разной форме влияют на детонационный фронт. Сюда можно отнести: ускорение фронта, гашение детонации в пограничном слое, формирование источников поперечных волн и осуществление разворота фронта детонации. Такого многообразия явлений не наблюдается, если низкочувствительное ВВ граничит с обычными материалами.

Результативным способом исследования прямой и обратной реакции в схеме низкочувствительное ВВ-бериллий является эксперимент. Следует подчеркнуть, что скорость пластической волны в бериллии лишь на 4 % больше скорости детонации ВВ. Фактически можно принять  $D_{ВВ} \approx C_{ВВ}$ . С точки зрения распространения слабых возмущений в бериллии ситуация, когда источник возмущения бежит со скоростью звука (ДВ в низкочувствительном ВВ на основе ТАТЬ), является особенной. В любой момент времени возмущения ранние и поздние в бериллии имеют общую точку касания, совпадающую с бегущей точкой контакта ДВ (рисунок 3). Аналогичные результаты получены в [2].

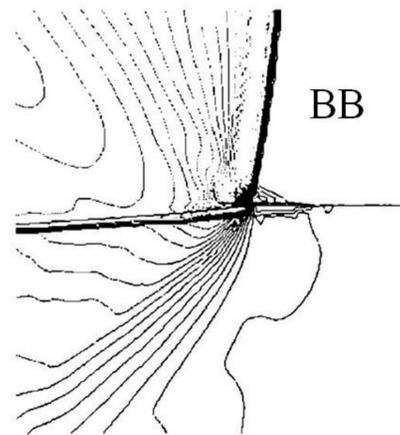


Рисунок 3 – Поля течений и изолинии давления в низкочувствительном ВВ на основе ТАТЬ и бериллиевой оболочке

Рассмотрим вопрос гашения детонации в тонком слое ВВ на границе с бериллием в наших опытах. Имеется единая точка зрения относительно природы упреждающего поджатия ВВ в опытах с бериллиевой или керамической стенкой. Поджатие обусловлено кривой УВ в пристеночном слое. Различие заключается в трактовке причины формирования кривой УВ. В [3] причиной считалась отсоединенная пластическая волна в бериллии. В наших опытах причиной является упругий предвестник в бериллии, ибо пластическая волна оказалась присоединенной к фронту детонации. В опытах с керамикой [4] трактовка идентична нашей (рисунок 4).

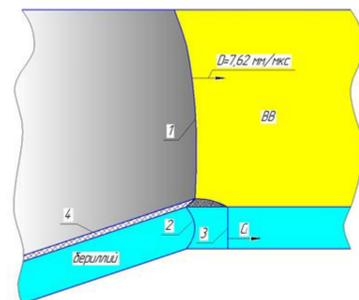


Рисунок 4 – Форма фронта ДВ при контакте низкочувствительного ВВ с бериллием

Наблюдать инертный тонкий слой на фоне толстой стенки бериллия – трудная задача в методическом аспекте. Обратим внимание на одну особенность, наблюдаемую в опытах. Речь идет о локальном отставании фронта детонации вблизи границы с бериллием (рисунок 2). Предположим, что эта особенность есть отклик локального гашения детонации. Толщину слоя изгиба примем в качестве толщины инертного слоя в ВВ. Измерения, выполненные в опытах после прохождения детонационной волной пути 90,64 мм, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Толщина инертного слоя ВВ

пористость, %	2,2	1,5	1,2
толщина инертного слоя, мм	0,97±0,13	0,95±0,24	1,14±0,23

При варьировании пористости низкочувствительного ВВ толщина инертного слоя практически не изменилась.

При нагружении бериллия фронтом детонации, который перпендикулярен контактной границе, в бериллии регистрируется волна, распространяющаяся параллельно этой границе с фронтом малой кривизны. Опережающая точка фронта волны наблюдается в середине бериллиевого слоя и опережает фронт ДВ на ~0,2 мкс. Такое поведение волны резко отличается от привычной кривой УВ, свойственной материалам с умеренной скоростью звука. Зарегистрированная величина скорости волны (~7,9 мм/мкс) близка к величине объемной скорости звука для бериллия  $C_{ВВ} = 7,9-8,1$  мм/мкс [5, 6]. Следовательно, массовая скорость вещества за фронтом такой волны близка к нулю, то есть волна очень слабая. В [2] регистрируется также слабая УВ  $D_{ВВ} = 8,2$  мм/мкс. Сжатие в такой волне всего лишь ~2 %.

Таким образом, можно сделать вывод, что нагружение бериллия продуктами взрыва при скользящей детонации осуществляется практически безударно, то есть изотропически.

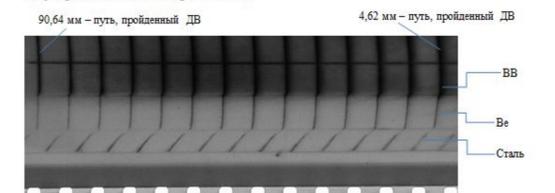
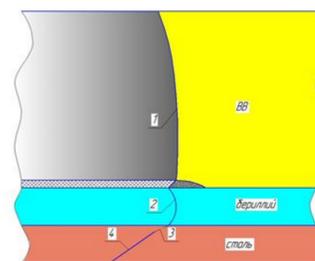


Рисунок 5 – Фотохронограмма опыта (развертка справа налево  $V_p=2,25$  мм/мкс по фотопленке)

Обратим внимание на процесс формирования УВ в стали, граничащей с бериллием (рисунок 5). В стальной преграде видны два световых следа (один продолжение другого) разной яркости и разного угла наклона. Пояснение дано на схеме рисунка 6. Первый след по сравнению со вторым менее ярк и наклонен под меньшим углом. Аналогичная картина реализовалась и в других опытах с бериллием при любом фронте пластической волны в бериллии (выпуклом и плоском).



1 – фронт ДВ в низкочувствительном ВВ; 2 – волна сжатия в бериллии; 3 – акустическая волна в стали; 4 – ударная волна в стали.

Рисунок 6 – Форма фронта ДВ и УВ при детонации низкочувствительного ВВ в скользящем режиме с бериллиевой и стальной оболочками

Первый след по сравнению со вторым менее ярк и наклонен под меньшим углом (24° и 35° соответственно). Согласно оценкам первый след есть звуковая волна, а второй след – УВ с давлением на фронте 16,3 ГПа. Такое давление получается, если амплитуда волны сжатия в Ве равна 12 ГПа. Толщина “звукового” слоя стали ~1,8 мм. Любопытно отметить, что угол наклона волн, следующий из оценок (акустическое приближение) равен 29°, что близко к эксперименту. Таким образом, элементы акустики имеют место при передаче детонационного импульса через толстый слой бериллия.

Также одной из важных характеристик взрывчатых веществ, определяющих его детонационную способность, является критическая толщина детонации. Критическая толщина детонации – величина не постоянная и зависит от различных факторов, связанных как с технологией изготовления, так и с условиями применения ВВ.

В данной работе проводились исследования по методике «поперечного» клина с регистрацией места затухания детонации по прерыванию свечения в оргстеклянной отсечке. Была проведена серия экспериментов с клиньями из ВВ пористостью ~1,5%, граничащих с пластинами из ПММА (оргстекло), фторопласта, магнезия, алюминия, бериллия и меди.

Экспериментальный узел (рисунок 7) состоял из исследуемого образца ВВ на основе ТАТЬ, выполненного в виде клина и расположенного на пластине из исследуемого материала. Толщина пластины составляла 10 мм. Угол раствора клина ВВ составлял  $\alpha=3^\circ$ , ширина клина – 245 мм, длина – 30 мм.

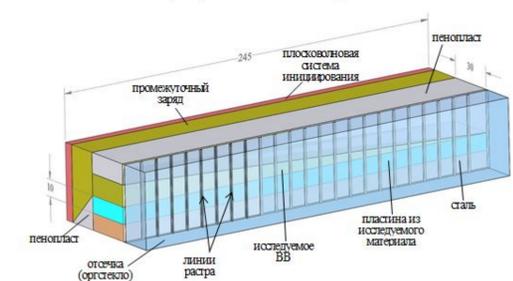


Рисунок 7 – Схема экспериментального узла

В экспериментах также с помощью скоростного фотохронографа со скоростью развертки (справа налево) по фотопленке  $V_p=2,25$  мм/мкс через растровые линии регистрировалось свечение ударных и детонационных волн при выходе на поверхность, прилегающей к отсечке из оргстекла, что позволяло определять форму детонационного фронта в заряде ВВ, форму ударной волны в пластине из исследуемого материала, место затухания детонации.

На рисунках 8-13 представлены типичные изображения фотохронограмм, получаемых в опытах. На фотохронограммах можно видеть сечения клина из ВВ, где отсутствовало взрывчатое превращение (нет свечения в растровых линиях) и где распространялась детонация (имеется свечение в растровых линиях). Также видны формы ударных волн в пластинах под клином и в пенопласте над клином.

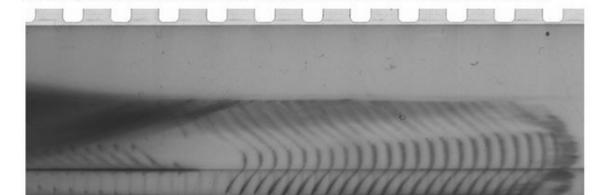


Рисунок 8 – Фотохронограмма опыта с пластиной из ПММА

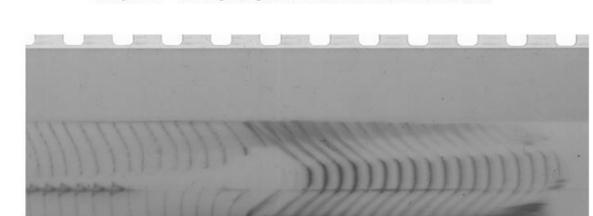


Рисунок 9 – Фотохронограмма опыта с пластиной из фторопласта

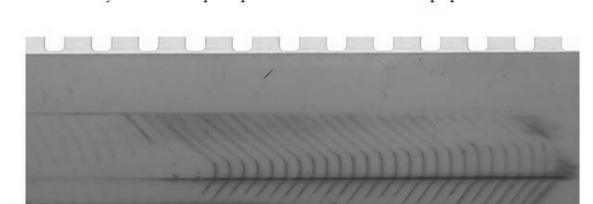


Рисунок 10 – Фотохронограмма опыта с пластиной из магнезия

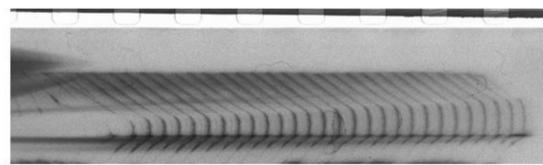


Рисунок 11 – Фотохронотрама опыта с пластиной из алюминия

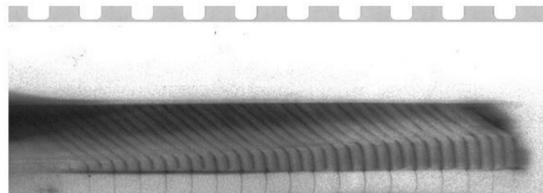


Рисунок 12 – Фотохронотрама опыта с пластиной из бериллия (растровые линии напротив пластины из бериллия были выполнены с шагом 10 мм)

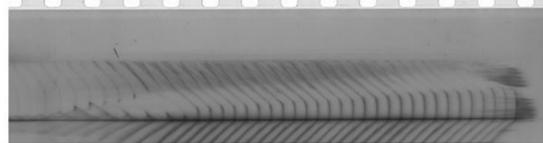


Рисунок 13 – Фотохронотрама опыта с пластиной из меди

Полученные в результате серии экспериментов результаты показаны на графике рисунка 14 в виде зависимости критической толщины детонации исследуемого ВВ ( $h_{cr}$ ) от жесткости материала контактирующей пластины ( $\rho \cdot V_{mat}$ ).

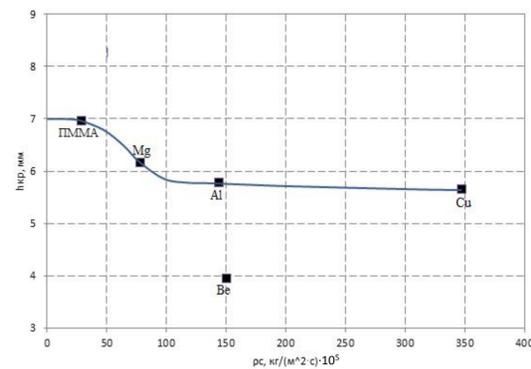


Рисунок 14 – Зависимость критической толщины детонации от жесткости материала, граничащего с исследуемым ВВ

Из данных рисунка 14 видно, что сжимаемость материала контактирующей пластины оказывает влияние на величину критической толщины детонации ВВ на основе ТАТБ. Характер зависимости согласуется с результатами, полученными ранее в работе [9]. Полученные результаты подтверждают сделанный в работе [10] вывод, что наличие материала с более высокой сжимаемостью, чем сжимаемость заряда ВВ, не приводит к изменению формы фронта вдоль контактной границы и, соответственно, к уменьшению критической толщины детонации.

Результаты измерений, представленные на рисунке 14, 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, связанных с соотношением скорости детонации ВВ со скоростью звука в бериллии.

Результаты проведенных экспериментов показали, что на величину критической толщины 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 [10].

Список литературы

- Eden, R.A. Belcher. The Effects of Inert Walls on the Velocity of Detonation in EDC 35, an Insensitive High Explosive // Proceedings of the 9-th International Symposium on Detonation, 1989. –V.1-P.831-841.
- И.А. Балаганский, А.В. Виноградов, Л.А. Мерзиевский, А.Д. Матросов, И.А. Стадниченко Анализ влияния материала оболочки на процесс детонации заряда взрывчатого вещества // Физика горения и взрыва. – 2018. – Т.54. – №4. – С. 130-138.
- И.А. Балаганский, В.А. Агурейкин, С.В. Разоренов, А.В. Уткин Влияние инертной стенки из высокомодульной керамики на распространение детонации в зарядах конденсированных ВВ // Физика горения и взрыва. – 1994. – Т.30. – №5. – С. 107-114.
- И.А. Балаганский, И.Ф. Кобылкин, С.В. Разоренов Влияние оболочки из карбида кремния на детонационные параметры в зарядах ВВ. Красноярск, 1991. С. 345-350.
- И.А. Балаганский, Л.А. Мерзиевский Действие средств поражения и боеприпасов. Учебник НГТУ, Новосибирск, 2004.
- И.А. Балаганский, А.И. Балаганский, И.Ф. Кобылкин, Н.И. Носенко Влияние оболочки заряда ВВ на форму фронта детонационной волны. VIII Забавкинские научные чтения, Снежинск 2005.
- И.Ф. Кобылкин, В.С. Соловьев, М.М. Бойко «Природа критического диаметра стационарной детонации в конденсированных ВВ» Труды МВТУ № 387. Механика импульсных процессов. М.: Изд-во: МВТУ, 1982г.
- И.Ф. Кобылкин, В.С. Соловьев «Критические условия распространения детонационных процессов» М.: Изд-во: МГТУ, 1991г.
- Б.Г. Лобойко, В.П. Филин, О.В. Костыцын, Е.Б. Смирнов и др. «Определение критической толщины детонации ВВ на основе ТАТБ, контактирующего с материалами, отличающимися динамической жесткостью» X Забавкинские научные чтения, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, 2010г.
- И.Ф. Кобылкин «Критический диаметр детонации зарядов промышленных ВВ. Влияние оболочки» Новосибирск, Изд-во: Сибирского отделения РАН, ФГВ, т.47, №1, 2011г.

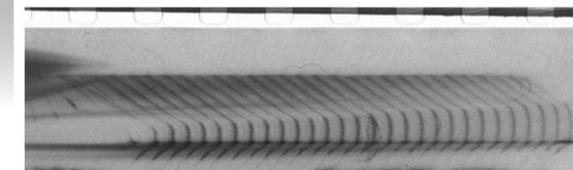


Figure 11. Streak-camera record from the experiment with the aluminum plate

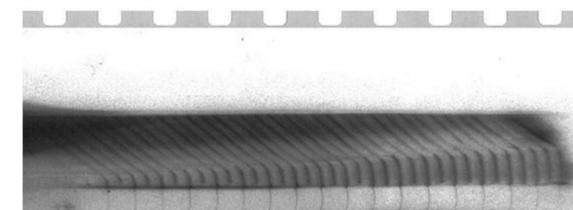


Figure 12. Streak-camera record from the experiment with the beryllium plate (raster lines opposite to the beryllium plate have 10-mm spacing)

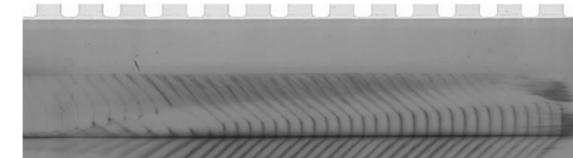


Figure 13. Streak-camera record from the experiment with the copper plate Results given by the series of experiments are plotted in Figure 14 as the critical thickness,  $h_{cr}$ , of HE detonation versus rigidity of the contacting plate material,  $\rho \cdot V_{mater}$ .

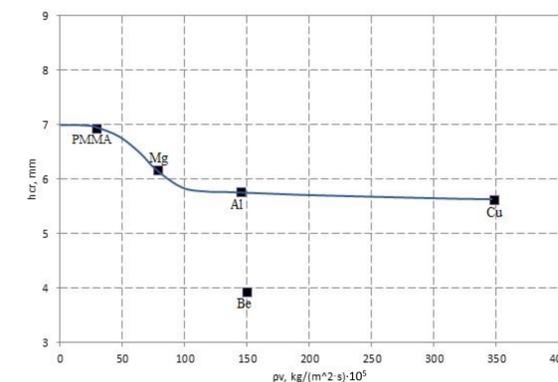


Figure 14. Critical thickness of detonation versus rigidity of HE-adjacent material

From Figure 14, it is obvious that compressibility of the contacting plate material influences the critical thickness of TATB-based HE detonation and this relationship agrees with the previous one from [9]. Our results confirm the conclusion from [10] that presence of a material with greater compressibility compared to that of the HE charge causes no changes in the front shape along the contact boundary and, thus, no decrease in the critical thickness of detonation.

Measurement results shown in Figure 14 demonstrate that the critical thickness of detonation in the experiment with the beryllium plate “falls out” of the general relationship. Compressibility of beryllium is close to that of aluminum and two times less compared to copper though critical thickness of the detonating HE adjacent to beryllium is by  $\approx 30\%$  less than in the case of contact with two other materials.

A smaller critical thickness of HE detonation in the experiment with beryllium can be explained by certain features existing in the detonation front propagation along a particular material and these features are due to the “HE detonation velocity – sound velocity” ratio in beryllium.

Experimental results demonstrate that the critical thickness of detonation depends both on compressibility of the contacting material when  $D > V$ , and on the sound velocity in the contacting material when  $D < V$ . Similar conclusions are made in paper [10].

References

- Eden, R.A. Belcher. The Effects of Inert Walls on the Velocity of Detonation in EDC 35, an Insensitive High Explosive // Proceedings of the 9-th International Symposium on Detonation, 1989. –V.1-P.831-841.
- I.A. Balagansky, A.V. Vinogradov, L.A. Merzhievsky, A.D. Matrosov, I.A. Stadnichenko. Effect of Shell Material on the Detonation of an Explosive Charge // Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2018. – V.54.-No.4-Pp. 130-138.
- I.A. Balagansky, V.A. Agureikin, S.V. Razorenov, A.V. Utkin. Effect of an Inert High-Modulus Ceramic Wall on Detonation Propagation in Solid Explosive Charges // Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1994. – V.30.-No.5.-Pp. 107-114.
- I.A. Balagansky, I.F. Kobylkin, S.V. Razorenov. Effect of SiC Shell on the Parameters of Detonation in Explosive Charges. Krasnoyarsk, 1991. Pp. 345-350.
- I.A. Balagansky, L.A. Merzhievsky. Action of Destruction Means and Munitions, Training Manual, NGTU Press, Novosibirsk, 2004.
- I.A. Balagansky, A.I. Balagansky, I.F. Kobylkin, N.I. Nosenko. Influence of High Explosive Charge Shell on Detonation Front Shape // VIII International Conference “Zababakhin Scientific Talks”, Snezhinsk, 2005.
- I.F. Kobylkin, V.S. Solov'ev, M.M. Boiko. The Character of Critical Diameter of Stationary Wave in Condensed Explosives // Proceeding of Moscow Higher Technical School (MVTU), No.387. Mechanics of Pulse Processes. MVTU Press, Moscow, 1982.
- I.F. Kobylkin, V.S. Solov'ev. Critical Conditions of Detonation Propagation. MGTV Press, Moscow, 1991.
- B.G. Loboiko, V.P. Filin, O.V. Kostitsyn, E.B. Smirnov et al. Determining the Critical Thickness of TATB-based Explosive Being in Contact with Materials Having Different Dynamic Rigidity // X International Conference “Zababakhin Scientific Talks”, VNIITF, Snezhinsk, 2010.
- I.F. Kobylkin. Critical Detonation Diameter of Industrial Explosive Charges: Effect of the Casing// Novosibirsk, The RAS Siberian Branch Press // Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2011. – V.47.-No.1.

EFFECT OF SHELL'S DYNAMIC RIGIDITY ON DETONATION PROPAGATION IN FLAT CHARGES OF INSENSITIVE TATB-BASED EXPLOSIVES

S.M. Dolgikh, M.A. Sokolov, V.N. Smirnov, E.B. Smirnov  
sokolovm1982@mail.ru

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

XXXIV International Conference "Physics of Extreme States of Matter"

Detonation front propagating in the finite-transverse-size charges is bent. The angle of detonation front with the adjacent plate depends on the rigidity, i.e. acoustic impedance, of this plate's material. Well-known beryllium properties such as high Young's modulus, low Poisson ratio, etc., are due to the increased velocity of sound in Be. The presence of a high-rigidity Be wall adjacent to charge should lead to detonation front unbending. However, high sound velocity of  $\approx 8.1$  km/s causes the shock wave to propagate in Be faster than a detonation wave. It goes ahead of detonation front and slightly compresses the thin HE layer adjacent to Be. As a result, the thin HE layer located near the insensitive HE charge boundary can fail to detonate.

In the experiments described, the sliding mode of HE detonation propagation was attained. Two compression waves developed in Be therein. The first one is an elastic wave with the velocity 1.8 times higher than that of HE detonation. This wave always gets ahead of detonation front which means that this is a detached wave. It is responsible for slight side-contact pre-compression of nonreacting HE, which determines the detonation character. The second wave is plastic. It can be either a shock wave or a simple compression wave. So, different scenarios of this wave propagation are possible. For example, it can be an attached wave or it can go ahead of detonation front but at a smaller distance than the elastic wave does [1]. Attached wave causes no preliminary HE compression. The plastic wave front observed in experiments was slightly convex in the direction of its travel or even plane and not completely perpendicular to the side surface (Figure 1).

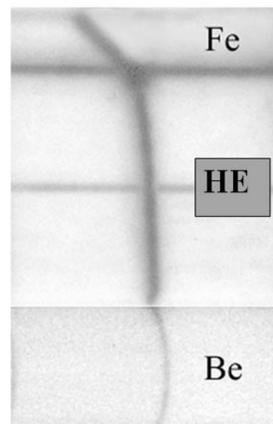


Figure 1. Streak-camera record revealing detonation front shape in HE charge and shock wave shape in Be (time from right to left,  $V_{sweep}=3$  mm/ $\mu$ s)

The paper discusses results of experiments aimed to study the interaction between the shock wave and the detonation wave using a flat charge made of insensitive HE enclosed in steel and beryllium on lateral sides (Figure 2).

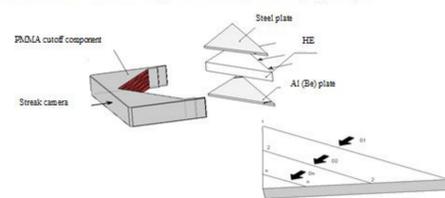


Figure 2. Experimental assembly without a casing

Experimental setup that uses streak-camera photorecording, or scanning analysis, and wedge-shaped samples has an advantage of simultaneous observation of

the detonation front in HE, the plastic wave in Be, and the shock wave in steel, as well as of the shock pulse transfer from HE to steel through the layer of isentropically compressed beryllium. At that, the whole range of waves was studied over time. We acquired the data on how beryllium effects the detonation front flattening and unbending. It is shown that the  $D_{Be} > D_{HE}$  and  $V_{Be} > D_{HE}$  inequalities establish conditions for the development of overtaking perturbations in detonating HE. Unlike the lagging ones, the overtaking perturbations are very distinct and have diverse effects on detonation front, which include acceleration of front, extinction of detonation in the adjacent layer, formation of transverse wave sources, and detonation front unbending. Such a variety of effects is not observed when insensitive HE is placed adjacent to conventional materials.

Experiment is an effective method to study the direct and indirect reactions when using the "insensitive HE – Be" scheme. It should be emphasized that plastic wave velocity in Be is only 4% higher than that of HE detonation. In fact, we can assume that  $D_{HE} \approx V_{Be}$ . From the perspective of weak perturbations propagating in Be, the situation when perturbation source, namely the detonation wave observed in the insensitive TATB-based explosive, moves at the sound velocity should be treated as a special case. At any given time, the early and late perturbations in Be have a common point of contact, which coincide with the moving detonation-wave point of contact (Figure 3). Similar results are given in paper [2].

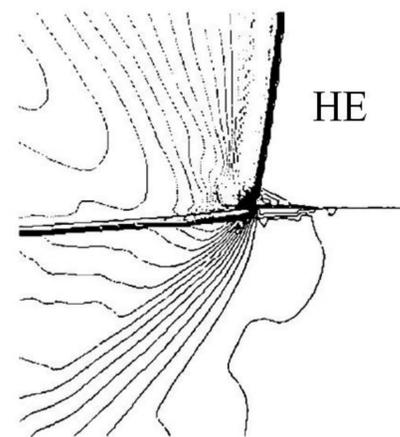


Figure 3. Flow fields and constant-pressure lines in the insensitive TATB-based explosive and the Be shell

Let us discuss the detonation extinction experimentally observed in the thin HE layer at the beryllium boundary. All experts share one view on the nature of preliminary HE compression in the experiments with Be and ceramic wall. It is believed that pre-compression is due to an oblique shock wave observed in the near-wall layer. The difference is in the treatment of reasons why this oblique shock wave is developed. According to paper [3], detached plastic wave in Be is deemed to be responsible for this phenomenon. In our experiments, the reason is an elastic precursor observed in Be since the plastic wave appeared to be attached to the detonation front. In the experiments with ceramics [4], the treatment is similar to ours (Figure 4).

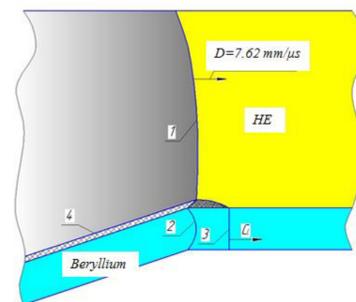


Figure 4. Detonation front shape observed when insensitive HE contacts with Be

Methodically, it is a challenging task to register inert thin layer against a thick Be wall. Attention should be paid to a phenomenon observed in the experiments, i.e. the local detonation front lagging near Be boundary (Figure 2). Suppose that this is a local detonation extinction response. Let bend layer thickness be the thickness of an inert HE layer. Experimental measurements taken after the detonation wave travelled the distance of 90.64 mm are given in Table 1.

Table 1. Inert HE layer thickness

Porosity, %	2.2	1.5	1.2
Inert layer thickness, mm	0.97±0.13	0.95±0.24	1.14±0.23

Variation of insensitive HE porosity causes practically no changes in the inert layer thickness.

When beryllium is loaded by the detonation front which is perpendicular to contact boundary, the wave propagating in parallel to this boundary and having a low curvature front is registered in Be. The overtaking wave front point is observed in the middle of Be layer and has a lead of  $\sim 0.2$   $\mu$ s when compared to detonation wave front. Such wave behavior differs markedly from that of conventional oblique wave typical for materials with moderate sound velocity. The registered wave velocity of  $\sim 7.9$  mm/ $\mu$ s is close to volumetric sound velocity for Be,  $V_{Be}=7.9\sim 8.1$  mm/ $\mu$ s [5, 6]. Hence, mass matter velocity behind the front of this wave is close to zero, which means that it is very weak. In paper [2], they also registered a weak shock wave,  $D_{Be}=8.2$  mm/ $\mu$ s. In such a wave, compression is as low as  $\sim 2$  %.

Therefore, one could conclude that for the case of sliding detonation, Be loading by the explosion products is almost shock-free, i.e. isentropic.

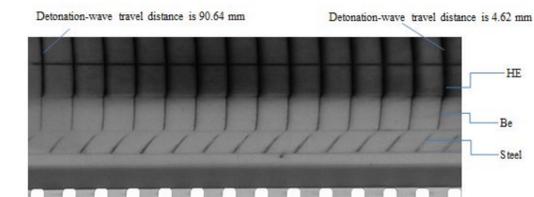


Figure 5. Streak-camera record from the experiment (time from right to left,  $V_{sweep}=2.25$  mm/ $\mu$ s)

Turn attention to the process of shock-wave formation in the Be-adjacent steel (Figure 5). In the steel barrier, we can see two light traces, one following the other, having different intensity and angle of slope. For details, refer to the legend in Figure 6. Compared to the second one, the first trace is less intensive and has a smaller angle of slope. The same pattern is realized in other experiments with beryllium for both convex and plane plastic-wave front.

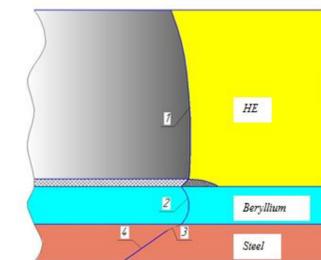


Figure 6. Detonation front shape and shock wave shape under sliding detonation of insensitive HE enclosed in beryllium and steel

Compared to the second one, the first trace is less intensive and has a smaller angle of slope ( $24^\circ$  and  $35^\circ$ , respectively). The first trace is estimated to be an acoustic wave and the second trace – to be a shock wave with the pressure of 16.3 GPa at the shock front. This pressure is attained when the compression wave amplitude in Be equals 12 GPa. Thickness of the "acoustic" layer in steel is  $\sim 1.8$  mm. It is interesting that the wave slope angle is estimated (acoustic approximation) to be  $29^\circ$  and this is in a fairly good agreement with the experimental data. So, acoustic effects are observed to be involved when the detonation pulse is transferred through the thick beryllium layer.

Another very important characteristic of an explosive material is its critical thickness of detonation as it determines HE detonability. The critical detonation thickness is a non-constant value that depends on different factors attributed not only to the manufacturing process, but also to conditions of HE practical application.

The "cross" wedge method was used for our investigation wherein the interruption of light in the PMMA cutoff component indicated the detonation extinction location. A series of experiments was performed with wedges made from explosives with the  $\approx 1.5\%$  porosity when these HE wedges were adjacent to PMMA (organic glass), fluoroplastic, magnesium, aluminum, beryllium, and copper plates.

Our experimental assembly (Figure 7) comprised the wedge-shaped TATB-based HE sample placed on the 10-mm thick plate of the test material. The vertex angle of the HE wedge was  $\alpha=3^\circ$ , the wedge width was equal to 245 mm, and the wedge length equaled 30 mm.

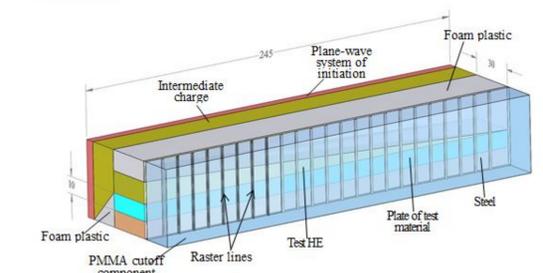


Figure 7. Schematic experimental assembly

In experiments, streak-camera with the sweep velocity of  $V_{sweep}=2.25$  mm/ $\mu$ s served to record, through raster lines, light from the shock and detonation waves when they arrived at the surface adjacent to PMMA cutoff component. This made it possible to determine the detonation front shape in the HE charge, the shock wave shape in the plate of the test material, as well as the location of detonation attenuation.

Figures 8–13 show typical streak-camera records. These records give a good view of the HE wedge section without explosive transformation (no light in raster lines) and with the detonation propagation (light is observed in raster lines), as well as a good view of shock waves in plates under the wedge and in the foam plastic over the wedge.

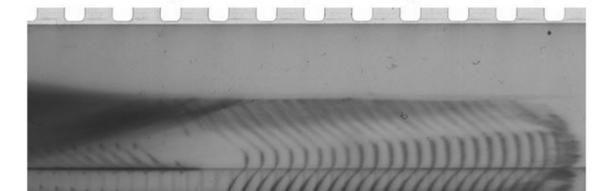


Figure 8. Streak-camera record from the experiment with the PMMA plate

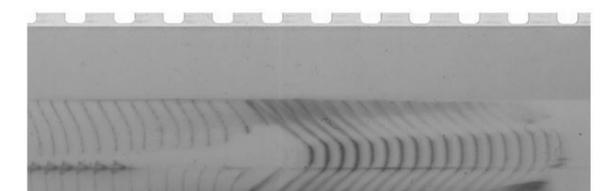


Figure 9. Streak-camera record of the experiment with the fluoroplastic plate

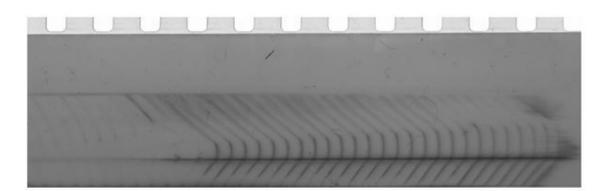


Figure 10. Streak-camera record from the experiment with the magnesium plate