

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В ТОНКОСТЕННОМ КОНТЕЙНЕРЕ С ВЗРЫВЧАТЫМ ВЕЩЕСТВОМ. II. УДАР ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ СТЕРЖНЕМ С КОНИЧЕСКОЙ НОСОВОЙ ЧАСТЬЮ

Хенхо Шин, Вунг Ли*

Центр разработки наземных систем, Агентство оборонных исследований, П.Я. 35-1, Тэджон, 305-600, Республика Корея, shinh@unitel.co.kr

На основе модели Forest Fire для скорости реакции численно исследовалось взаимодействие ударных волн при инициировании взрывчатого вещества (Composition B), заключенного в стальной тонкостенный контейнер. Рассматривался случай удара по контейнеру в направлении нормали небольшим ударником с конической носовой частью. Показано, что в зависимости от угла конуса носовой части ударника зона взаимодействия инициирующих ударных волн может находиться в стороне от центральной оси соударения. Такая внеосевая детонация рассматривалась с точки зрения различных режимов взаимодействия ударных волн в контейнере с взрывчатым веществом, которые отражались от стенки оболочки, изменяли направление распространения и затем накладывались, приводя к детонации взрывчатого вещества.

Ключевые слова: ударная волна, ударник с конической носовой частью, контейнер с ВВ, модель Forest Fire, детонация взрывчатого вещества.

ВВЕДЕНИЕ

При ударе по взрывчатому веществу (ВВ) тонкой пластиной или элементом с малым отношением толщины к диаметру (L/D) волна разрежения, генерируемая на тыльной поверхности ударников, управляет длительностью волны нагружения [1]. В общем случае в тестах по определению чувствительности ВВ, когда отношение L/D достаточно велико, длительность исходной волны нагружения контролируется волнами разгрузки, возникающими на периферии элемента. Время прихода волны разгрузки от периметра для ударников с полусферической или конической носовой частью отличается от времени прихода этих волн для ударников с плоскими торцами, и, следовательно, сильно различается и ударное нагружение [2]. В случае элементов с полусферической или конической носовой частью ударная волна начинает затухать со временем сразу за скачком. Преобразование схемы ударно-волнового нагружения за счет изменения формы носовой части ударника приводит к изменению пороговой скорости детонации. Это было замечено в первых тестах на чувствительность ВВ, в ко-

торых ударники с малой кинетической энергией соударялись с ВВ с открытой поверхностью либо с ВВ, покрытым только по фронтальной поверхности [3–6].

С точки зрения хорошо известной эмпирической модели Джекобса и Рослунда [3] пороговая скорость ударника с полусферической носовой частью, приводящая к детонации ВВ, увеличивается вдвое по сравнению с ударником с плоским торцом. Проведено много исследований причины резкого увеличения пороговой скорости ударника с полусферической носовой частью, имеются также и аналитические решения данной задачи [2, 7–10]. Фактически пересечение полусферической носовой части ударника с плоской поверхностью ВВ генерирует контактное кольцо, которое разделяет нагруженную и ненагруженную поверхности носовой части. Скорость расширяющегося кольца по мере внедрения ударника быстро уменьшается (вплоть до значения, меньшего локальной скорости звука соударяющихся материалов) [2], в результате чего наблюдается «захват волны разрежения» в ударно-сжатом объеме. При использовании ударника с конической носовой частью скорость расширяющегося кольца остается постоянной и совершается относительно меньше работы. В [11] показано, что изготовление элементов со специально подобран-

*Hyunho Shin, Woonge Lee, Ground Systems Development Centre, Agency for Defence Development, P.O. Box 35-1, Daejeon, 305-600, Republic of Korea.

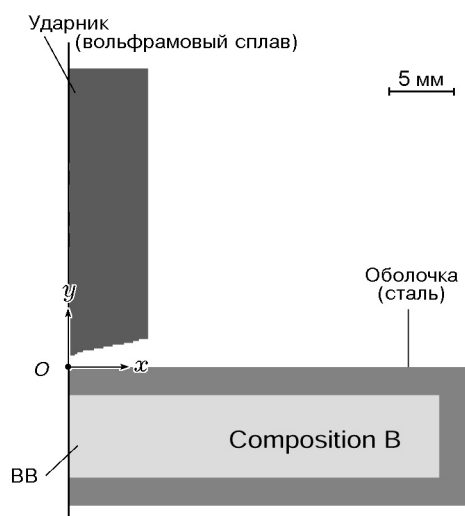


Рис. 1. Схема взаимодействия ударника с ВВ

ной заостренностью позволяет ударнику проникать через динамическую защиту, не вызывая детонации последней при скорости соударения выше порогового значения. В [12] численным моделированием установлено, что начальное давление, которое испытывает ВВ, заключенное между двумя стальными пластинами, уменьшается с увеличением заостренности конической носовой части. В экспериментах [13, 14] обнаружено, что пороговая скорость увеличивается с уменьшением угла конуса в случае, когда ВВ заключено в стальную цилиндрическую оболочку. Однако в работах [11–14] взаимодействие ударных волн со стенками оболочки не исследовалось, что, вероятно, и ограничивало возможность обнаружения данного явления. В настоящей работе численно исследуется взаимодействие ударных волн в тонком (толщина стенок 2 мм) контейнере при ударе по нему цилиндрическим стержнем с конической носовой частью при изменении заостренности носика.

1. ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ

Использовался конечно-разностный гидродинамический код Hull* в двумерной осесимметричной эйлеровой прямоугольной сетке (0,1 × 0,1 мм). На рис. 1 показана анализируемая схема, которая аналогична рассмотренной

*Программа разработана фирмой Orlando Technology, Inc., Shalima, Florida.

в части I работы (см. настоящий номер журнала), за исключением того, что ударники имели различную заостренность конуса носовой части. Расчеты проведены для конусов с углами $\alpha = 157,4; 151,9; 143,1$ и $134,8^\circ$. Начало координат расположено в точке столкновения носика ударника с верхней пластиной контейнера. Во всех расчетах скорость ударника при столкновении 1800 м/с, а начальное положение носика соответствует точке $x = 0, y = 1$ мм.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Элементы с тупой носовой частью

На рис. 2 показано ударное инициирование ВВ, заключенного в тонкостенный контейнер, при ударе стержнем с тупой конической носовой частью (угол при вершине конуса $\alpha = 157,4^\circ$). Как видно из рис. 2, а, детонация начинается позади верхней пластины в зоне, удаленной от центральной оси ударника, и затем распространяется из этой зоны (см. рис. 2, б) на весь объем кассеты (на рисунке не показано) в более поздние моменты времени. Положение зоны возникновения детонации в этом случае отличается от случая удара стержнем с плоским торцом, когда детонация возникала на центральной оси симметрии ударника. Процесс ударного инициирования, показанный на рис. 2, можно понять, если проследить эволюцию ударной волны до перехода в детонацию. Для того чтобы исследовать причину, по которой область инициирования детонации удалена от центральной оси, обратимся к рис. 3, на котором представлены детальные кадры носика ударника и зоны, примыкающей к верхней пластине. Как видно из рис. 3, а, б, профиль давления, сформированный ударом, движется не только вертикально по направлению к ВВ, но и в радиальном направлении от центральной оси, следуя изменению формы контактного кольца ударника с верхней пластиной в процессе внедрения. В момент времени $t = 1,3$ мкс (см. рис. 3, б) по периметру ударника появляется волна разрежения (на рисунке обозначена R), что приводит к разделению зоны высокого давления на две части в более поздние моменты времени (см. рис. 3, в, г). Нижний гребень профиля давления (обозначен L на рис. 3) движется как в радиальном, так и в вертикальном направлении. Так, например, нижняя часть изобары 40 ГПа в момент времени $t = 1,3$ мкс

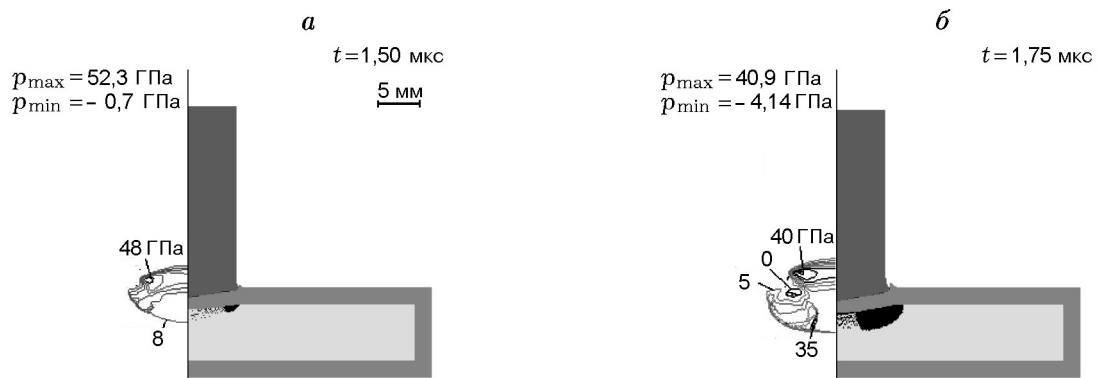


Рис. 2. Ударное инициирование ВВ в тонкостенном контейнере в различные моменты времени при ударе стержнем с углом конуса $157,4^\circ$

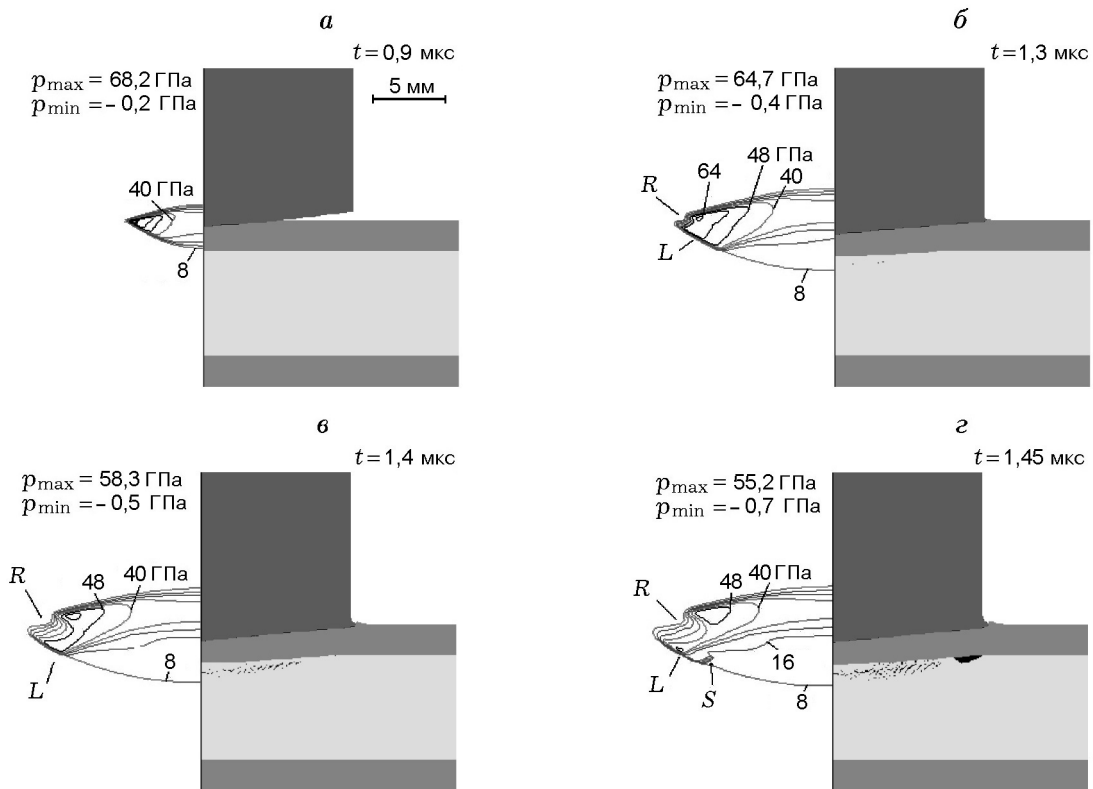


Рис. 3. Детальный вид процесса воздействия ударной волны на ВВ, показанный на рис. 2

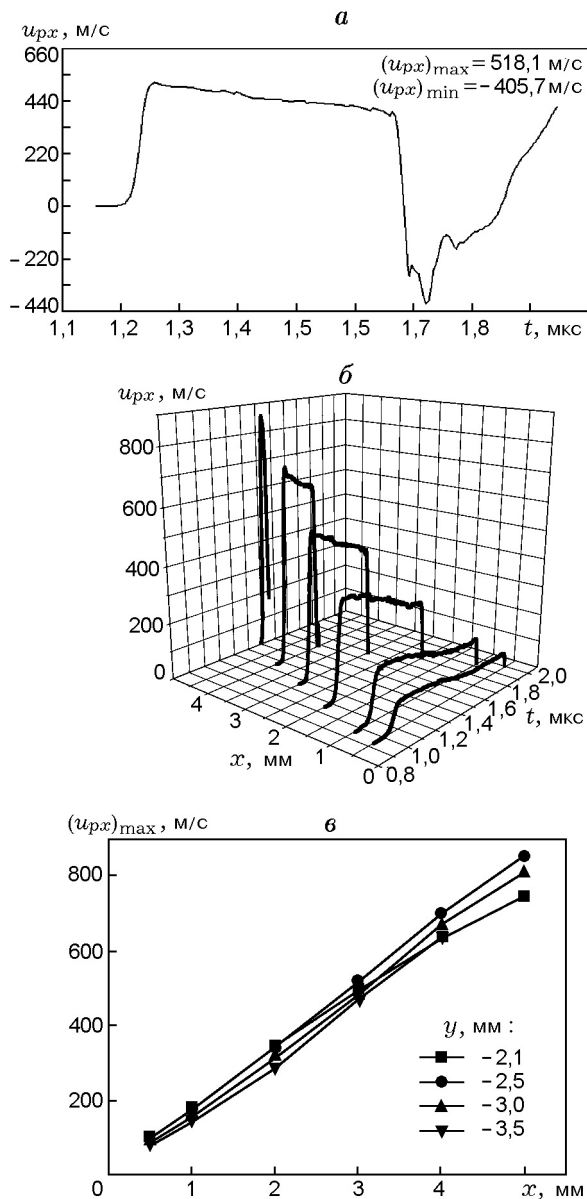


Рис. 4. Профили массовой скорости:

a — $x = 3$ мм, $y = 2,5$ мм, *б* — при различных радиальных координатах с фиксированной координатой $y = -2,5$ мм, *в* — зависимость максимума массовой скорости в ВВ от радиальной координаты

(см. рис. 3, *б*) еще не достигает поверхности раздела верхняя пластина — ВВ ($y > -2$ мм), при $t = 1,4$ мкс она почти достигает этой поверхности (см. рис. 3, *в*), а в момент времени $t = 1,45$ мкс (см. рис. 3, *г*) изобары нижнего гребня переходят в ВВ ($y < -2$ мм) и в этом месте ВВ детонирует. Индуцированный детонацией пик давления в ВВ обозначен *S* на рис. 3, *г*. Заметим, что только часть ударного давления в верхней пластине передается в ВВ,

импеданс которого меньше импеданса пластины. Как показано в части I этой работы, примерно 23,9 % давления в верхней пластине передается в ВВ.

Основываясь на том факте, что точка детонации находится на поверхности раздела верхняя пластина — ВВ и не отходит от нее в вертикальном направлении, можно быть уверенным, что детонация в этом месте не связана с каким-либо вертикально распространяющимся компонентом ударной волны. Как видно из рис. 3, *в, г*, первоначальные продукты химической реакции распространяются радиально и их интенсивность возрастает со временем. Для того чтобы выявить существование какого-либо компонента волны, распространяющейся по ВВ в радиальном направлении вблизи верхней пластины, были построены профили массовой скорости u_{px} в (радиальном) направлении x в точке вблизи поверхности раздела ($x = 3$ мм, $y = -2,5$ мм). Результаты расчетов показаны на рис. 4, *а*. Для наблюдения за массовой скоростью координата x фиксировалась (т. е. рассматривалась как эйлерова), в то время как координата y могла перемещаться (лагранжева координата) в соответствии с вертикальным движением поверхности раздела верхняя пластина — ВВ. Как видно на рис. 4, *а*, при $t \approx 1,26$ мкс значение u_{px} быстро возрастает до 518,1 м/с вследствие прихода ударной волны, затем постепенно уменьшается до момента времени $t = 1,68$ мкс, в который скорость u_{px} резко падает из-за прихода детонационной волны из точки с координатами $x = 5,5$ мм, $y = -2$ мм. Графики зависимости массовой скорости от времени при разных значениях радиальной координаты и одном и том же значении вертикальной координаты ($y = -2,5$ мм) строились аналогично графику на рис. 4, *а*. Для сравнения обе зависимости приведены на рис. 4, *б*; для того чтобы не загромождать рисунок, кривые обрезаны после резкого падения массовой скорости. Как видно из рисунка, с ростом радиальной координаты первый подъем массовой скорости наблюдается позже, в то время как детонация (резкое падение массовой скорости) возникает раньше, в результате чего длительность ударной нагрузки уменьшается. Заметим, что детонация возникает при $x \approx 5,5$ мм. Как видно из рис. 4, *б*, максимум массовой скорости в первом скачке ударной волны в каждом положении частицы увеличивается при движении точки наблюде-

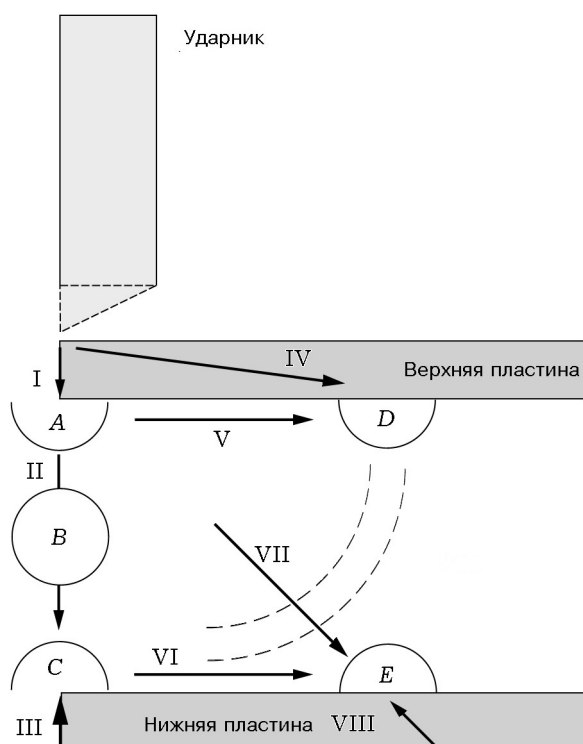


Рис. 5. Схема взаимодействия ударных волн при инициировании детонации ВВ ударом стержня с заостренным носиком

ния наружу в радиальном направлении. Максимальное значение массовой скорости в каждой радиальной координате было рассчитано и при других значениях вертикальной координаты вблизи верхней пластины, а именно при $y = -2,1; 3,0$ и $3,5$ мм. Эти три зависимости приведены на рис. 4, в. Видно, что в ВВ вблизи верхней пластины с ростом радиальной координаты до ≈ 5 мм значение u_{rx} увеличивается. Основываясь на существовании ясно выраженного градиента скорости по радиальной координате, полученные результаты можно уверенно интерпретировать как движение ударной волны в радиальном направлении, интенсивность которой возрастает по мере распространения за счет химической реакции. Заметим, что ударное давление в одномерном случае равно $p = K u_{rx}$, где K — ударно-волновой импеданс. О существовании ударной волны, распространяющейся в радиальном направлении, свидетельствует также тот факт, что изобара $p = 8$ ГПа (см. рис. 3, в, з) движется быстрее в радиальном направлении, чем в вертикальном.

Из результатов проведенного выше анализа следует, что детонация, возникающая позади верхней пластины и удаленная от центральной оси траектории ударника (см. рис. 2, а, б), является результатом суперпозиции двух механизмов, которые были отмечены выше. На рис. 5 схематически показано, что детонация в зоне D возникает благодаря конструктивному усилению двух ударных волн, распространяющихся по путям IV (нижний гребень волны в верхней пластине показан на рис. 3) и V (волна распространяется по ВВ в радиальном направлении).

2.2. Ударники с «менее тупым» углом конуса носовой части

На рис. 6 показано ударное инициирование ВВ, заключенного в тонкостенный контейнер, с которым соударяется стержень с большей заостренностью носовой части ($\alpha = 151,9^\circ$), чем в предыдущем случае. Из рис. 6, а видно, что увеличенная концентрация продуктов химической реакции первоначально появляется в зоне, расположенной подобно зоне возникновения детонации в предыдущем случае (см. рис. 2, а). Это указывает на то, что в данной зоне действительно наблюдается тенденция к возникновению детонации из-за взаимодействия двух ударных волн, показанных на рис. 5. Появление продуктов химической реакции (см. рис. 6, а), по-видимому, не приводит к возникновению детонации до тех пор, пока ударный фронт почти не достигнет нижней пластины (см. рис. 6, б). Вследствие такого подавления детонации позади верхней пластины влияние волны разгрузки в верхней пластине усиливается по сравнению с предыдущим случаем из-за увеличения заостренности носика стержня, что уменьшает давление как для механизма IV, так и для механизма V (см. рис. 5). В случае, представленном на рис. 6, в, детонация возникает в центральной зоне нижней пластины, волна детонации (поверхность раздела сгоревшее ВВ — несгоревшее ВВ) догоняет ударный фронт и впоследствии выходит вперед него. Она распространяется в самоподдерживающемся режиме (см. рис. 6, з) и приводит к детонации всей кассеты в более поздние моменты времени. Детонация из центральной зоны поверхности раздела нижняя пластина — ВВ возникает вследствие того же самого механизма, что и механизм III в случае удара стержнем с плоским торцом, описанным в

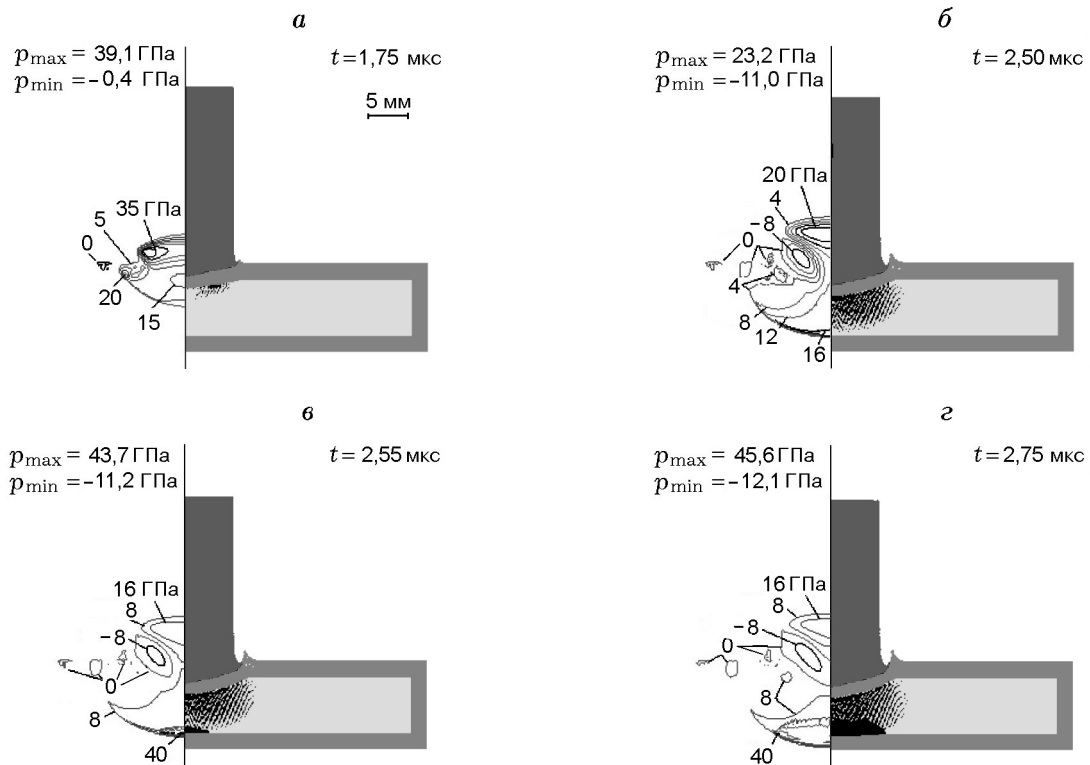


Рис. 6. Ударное инициирование ВВ в тонкостенном контейнере в различные моменты времени при ударе стержнем с углом конуса $151,9^\circ$

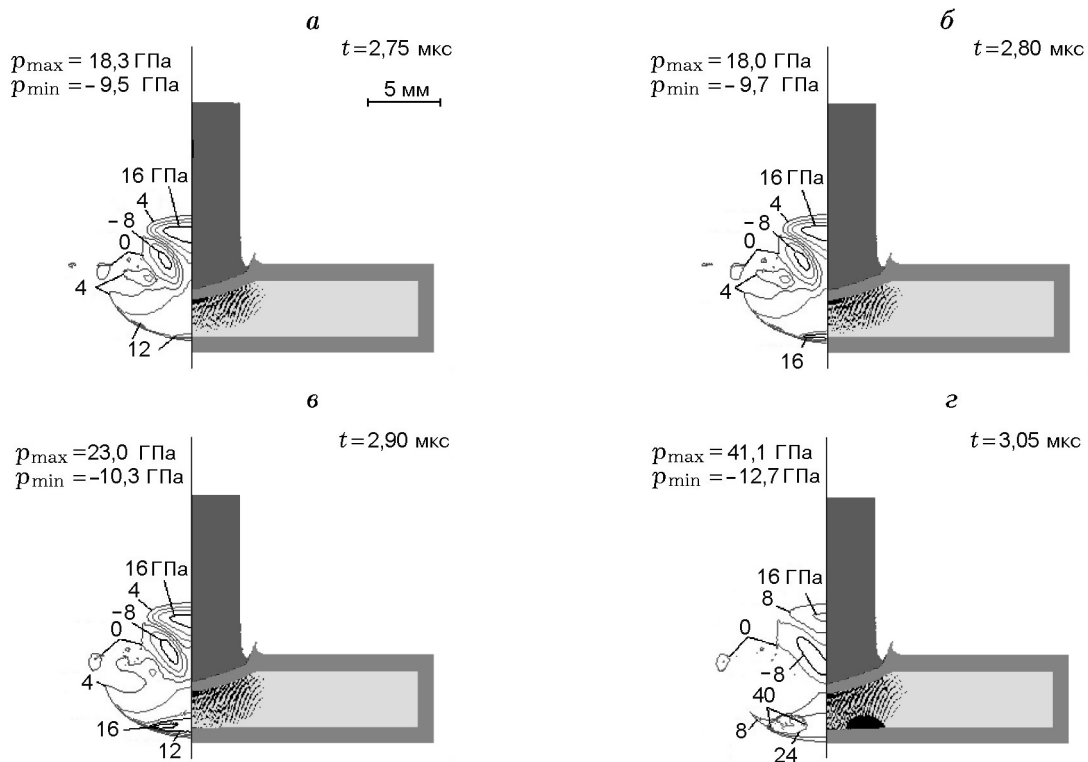


Рис. 7. Ударное инициирование ВВ в тонкостенном контейнере в различные моменты времени при ударе стержнем с углом конуса $143,1^\circ$

части I настоящей работы, и представляет собой суперпозицию падающей и отраженной от нижней пластины волн, что показано схематически на рис. 5.

2.3. Ударники с промежуточным углом конуса носовой части

На рис. 7 показано развитие детонации в кассете с реагирующим веществом для случая, когда заостренность носика увеличена еще больше ($\alpha = 143,1^\circ$). Как видно из рис. 7,а, к моменту времени, когда ударная волна достигает нижней пластины, очевидных признаков детонации нет. При $t = 2,80$ мкс (см. рис. 7,б) давление в отраженной от нижней пластины волне заметно усиливается, особенно в центральной зоне, как только сферический фронт ударной волны достигает ее. Однако увеличение давления еще не приводит к детонации. Наблюдаемое подавление детонации у нижней пластины позволяет заключить, что давление в ударной волне, входящей в ВВ, и в волне, достигающей нижней пластины, уменьшилось по сравнению с предыдущим случаем, когда угол конуса составлял $151,9^\circ$. Это вызвано возросшим влиянием волны разгрузки при уменьшении угла конуса. В момент времени $t = 2,90$ мкс (см. рис. 7,в) зона самого высокого давления в нижней части ВВ больше не локализуется в центральной зоне, она располагается на некотором расстоянии от центральной оси. В самом деле, ударная волна, усиленная отражением от нижней пластины, движется, главным образом, в радиальном направлении. При $t = 3,05$ мкс (см. рис. 7,г) детонация, в конечном счете, возникает в зоне, находящейся вне центральной оси. Из этой зоны химическая реакция развивается в самоподдерживающемся режиме и охватывает детонацией весь объем (на рисунке не показано).

На рис. 8 представлены массовые скорости в радиальном направлении в нескольких точках для того, чтобы подтвердить присутствие ударной волны, распространяющейся в радиальном направлении вблизи нижней пластины. Эти скорости определялись тем же методом, что и скорости, показанные на рис. 4,в. Как видно из рис. 8, существует ясно выраженный градиент массовой скорости в радиальном направлении, подтверждающий распространение ударной волны в этом направлении при увеличении массовой скорости и, соответственно, давления.

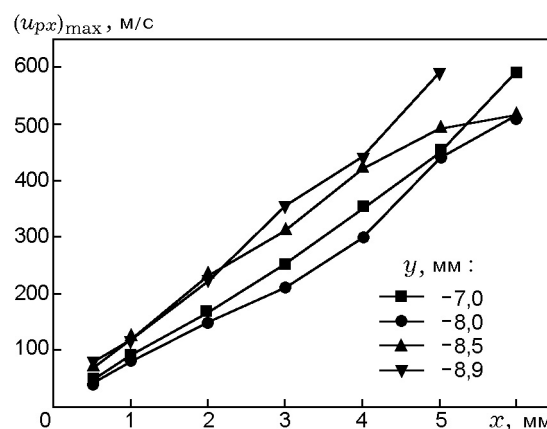


Рис. 8. Зависимость максимума массовой скорости в ВВ от радиальной координаты для различных значений вертикальной координаты вблизи нижней пластины

Отметим сферическую форму изобар, приближающихся к нижней пластине, на рис. 7. Сферическая волна давления, которая выходит из точки соударения, движется по направлению горячей зоны, расположенной вне центральной оси (волна показана на рис. 5 — механизм VII). Отсюда можно заключить, что формирование горячей зоны также поддерживается входящей сферической ударной волной. Из того факта, что детонация возникает на поверхности раздела ВВ — нижняя пластина, а не вне этой поверхности, следует, что для возникновения детонации сферическая волна вначале должна отразиться от нижней пластины, а затем взаимодействовать с горячей зоной. Если же распространяющаяся радиально волна просто взаимодействует с входящей ударной волной, начальная точка детонации должна находиться на некотором расстоянии вдоль вертикали от поверхности раздела ВВ — нижняя пластина, а не на этой поверхности.

Можно предположить, что при ударе стержнем с промежуточным углом конуса носовой части суперпозиция вышеупомянутых механизмов ответственна за детонацию, возникающую на поверхности раздела ВВ — нижняя пластина вдали от центральной оси траектории частицы (см. рис. 7,г). На рис. 5 схематически показано, что детонация в области E является результатом конструктивного усиления двух ударных волн, проходящих по траекториям VI (волна, распространяется в радиальном направлении вблизи нижней пластины) и VIII (первоначально это волна VII, которая от-

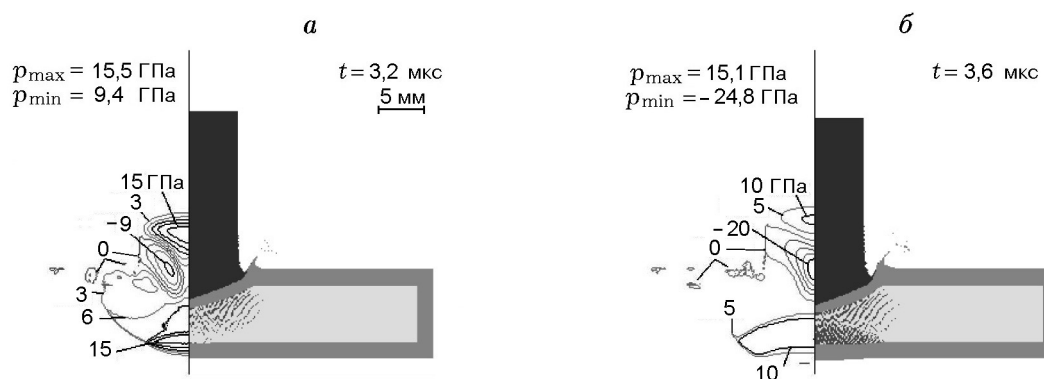


Рис. 9. Ударное инициирование ВВ в тонкостенном контейнере в различные моменты времени при ударе стержнем с углом конуса $134,8^\circ$

разилась от нижней пластины). В самом деле, детонация в области E возникает при взаимодействии ударных волн, которые отразились и изменили направление распространения.

2.4. Ударники с «острым» углом конуса носовой части

На рис. 9 показано ударное инициирование реагирующего вещества в контейнере для самого «острого» угла при вершине конуса ($\alpha = 134,8^\circ$), исследованного в настоящей работе. Наблюдается отказ инициирования детонации. Последнее означает, что все рассмотренные выше механизмы взаимодействия ударных волн не могут усилить ударное давление до уровня, необходимого для детонации. Входящее в ВВ давление существенно уменьшается из-за возросшего влияния волны разгрузки, которая сильно зависит от угла при вершине конуса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках модели Forest Fire для скорости реакции численно исследовалось взаимодействие ударных волн в ВВ, заключенном в стальную капсулу, при ударе стержнем из тяжелого вольфрамового сплава. В дополнение к случаю удара стержнем с плоским торцом, который был рассмотрен в части I, в настоящей работе параметрически изучалось влияние заостренности носика стержня и было показано, что суперпозиция ударных волн вызывает детонацию ВВ в двух областях, заметно удаленных от центральной оси удара.

Для случая удара стержнем с тупым носиком ($\alpha = 157,4^\circ$) по контейнеру с ВВ гребень на профиле ударного давления в верхней пластине движется не только вниз от точки соударения, но и в радиальном направлении от центральной оси удара. Гребень давления взаимодействует с ударной волной, распространяющейся в радиальном направлении в ВВ вблизи верхней пластины, что приводит к детонации на поверхности раздела верхняя пластина — ВВ в области, заметно удаленной от центральной оси удара.

При уменьшении угла конуса носика до $151,9^\circ$ подъем давления за счет вышеупомянутых механизмов оказался недостаточным для возникновения детонации. В этом случае местом, в котором ударная волна усиливалась до детонационной, была центральная зона вблизи нижней пластины, т. е. та же зона (и тот же механизм), которая наблюдалась при ударе стержнем с плоским торцом.

При уменьшении угла конуса носика до $143,1^\circ$ даже усиления ударной волны в центральной зоне вблизи нижней пластины оказалось недостаточно для возникновения детонации. В этом случае детонация возникала за счет следующих двух механизмов ударно-волнового взаимодействия. Ударная волна, отраженная от центральной зоны нижней пластины, удалялась в радиальном направлении, вследствие чего происходило дальнейшее увеличение давления. Затем эта волна накладывалась на первоначальную сферическую волну от удара, которая отражалась от нижней пластины, в результате чего детонация возникала на поверхности раздела ВВ — нижняя пласти-

на в зоне, удаленной от центральной оси. При дальнейшем увеличении заостренности носика ($\alpha = 134,8^\circ$) действия всех упомянутых выше механизмов недостаточно для возникновения детонации.

Режимы взаимодействия ударных волн в тонкостенном контейнере с реагирующим веществом включают в себя отражение от стенок и изменение направления распространения. В зонах, в которых ударные волны накладывались, обнаружена тенденция к возникновению детонации в зависимости от амплитуды первоначальной ударной волны, которая передавалась в ВВ и на которую сильное влияние оказывала форма носика ударника.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Gittings E. F.** Initiation of solid explosive by a short duration shock // Proc. Fourth Symp. (Intern.) on Detonation. Office of Naval Research. Arlington, Virginia, 1965. P. 373–380.
2. **James H. R., Haskins P. J., Cook M. D.** Prompt shock initiation of cased explosives by projectile impact // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1996. V. 21. P. 251–257.
3. **Roslund L. A., Watt J. W., Coleburn N. L.** Initiation of Warhead Explosives by the Impact of Controlled Fragments in Normal Impact. Naval Ordnance Laboratory Report No. NOL-TR-73-124. White Oak, Silver Spring, MD, 1973.
4. **Bahl K. L., Vantine H. C., Weingart R. C.** The shock initiation of bare and covered explosives by projectile impact // Proc. Seventh Symp. (Intern.) on Detonation. Office of Naval Research, Arlington, Virginia, 1981. P. 325–335.
5. **James H. R.** Response of Bare Explosives to Attack by Cylindrical and Spherical Projectiles. Atomic Weapons Research Establishment Aware Report No. 06/86. Aldermaston, 1986.
6. **Billingsley J. P., Oliver J. M.** The Equivalent Flat Nose Diameter of Hemispherical Nose Cylindrical Projectiles for Impact Induced Detonation of Energetic Materials. U.S. Army Missile Command Report No. RD-SS-92-11. Redstone Arsenal, Alabama, 1992.
7. **James H. R., Hewitt D. B.** Critical energy criterion for the initiation of explosives by spherical projectiles // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1989. V. 14. P. 223–233.
8. **Yactor R. J.** Modeling Initiation of Explosives by Projectile Impact. Los Alamos National Laboratory Report No. LA-UR-92-1476. Los Alamos, New Mexico, 1992.
9. **James H. R.** An extension to the critical energy criterion used to predict shock initiation thresholds // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1996. V. 21. P. 8–13.
10. **Peugeot F., Quidot M., Presles H. N.** An analytical extension of the critical energy criterion used to predict bare explosive response to jet attack // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1998. V. 23. P. 117–122.
11. **Frey R. B., Melani G., Stegall S.** Effect of Penetrator Nose Shape on the Initiation of Reactive Armour. Ballistic Research Laboratory Memorandum Report BRL-MR-3833. Aberdeen Proving Ground, Maryland, 1990.
12. **Lawrence W., Starkenberg J.** The Effects of the Failure Diameter of an Explosive on Its Response to Shaped Charge Jet Attack. Army Research Laboratory Report No. ARL-TR-1350. Aberdeen Proving Ground, Maryland, 1997.
13. **James H. R., Haskins P. J., Cook M. D.** Effect of case thickness and projectile geometry on the shock initiation threshold for a given explosive // AGARD Conference Proceedings. 1992. V. 511. P. 18/1–18/15.
14. **Cook M. D., Haskins P. J., James H. R.** Projectile impact initiation of explosive charges // Proc. Ninth Symp. (Intern.) on Detonation. Office of Naval Research, Arlington, Virginia, 1989. P. 1441–1450.

Поступила в редакцию 29/VII 2002 г.