

УДК 534.222.2+662.215.1

## ВОЗБУЖДЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ЭКРАНИРОВАННЫХ ТОНКИХ СЛОЯХ ВВ КУМУЛЯТИВНЫМИ СТРУЯМИ

И. Ф. Кобылкин

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва  
kobylikin\_ivlan@mail.ru

Представлены основные закономерности возбуждения детонации в экранированных тонких слоях взрывчатого вещества (ВВ) при воздействии высокоскоростными металлическими кумулятивными струями. Экспериментально показано, что исключение начальной ударно-волновой стадии нагружения ВВ путем экранирования слоя ВВ легким сжимаемым материалом существенно снижает инициирующую способность кумулятивной струи. Экспериментально определены критические условия инициирования детонации в тонких слоях ВВ, размещенных между металлическими пластинами, при воздействии кумулятивными струями по нормали и под углом  $30^\circ$ ; определены максимальные толщины экранирующих пластин из разных материалов, при превышении которых инициирование детонации в ВВ не происходит даже при воздействии высокоскоростным головным элементом кумулятивной струи.

Ключевые слова: возбуждение детонации, тонкие слои ВВ, кумулятивная струя.

DOI 10.15372/FGV20150312

### ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению процесса возбуждения детонации в экранированных тонких слоях взрывчатого вещества (ВВ) при воздействии высокоскоростными металлическими кумулятивными струями (КС) обусловлен тем, что тонкие слои ВВ широко используются в устройствах взрывной динамической защиты бронетехники в виде плоских зарядов ВВ, заключенных между металлическими пластинами или плитами [1–3]. Возбуждение детонации в зарядах ВВ динамической защиты осуществляется при воздействии средствами поражения бронетехники — кумулятивными струями и сердечниками бронебойных снарядов и является важнейшим процессом, определяющим работоспособность всего комплекса динамической защиты.

Асимптотический характер геометрии взаимодействия КС с тонким слоем ВВ (малый диаметр области воздействия и малая толщина слоя ВВ) позволяет разделить процесс инициирования детонации на два этапа: 1) локальное инициирование детонации в области воздействия — создание детонационного очага; 2) распространение детонации из детонационного очага на окружающее ВВ [1, 3].

Распространение детонации из детонационного очага на окружающее ВВ определяется соотношением между его характерными размерами (толщиной слоя ВВ  $h$  и диаметром очага  $d_o$ ) и характеристикой предела распространения детонации — критической толщиной слоя ВВ  $h_{кр}$ . Как следует из теории предела распространения детонации в тонких слоях ВВ, для распространения детонации из детонационного очага диаметром  $d_o$  в окружающее ВВ толщина слоя ВВ  $h$  должна удовлетворять неравенству [1, с. 314]

$$h \geq \frac{h_{кр}}{1 - h_{кр}/d_o \cos \varphi_{ст}}, \quad (1)$$

где  $\varphi_{ст}$  — угол наклона детонационного фронта к поверхности ограничивающей пластины, обеспечивающий стационарную форму фронта [1]. Анализ этого соотношения показал, что необходимая толщина слоя ВВ заметно возрастает, если диаметр детонационного очага меньше  $(5 \div 10)h_{кр}$ .

### ВОЗБУЖДЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ТОНКИХ СЛОЯХ ВВ, ЭКРАНИРОВАННЫХ ЛЕГКИМ СЖИМАЕМОМ МАТЕРИАЛОМ

Основная информация о поведении тонких слоев ВВ при воздействии КС получена экспериментальным путем. В качестве источников

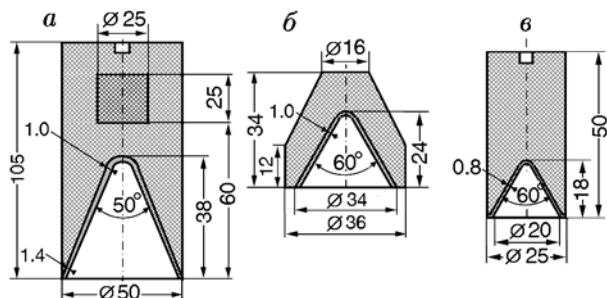


Рис. 1. Схемы кумулятивных зарядов, использованных в исследованиях:

*a* — КЗ-50, *б* — КЗ-36, *в* — КЗ-25

КС на разных этапах исследования использовались три типа зарядов с медными коническими облицовками: заряды КЗ-50 и КЗ-25 из флегматизированного гексогена А-IX-1 и заряд КЗ-36 из флегматизированного октогена (рис. 1).

Некоторые характеристики этих кумулятивных зарядов и образуемых ими КС приведены в табл. 1. Рентгенограммы кумулятивных струй от зарядов КЗ-36 и КЗ-50 перед началом их разрушения представлены на рис. 2.

Воздействие КС на заряд ВВ имеет экстремальный характер: с одной стороны, чрезвычайно высокая интенсивность воздействия — скорость головных элементов КС сравнима со скоростью детонации и достигает  $5 \div 10$  км/с; с другой стороны, очень малый

диаметр области воздействия — диаметр КС  $d$  изменяется в пределах от нескольких десятых долей миллиметра до нескольких миллиметров и сравним с критическим диаметром детонации  $d_{кр}$ . При этом КС представляет собой высокоскоростной градиентный по скорости ударник с чрезвычайно большим удлинением (отношением длины КС к ее диаметру) порядка  $10^2$  и более.

Вследствие большой удлиненности ударника процесс проникания КС в плотную среду разделяется на начальную ударно-волновую стадию и стадию установившегося гидродинамического проникания. К числу основных результатов, полученных при исследовании иницирующего действия КС, относится установление значительного различия в иницирующей способности КС на этих двух стадиях [1, 4]. Поразительно высокая иницирующая способность КС при воздействии на открытые заряды ВВ объясняется существованием начального ударно-волнового пика давления в ВВ. Если каким-либо образом предотвратить его образование, например путем экранирования заряда ВВ, то иницирующая способность КС значительно уменьшится. Наиболее контрастно это проявляется при иницировании детонации в тонких слоях ВВ. Схема экспериментов, в которых исследовалось это явление, представлена на рис. 3.

Таблица 1

Характеристики кумулятивных зарядов

Тип заряда	Диаметр заряда, мм	Расстояние установки заряда, мм	Глубина внедрения КС в преграду из малоуглеродистой стали, мм	Скорость головных элементов КС, км/с	Средний диаметр КС/длина КС (рис. 2), мм
КЗ-50	50	100	$240 \pm 20$	$8.0 \pm 0.2$	$1.8/(215 \pm 5)$
КЗ-36	36	75	$105 \pm 10$	$6.7 \pm 0.2$	$11/(100 \pm 5)$
КЗ-25	25	50	$85 \pm 7$	$7.0 \pm 0.2$	—

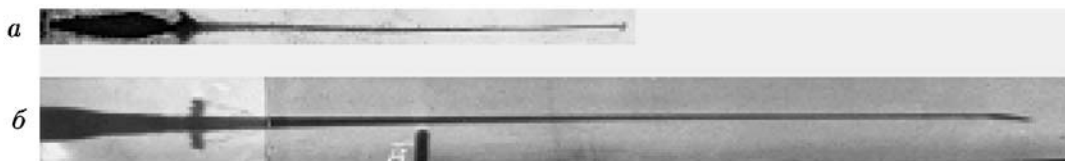


Рис. 2. Рентгенограммы кумулятивных струй:

*a* — КЗ-36, время от момента иницирования детонации 25 мкс, *б* — КЗ-50, 55 мкс

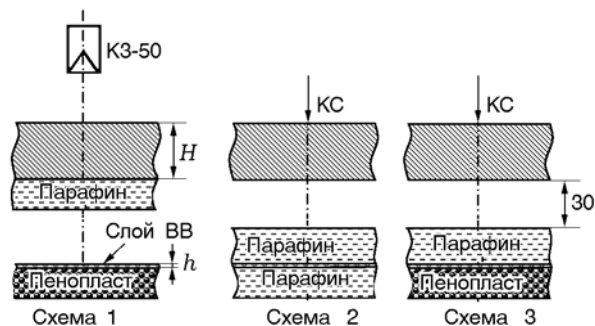


Рис. 3. Схемы экспериментов по исследованию влияния экранирующей среды на инициирование детонации в тонких слоях ВВ при воздействии КС

Характеристики элементов КС, воздействующих на исследуемый заряд ВВ, регулировались толщиной  $H$  отсекающей преграды из стали, располагаемой с зазором около 30 мм относительно исследуемого заряда ВВ или сборки. Измерение скорости элементов КС на выходе из отсекающих преград различной толщины показало, что закон распределения скорости вдоль КС близок к линейному.

Воздействию подвергались тонкие слои из эластичного взрывчатого вещества ЭВВ-34 на основе тэна (80 % тэна, 20 % полимерной связки) [1]). Критическая толщина слоя этого ЭВВ составляла  $h_{кр} \approx 0.4 \div 0.6$  мм. Наибольшее количество экспериментов было выполнено со слоями ВВ толщиной  $h = 2$  мм. В схеме 1 (см. рис. 3) КС воздействовала на открытый слой ВВ, в схеме 2 — на слой ВВ, помещенный в сжимаемую среду — воду или парафин, в схеме 3 — на слой ВВ, экранированный средой только со стороны воздействия КС. Толщина слоев воды или парафина составляла  $25 \div 35$  мм. В экспериментах определялись пороговые толщины  $H_{пор}$  стальных отсекающих преград, при превышении которых детонация в зарядах ВВ не инициировалась.

О характере ответной реакции судили по остаткам ВВ после воздействия струи (рис. 4). В экспериментах с использованием зарядов КЗ-50, выполненных по схеме 1, получено  $H_{пор} > 130$  мм, по схеме 2 —  $H_{пор} = 20 \div 30$  мм, по схеме 3 —  $H_{пор} = 30 \div 40$  мм. В указанных диапазонах первое число — максимальная толщина преграды, при которой надежно инициируется детонация, второе число — минимальная толщина преграды, при которой регистрируется отказ. Ширина переходной зоны от детонации к отказам в обоих случаях составля-

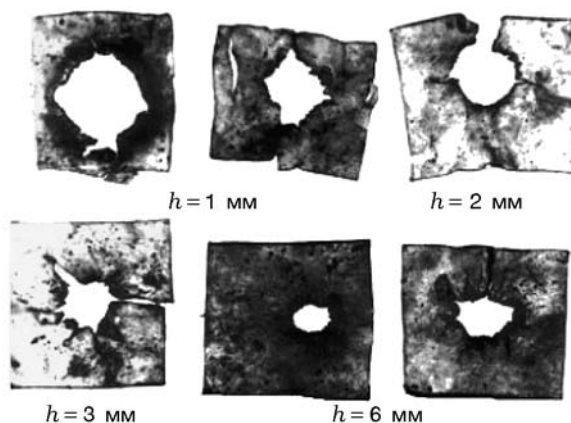


Рис. 4. Пробитые кумулятивной струей заряды ЭВВ-34

ет 10 мм. Как видно из полученных результатов, исключение начальной ударно-волновой стадии нагружения ВВ путем экранирования слоя ВВ легким сжимаемым материалом резко увеличивает стойкость тонкого слоя ВВ к воздействию КС. Для протяженных в направлении воздействия КС зарядов ВВ этот вывод не всегда справедлив, поскольку детонация может возникнуть на последующей стадии установившегося проникания КС в заряд ВВ [1].

### ВОЗБУЖДЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ТОНКИХ СЛОЯХ ВВ, ЭКРАНИРОВАННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПЛАСТИНАМИ

Экспериментальное исследование инициирующего действия КС показало, что оно зависит от наличия, толщины и свойств преграды, закрывающей заряд ВВ. Качественный анализ особенностей нагружения заряда ВВ достаточно большой протяженности в направлении воздействия КС при его размещении в плотной сжимаемой среде выполнен в работах [1, 4]. В наибольшей степени эти особенности проявляются при воздействии КС на тонкие слои ВВ, экранированные относительно тонкими металлическими пластинами. Пространственно-временная диаграмма нагружения слоя ВВ, размещенного между металлическими пластинами, при воздействии КС приведена на рис. 5.

Первоначально слой ВВ нагружается предшествующей ударной волной  $OAB$ , образующейся в начальный момент воздействия КС на лицевую пластину. Затем через некоторый промежуток времени  $\Delta t$  слой ВВ нагружается

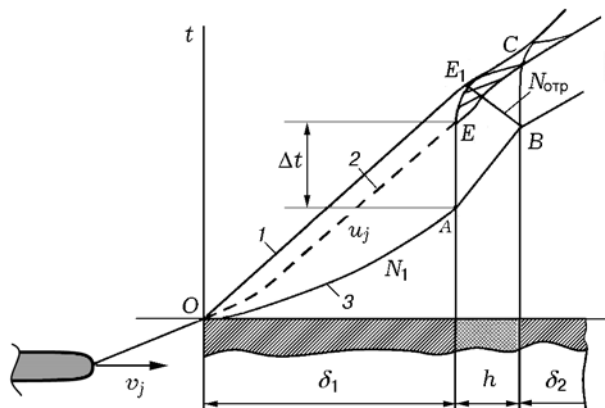


Рис. 5. Пространственно-временная диаграмма нагружения тонкого слоя ВВ, размещенного между металлическими пластинами:

1 — траектория вершины КС, проникающей в лицевую пластину, 2 — волна сжатия, 3 — траектория предшествующей ударной волны в лицевой пластине

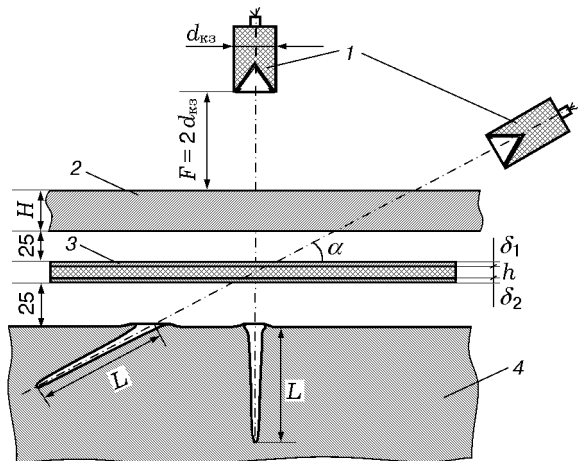


Рис. 6. Схема эксперимента по исследованию инициирующего действия КС:

1 —кумулятивный заряд, 2 — отсекающая преграда, 3 — исследуемая сборка, 4 — основная преграда

волной сжатия, формирующейся в экранирующей пластине или плите впереди проникающей КС. Детонация в слое ВВ инициируется либо предшествующей ударной волной АВ, либо волной сжатия  $EE_1C$ .

Рассмотрим наиболее характерные факты и закономерности, установленные при экспериментальном исследовании инициирования детонации в экранированных тонких слоях ВВ при воздействии КС.

1. В первой серии экспериментов, схема которых приведена на рис. 6, для кумулятивных зарядов КЗ-50 и КЗ-36 и симметричныхборок ( $\delta_1 = \delta_2$ ) со слоем ЭВВ-34 толщиной  $h = 2.0 \pm 0.05$  мм и экранирующими пластинами различной толщины ( $\delta_1 = 1 \div 20$  мм) определялись предельные толщины  $H_{пр}$  отсекающих преград, при превышении которых в ЭВВ-34 не возбуждалась детонация. Результаты экспериментов при воздействии КС по нормали ( $\alpha = 90^\circ$ ) и под углом  $\alpha = 30^\circ$  представлены на рис. 7.

С увеличением толщины лицевой пластины  $\delta_1$  предельные толщины отсекающих преград уменьшаются, т. е. для возбуждения детонации в сборках с более толстыми экранирующими пластинами требуется более мощное воздействие КС. Причем при воздействии КС по нормали на зависимостях  $H_{пр}(\delta_1)$  можно выделить участок быстрого уменьшения  $H_{пр}$  ( $\delta_1 \approx 1 \div 5$  мм), соответствующий возбуждению детонации в слое ВВ предшествующей

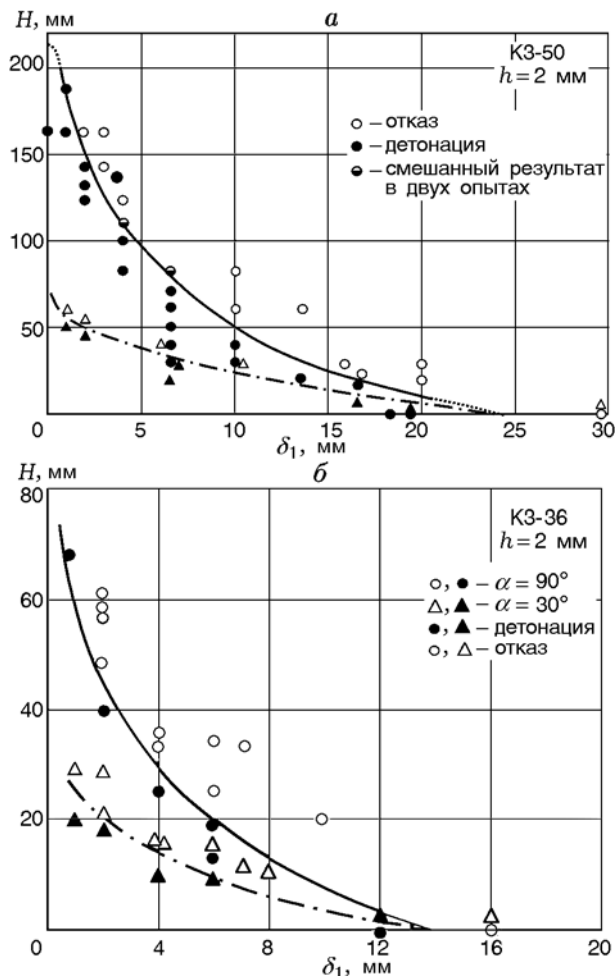


Рис. 7. Результаты экспериментов

Таблица 2

Предельная толщина стальных экранирующих пластин

КЗ-25			КЗ-36			КЗ-50		
$h$ , мм	$\alpha$	$\delta_{1 \max}$ , мм	$h$ , мм	$\alpha$	$\delta_{1 \max}$ , мм	$h$ , мм	$\alpha$	$\delta_{1 \max}$ , мм
1	90°	8 ÷ 12	1	90°	19.5	—	—	—
2	90°	13.3 ÷ 15.3	2	90°	12 ÷ 16	2	90°	20 ÷ 30
2	30°	13.3 ÷ 15.3	2	30°	12 ÷ 16	2	30°	20 ÷ 30
—	—	—	4	90°	14 ÷ 18	—	—	—
6	90°	8 ÷ 12	6	90°	16 ÷ 20	—	—	—

ударной волной. При больших значениях  $\delta_1$  зависимость  $H_{пр}(\delta_1)$  становится более пологой и соответствует возбуждению детонации волной сжатия, распространяющейся впереди проникающей в пластину КС.

При воздействии КС под углом предельная толщина отсекающих преград также уменьшается, т. е. для возбуждения детонации требуется более мощное воздействие КС по сравнению с воздействием по нормали.

2. При увеличении толщины  $\delta_1$  лицевой экранирующей пластины сверх некоторого предельного значения  $\delta_{1 \max}$  инициирование детонации в экранированном слое ВВ не осуществляется даже при воздействии высокоскоростным головным элементом КС.

Схема экспериментов, в которых определялась предельная толщина лицевых пластин, аналогична приведенной на рис. 6, только без отсекающей преграды. Воздействие КС на экранированные тонкие слои ЭВВ-34 толщиной  $h = 1 \div 6$  мм осуществлялось как по нормали, так и под углом  $\alpha = 30^\circ$ . Дополнительно к зарядам КЗ-36 и КЗ-50 использовался заряд КЗ-25 (см. рис. 1, в). Результаты экспериментального определения  $\delta_{1 \max}$  для этих зарядов приведены в табл. 2.

В графе  $\delta_{1 \max}$  указана толщина экранирующих пластин: первое число — максимальное значение толщины пластины, при котором надежно инициируется детонация; второе число — минимальная толщина, при которой фиксируется отказ. Как видно из табл. 2, величина  $\delta_{1 \max}$  заключена в пределах  $\delta_{1 \max} = (10 \div 15)d$  и практически не зависит от угла воздействия  $\alpha$ .

3. При воздействии КС по нормали ( $\alpha = 90^\circ$ ) на нижней пластине обнаружены контрастные круговые отпечатки (рис. 8), диа-

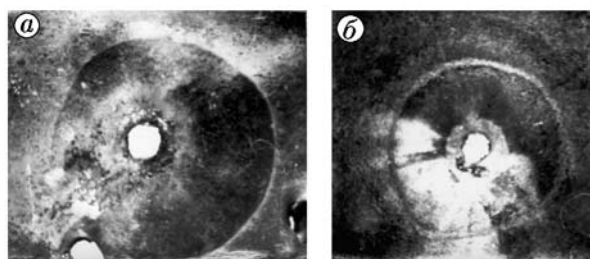


Рис. 8. Фотографии круговых отпечатков на нижних пластинах линий пересечения детонационных фронтов с фронтами предшествующих ударных волн (ЭВВ-34,  $h = 1$  мм):

$a$  — КЗ-50,  $\delta_1 = 20$  мм,  $d_{окр} \approx 60$  мм;  $b$  — КЗ-36,  $\delta_1 = 14$  мм,  $d_{окр} \approx 45$  мм

метр которых зависит от толщины верхней экранирующей пластины. Границы и геометрия отпечатков соответствуют линиям пересечения детонационного фронта с фронтом предшествующей ударной волны.

Для объяснения полученных результатов проанализируем основные закономерности нагружения экранированного слоя ВВ при воздействии на него КС.

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ

### Предшествующая ударная волна и ее затухание в экранирующей пластине

При воздействии КС экранированный слой ВВ вначале нагружается предшествующей ударной волной, переходящей из пластины в ВВ (см. рис. 5). При распространении предшествующей ударной волны в пластине ее амплитуда быстро уменьшается от начального значения  $p_0$  до некоторого значения  $p$ , являющегося

функцией координаты ударного фронта  $x$ . Для описания затухания предшествующей ударной волны воспользуемся степенной зависимостью [5]

$$p(x) = p_0 \left( \frac{x_0}{x} \right)^n,$$

где  $x_0$  — масштаб ударного взаимодействия,  $n$  — показатель затухания. В ближней зоне  $n = 2 \div 3$ , а значение  $x_0$  соответствует координате фронта ударной волны, при которой происходит смыкание боковых волн разгрузки на ударном фронте:  $x_0 = (0.5 \div 0.6)d$ .

При  $x \leq x_0$   $p(x) = p_0$ , а при  $x \approx 2d$  давление во фронте предшествующей ударной волны уменьшается более чем на порядок. Очевидно, что такое сильное затухание реализуется только на начальной стадии распространения ударной волны. В последующие моменты времени, после того как процесс проникания становится установившимся, затухание ударной волны в дальней зоне при  $x > (5 \div 10)d$  описывается акустическим законом  $p \sim x^{-1}$ .

При переходе ударной волны амплитудой  $30 \div 100$  ГПа из стальной экранирующей пластины в слой ВВ вследствие различия сжимаемостей стали и ВВ амплитуда ударной волны в ВВ уменьшается примерно в 3.3 раза. Учитывая это обстоятельство, а также принимая во внимание, что  $x_0 = (0.5 \div 0.6)d$ , оценочную зависимость для определения давления нагружения заряда ВВ предшествующей ударной волной можно представить в виде

$$p_e \approx (0.05 \div 0.09)p_0 \left( \frac{d}{\delta_1} \right)^n, \quad n = 2 \div 3. \quad (2)$$

Если толщина экранирующей пластины  $\delta_1 > x_0$ , то форма ударно-волнового фронта у границы раздела пластины — ВВ близка к сферической. Диаметр области воздействия оцениваем, ограничивая участок расходящейся ударной волны конической поверхностью, наклоненной к оси проникания под углом  $\beta$ . Величина угла  $\beta$  определяется требованием сохранять достаточно высокий уровень давления на отсекаемом участке фронта ударной волны (обычно полагают  $\beta = 30 \div 45^\circ$ ). Для диаметра области воздействия  $d_0$  можно записать выражение

$$d_0 = d \left( 2 \frac{\delta_1}{d} \operatorname{tg} \beta + 1 \right).$$

Для достаточно тонких экранирующих пластин, когда выполняется условие инициирования детонации в области воздействия, условие распространения детонации за границу этой области на окружающее ВВ можно получить с помощью (1), приняв диаметр детонационного очага равным диаметру области воздействия:

$$d \geq \frac{h_{\text{кр}} h}{2(h - h_{\text{кр}}) \cos \varphi_{\text{ст}}} - 2\delta_1 \operatorname{tg} \beta. \quad (3)$$

Из неравенства (3) следует вывод о том, что наличие тонкой экранирующей пластины в некоторых случаях может облегчить инициирование детонации в тонком слое ВВ при воздействии высокоскоростных КС малого диаметра. Происходит это как за счет увеличения диаметра области воздействия, так и за счет уменьшения критической толщины слоя ВВ.

Толщину лицевой пластины, при которой давление нагружения ВВ уменьшается до критического давления инициирования детонации  $p_{\text{кр}}$ , будем называть критической  $\delta_{1\text{кр}}$ . В качестве критического давления инициирования в данных условиях логично принять такое давление, при котором расстояние  $l$  перехода инициирующей ударной волны в детонационную не будет превосходить, например, половины толщины слоя ВВ. Наибольшее количество экспериментов было выполнено с зарядами ЭВВ-34 толщиной 2 мм, поэтому для дальнейших оценок примем  $l = 1$  мм. Для состава ХТХ-8003, аналогичного исследуемому ЭВВ-34, этому условию соответствует давление  $p_{\text{кр}} = 6.25$  ГПа [6]. Из (2) можно получить следующую оценочную зависимость:

$$\delta_{1\text{кр}} \approx 0.3d \left( \frac{p_0}{p_{\text{кр}}} \right)^{1/n}.$$

В диапазоне скоростей КС  $v_j = 6 \div 8$  км/с заданным значениям  $p_{\text{кр}}$  соответствует критическая толщина лицевой пластины  $\delta_{1\text{кр}} = (2 \div 3)d$ .

### Нагружение заряда ВВ волной сжатия

При увеличении толщины лицевой пластины из ЭВВ сверх значения  $\delta_{\text{кр}}$  амплитуда предшествующей ударной волны становится недостаточной для быстрого инициирования детонации. Последующее нагружение слоя ВВ осуществляется через время  $\Delta t = \delta_1(1/u_j - 1/\bar{N}_1)$  волной сжатия (см. рис. 5),

формирующейся в ВВ при приближении проникающей в пластину КС к границе раздела пластина — ВВ (здесь  $u_j$  — скорость проникания КС в пластину,  $\bar{N}_1$  — средняя скорость предшествующей ударной волны по толщине пластины).

При малой толщине экранирующих пластин  $\delta_{1\text{кр}} < (3 \div 5)d$  трудно разделить вклады предшествующей ударной волны и последующей волны сжатия в инициирование детонации. Можно лишь отметить, что волна сжатия, формируемая движущейся границей раздела, ускоряет переход предшествующей ударной волны в детонационную. При большей толщине экранирующих пластин основную роль в инициировании детонации начинает играть волна сжатия.

Волна сжатия воздействует на ВВ, предварительно нагруженное предшествующей ударной волной. Известно, что предварительное нагружение заряда ВВ слабой ударной волной без последующей разгрузки уменьшает его ударно-волновую чувствительность к последующему воздействию [7]. Не всякая ударная волна способна уменьшить чувствительность ВВ. Во-первых, ее амплитуда должна превосходить некоторый пороговый уровень. Во-вторых, десенсибилизация ВВ является релаксационным процессом, требующим некоторого времени  $\tau_d$ , которое определяется, например, временем закрытия пор и зависит от давления в предшествующей ударной волне. После прохождения предшествующей ударной волны с амплитудой  $p$  частица ВВ изменяет свои свойства через некоторое время  $\tau_d(p)$ .

Инициирование детонации в тонком слое ВВ при воздействии достаточно интенсивной волны сжатия произойдет в том случае, если время задержки нагружения ВВ волной сжатия не будет превосходить время его десенсибилизации, определяемое амплитудой предшествующей ударной волны. Приравнявая время задержки  $\Delta t$  нагружения ВВ волной сжатия к времени десенсибилизации  $\tau_d$ , получим выражение для оценки предельной толщины экранирующей пластины:

$$\delta_{1\text{max}} = \tau_d(1/u_j - 1/\bar{N}_1)^{-1}. \quad (4)$$

Для оценки величины  $\tau_d$  будем считать, что схлопывание пор происходит в режиме вязкого течения. При высокоскоростном пластическом деформировании во фронте ударной вол-

ны твердые ВВ проявляют достаточно высокую эффективную вязкость. Согласно оценкам, основанным на изучении профилей ударных волн, динамическая вязкость ВВ изменяется в диапазоне  $\mu_e = 10 \div 500 \text{ Па} \cdot \text{с}$  [1, с. 169]. При схлопывании поры в вязком режиме характерное время схлопывания, равное времени десенсибилизации  $\tau_d$ , можно определить по соотношению [1]

$$\tau_d = 4\mu_e/(p - Y),$$

где  $Y$  — давление, при котором начинается сжатие поры. Для некоторых средних характеристик ВВ и условий нагружения ( $\mu_e = 100 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ,  $p - Y = 0.5 \text{ ГПа}$ ) время  $\tau_d = 0.8 \text{ мкс}$ . К сожалению, более обоснованно оценить  $\tau_d$  для ЭВВ-34 не удастся. Отметим лишь, что при  $u_j = 4 \text{ км/с}$ ,  $\bar{N} = 5.5 \text{ км/с}$  реалистичную оценку для  $\delta_{1\text{max}}$  (см. табл. 2) можно получить, если положить  $\tau_d \approx 1 \text{ мкс}$ . При таком значении  $\tau_d$  согласно (4)  $\delta_{1\text{max}} = 14 \text{ мм}$ .

При рецензировании статьи было отмечено, что выполненный анализ не учитывает возможности расслоения сборки после прохождения ударной волны через границы раздела между ВВ и ограничивающими пластинами.

### ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ЭКРАНИРУЮЩЕЙ ПЛАСТИНЫ

Роль предварительного ударно-волнового сжатия ВВ иллюстрируют эксперименты по исследованию влияния свойств материала верхней пластины на ее предельную толщину. Необходимые свойства материалов экранирующих пластин и их экспериментально определенные предельные толщины приведены в табл. 3.

Характер предварительного нагружения заряда ВВ определяется толщиной пластины и режимом установившегося проникания КС в экранирующую пластину. При экранировании зарядов тонкими пластинами независимо от режима проникания КС предварительное нагружение ВВ осуществляется предшествующей ударной волной. При увеличении толщины экранирующей пластины предшествующая ударная волна затухает и формируется установившийся режим проникания КС в пластину.

При дозвуковом проникании КС в экранирующую пластину взрывчатое вещество подвергается предварительному нагружению предшествующей ударной волной, обгоняющей проникающую КС. Это имеет место для

Таблица 3

Предельная толщина экранирующих пластин из различных материалов для заряда КЗ-36 и слоя ЭВВ толщиной  $h = 2$  мм

Материал пластины	Режим проникания	$\rho, \text{г/см}^3$	Скорость звука, км/с		$\delta_{1 \max}, \text{мм}$
			$c_l$	$c_b$	
ВНДС	Дозвуковой $u_j < c$	$\approx 10.1$	$\approx 5$	—	$3 \div 6$
Сталь		7.85	5.7	4.6	$12.5 \div 16.5$
АМГ		2.7	6.4	5.25	$8.8 \div 10$
МА		1.5	$5.5 \div 6$	—	$9 \div 10$
Фторопласт	Сверхзвуковой $u_j > c$	2.2	—	1.7	$\geq 97$
Свинец		11.35	—	$\approx 2$	$34 \div 40$

пластин из следующих материалов: тяжелого сплава ВНДС на основе железа и вольфрама, стали, алюминиевого сплава АМГ и сверхлегкого сплава МА на основе магния и лития.

В режиме сверхзвукового проникания, имеющего место при проникании КС во фторопластовые и свинцовые пластины, предварительного нагружения ВВ не происходит, поскольку предшествующая ударная волна преобразуется в баллистическую ударную волну, присоединенную к вершине каверны. Следствием этого является резкое увеличение предельной толщины экранирующих пластин из фторопласта и свинца. Особенно контрастно сравнение предельных толщин пластин из материалов с близкими плотностями, например из легких металлических сплавов АМГ и МА ( $\delta_{1 \max} \approx 9.5$  мм, дозвуковое проникание) и фторопласта ( $\delta_{1 \max} \geq 97$  мм, сверхзвуковое проникание). Более чем в 2.5 раза различаются между собой предельные толщины пластин из плотных материалов с разными режимами проникания в них КС: для стали и ВНДС  $\delta_{1 \max} \approx 14.5$  мм (дозвуковое проникание), для свинца  $\delta_{1 \max} \approx 37$  мм (сверхзвуковое проникание). Если верхние экранирующие пластины изготовлены из свинца или фторопласта, то круговые отпечатки на нижних стальных пластинах не обнаруживаются, что дополнительно подтверждает причину их происхождения.

## ВЫВОДЫ

1. Представлены основные закономерности возбуждения детонации в экранированных тонких слоях ВВ при воздействии КС. Показано, что исключение начальной ударно-волновой стадии нагружения ВВ путем экра-

нирования слоя ВВ легким сжимаемым материалом существенно снижает инициирующую способность КС. Экспериментально определены критические условия инициирования детонации в тонких слоях ВВ, размещенных между металлическими пластинами, при воздействии КС по нормали и под углом  $30^\circ$ .

2. Для экранированных тонких слоев ВВ экспериментально определены предельные толщины экранирующих пластин  $\delta_{1 \max}$ , при превышении которых не происходит инициирования детонации в ВВ при воздействии КС. Для кумулятивных зарядов, диаметр КС которых находится в пределах  $d = 1 \div 2$  мм, а скорость  $v_j = 6 \div 8$  км/с, и для исследованного эластичного взрывчатого вещества ЭВВ-34 предельные толщины экранирующих пластин равны  $\delta_{1 \max} = (10 \div 12)d$ . Величина  $\delta_{1 \max}$  практически не зависит от угла воздействия КС. По мнению автора, основная причина существования предельной толщины верхней пластины состоит в десенсибилизации ВВ предшествующей ударной волной.

3. Экранирующие пластины из материалов с низкой скоростью звука, обеспечивающей сверхзвуковой режим проникания КС, имеют большую предельную толщину, чем пластины из материалов с более высокой скоростью звука, в которые КС проникает в дозвуковом режиме. Например, предельная толщина свинцовой пластины в 2.5 раза больше, чем стальной.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Физика** взрыва: в 2 т. / под ред. Л. П. Орленко. — М.: Физматлит, 2004.
2. **Частные** вопросы конечной баллистики / под ред. В. А. Григоряна. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.



3. **Кобылкин И. Ф., Григорян В. А., Дорохов Н. С.** Проникание кумулятивных струй через взрывную динамическую защиту // Оборон. техника. — 2002. — № 11. — С. 35–45.
4. **Кобылкин И. Ф., Носенко Н. И., Соловьев В. С.** Механизм возбуждения детонации в энергетических материалах высокоскоростными удлиненными элементами // IV Всесоюз. совещ. по детонации: сб. докл. — Черноголовка, 1988. — Т. 1. — С. 97–103.
5. **Иванов Б. А.** Механика кратерообразования // Итоги науки и техники. Механика деформируемого твердого тела. — М.: ВИНТИ, 1981. — С. 60–120.
6. **Dobratz В. М.** Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants. — Livermore: Univ. of California Press, 1981.
7. **Кобылкин И. Ф., Селиванов В. С., Соловьев В. С., Сысоев Н. Н.** Ударные и детонационные волны. Методы исследования. — М.: Физматлит, 2004.

*Поступила в редакцию 28/VII 2013 г.,  
в окончательном варианте — 17/VII 2014 г.*

---