

МЕХАНИКА

УДК 539.3

Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, С.А. Афанасьева, А.А. Югов,
И.Н. Архипов, О.Ю. Федосов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ДЛИННЫХ СТЕРЖНЕЙ С ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗНЕСЕННЫМИ
ЗАЩИТНЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ¹**

Методом компьютерного моделирования исследуется процесс ударного взаимодействия длинных стержней с двумя типами эквивалентных по массе пространственно-разнесенных многослойных конструкций, содержащих слой взрывчатого вещества в диапазоне скоростей удара до 2 км/с и различных углах встречи. Исследуются условия, при которых возникает детонация взрывчатых веществ (ВВ).

Ключевые слова: математическое моделирование, защитные конструкции, ударник, высокоскоростной удар, разрушение, детонация.

При проектировании систем противовоздушной обороны возникает необходимость в разработке методов, позволяющих в широком диапазоне скоростей удара рассчитывать процессы взаимодействия ударников произвольной формы из различных материалов со взрывчатым веществом, защищенным набором из многослойных пространственно-разнесенных преград.

Исследованию ударно-волновых явлений в конденсированных средах и созданию на их основе математических моделей поведения сред сложной структуры с учетом больших деформаций, неупругих эффектов, фазовых превращений и разрушения в условиях высокоскоростного удара и взрыва посвящены работы [1-9]. При построении математической модели инициирования как однородных, так и гетерогенных ВВ, вещество в зоне химической реакции за фронтом ударной волны представляется в виде смеси не прореагировавшего ВВ и продуктов детонации. Отсутствие строгой физически обоснованной модели возникновения и развития детонации гетерогенных ВВ приводит к тем или иным допущениям о развитии процесса инициирования и, как следствие, к разнообразию полуэмпирических уравнений макрокинетики разложения твердых ВВ. Константы, входящие в эти уравнения, полностью или частично подлежат эмпирическому определению.

При решении некоторых задач не требуется рассчитывать воздействие продуктов детонации на конструкцию. Необходимо установить лишь факт инициирования детонации. В этом случае при ударно-волновом нагружении, как правило, используют эмпирические критерии оценки чувствительности ВВ к возбуждению детонации. Именно такой подход используется в данной работе при исследовании

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 10-01-00573а и АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы», проект №2.1.1/4147

особенностей поведения длинных стержней с защитными конструкциями ВВ, представляющими набор пространственно-разнесенных многослойных преград, в условиях высокоскоростного соударения методом компьютерного моделирования.

Целью данной работы является исследование высокоскоростного взаимодействия стержневых ударников с защитной конструкцией ВВ на пределе ее функционирования, т.е. поражения. Для сравнения рассматриваются два типа конструкций, эквивалентных по массе: I тип защиты – трехслойная преграда из дюралюминия, свинца и оргстекла, II тип защиты – стальная пластина.

1. Постановка задачи

Цилиндрический стержень взаимодействует с конструкцией пространственно-разнесенных многослойных преград, за которыми расположен заряд ВВ на металлической подложке. Первая преграда – двухслойный экран из асботекстолита и дюралюминия, вторая преграда представлена в двух эквивалентных по массе вариантах: I тип защиты – трехслойный экран из дюралюминия, свинца и оргстекла, II тип защиты – однослойный экран из стали. Третья преграда – основная двухслойная защита из дюралюминия и пенопласта. Слой ВВ расположен на стальной подложке. Варьируются скорости удара, углы встречи, набор защитных преград и материал ударника.

На рис. 1 приведена схема взаимодействия ударника с защитной конструкцией. Здесь обозначено: 1 – ударник (диаметр $d_0 = 4,5$ мм, длина $L_0 = 105$ мм, высота головной части $h = 9$ мм, масса $m_0 = 12,4$ г); первый экран: 2 – асботекстолит (10 мм), 3 – дюралюминий (3 мм); 4 – второй экран: I тип защиты – трехслойная преграда из дюралюминия (5 мм), свинца (5 мм) и оргстекла (ПММА) (8 мм), II тип защиты – эквивалентная по массе стальная пластина (10 мм); 5 – дюралюминий (3 мм); 6 – пенопласт (20 мм); 7 – взрывчатое вещество РВХ-9404 (30 мм), 8 – стальное основание (30 мм), $L_1=L_2=50$ мм, α_i – угол между осью стержня и лицевой поверхностью i -го экрана (угол наклона экрана).

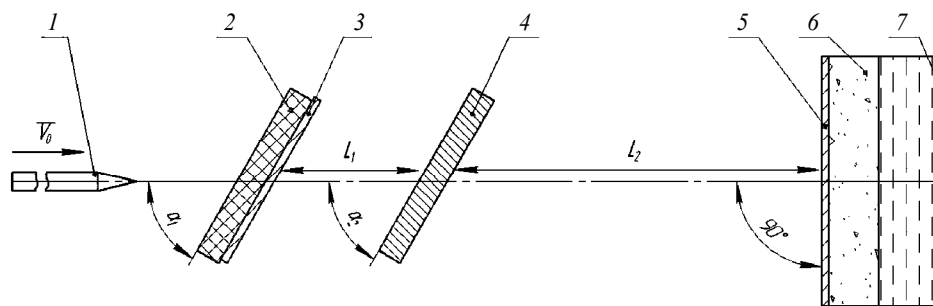


Рис. 1. Схема взаимодействия стержня с защитной конструкцией

Решение задачи проведено путем математического моделирования. Поведение материалов взаимодействующих тел рассматривается в рамках модели пористой упруго-пластической среды [9].

Учитываются два типа разрушения материалов: отрывное и сдвиговое. Отрывное разрушение рассматривается как процесс роста и слияния микродефектов под действием изотропного растягивающего напряжения. В качестве локального кри-

терия отрывного разрушения принимается предельная величина относительного объема пустот. Локальным критерием сдвигового разрушения служит предельная величина интенсивности пластических деформаций.

Для оценки инициирующей способности взрывчатого вещества используется критерий инициирования детонации ВВ при $p > p_{\min}$ в виде [10]

$$\int_{t_0}^t p^2 dt = K,$$

где p – давление в ВВ; $p_{\min}$, K – константы материала.

Численная реализация осуществляется с помощью программного комплекса «РАНЕТ-3» [11], позволяющего проводить решение задач удара и взрыва в полной трехмерной постановке.

2. Результаты расчета

Исследуется влияние двух типов экранной защиты в диапазоне скоростей удара 500 ... 2000 м/с и углов наклона экранов $\alpha_1 = \alpha_2 = 30^\circ$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$.

В табл. 1 и на рис. 2 – 4 представлены данные математического моделирования ударного взаимодействия стального стержня с защитными конструкциями I и II типов со скоростью $V_0 = 1000$ м/с при различных углах наклона экранов (в первом столбце приведен тип защиты, во втором – номер преграды).

Таблица 1

Результаты расчета ударного взаимодействия стального стержня с экранной защитой ВВ при скорости встречи 1000 м/с

Тип	№	Углы наклона $\alpha_1 = \alpha_2 = 30^\circ$			Углы наклона $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$			Углы наклона $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$		
		V/V_0	L/L_0	m/m_0	V/V_0	L/L_0	m/m_0	V/V_0	L/L_0	m/m_0
I	1	0,91	0,81	0,95	0,92	0,88	0,97	0,93	0,89	0,98
	2	0,63	0,49	0,79	0,71	0,60	0,83	0,80	0,70	0,85
	3	Детонация ВВ			0,60	0,54	0,43	0,73	0,68	0,81
II	1	0,91	0,81	0,95	0,92	0,89	0,97	0,93	0,88	0,98
	2	Рикошет			0	0,12	0,23	0,15	0,16	0,22
	Застрыл во 2-м экране									
	3	Нет детонации			Нет детонации			0	0,15	0,19
	Нет детонации									

При скорости удара 1000 м/с при всех углах наклона $\alpha_1 = \alpha_2 = 30^\circ$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$ происходит пробитие стержнем первого двухслойного экрана (рис. 2, а, рис. 3, а, рис. 4, а).

При соударении под углом $\alpha_1 = 30^\circ$ после пробития первого экрана стержень деформируется и частично разрушается в головной части. Его масса составляет 11,8 г ($m/m_0 = 0,95$), скорость – 911 м/с ($V/V_0 = 0,911$) (рис. 2, а).

При взаимодействии со вторым трехслойным экраном (I тип защиты) головная часть стержня отламывается и рикошетирует (рис. 2, б). Остаток стержня пробивает экран при $t = 204$ мкс и в дальнейшем взаимодействует с основной защитной

конструкцией со скоростью 630 м/с, в результате чего происходит инициирование детонации ВВ.

При взаимодействии со вторым стальным экраном (II тип защиты) происходит ricoшетирующее стержня (рис. 2, в). В стальной пластине образуется кратер глубиной $h_{\max} = 0,5d_0$.

Таким образом, при скорости удара $V_0 = 1000$ м/с и угле наклона экранов $\alpha_1 = \alpha_2 = 30^\circ$ I тип защиты не предохраняет ВВ от инициирования детонации, а II тип защиты отклоняет ударник от основной защитной конструкции ВВ.

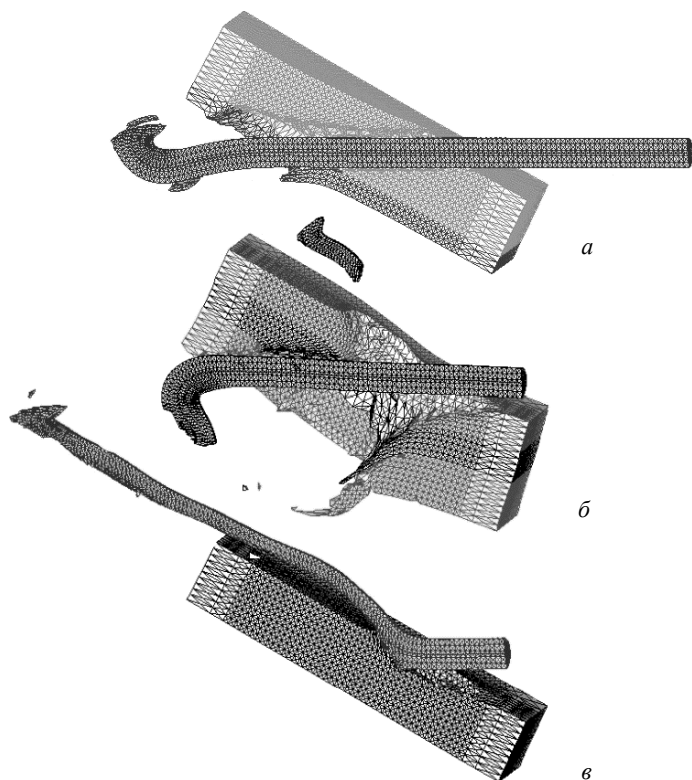


Рис. 2. Ударное взаимодействие стального стержня с экранной защитой ВВ при $V_0 = 1000$ м/с, $\alpha_1 = \alpha_2 = 30^\circ$: а – пробитие первого экрана при $t = 70$ мкс; б – пробитие трехслойного экрана, I тип защиты, при $t = 204$ мкс; в – ricoшет стержня от стального экрана, II тип защиты, при $t = 210$ мкс

При соударении под углом $\alpha_1 = 45^\circ$ пробитие первого экрана происходит к моменту времени $t = 60$ мкс (рис. 3, а). Стержень деформируется и частично разрушается в меньшей степени, чем при $\alpha_1 = 30^\circ$. На момент встречи со вторым экраном ($t = 144$ мкс) его скорость составляет 920 м/с.

При взаимодействии со вторым трехслойным экраном (I тип защиты) головная часть ударника в свинцовом слое сильно деформируется, изгибается и разрушается ($t = 144$ мкс). Пробитие экрана происходит на момент времени $t = 154$ мкс (рис. 3, б), когда остаток стержня пробивает слой свинца. К этому моменту вре-

мени материал подложки из ПММА под кратером уже также разрушен. В результате стержень потерял 17 % первоначальной массы. Скорость остатка ударника составляет 710 м/с, и он в дальнейшем пробивает основную защитную конструкцию и со скоростью 600 м/с взаимодействует с ВВ, в результате чего происходит инициирование детонации.

При взаимодействии со вторым стальным экраном (II тип защиты) стержень разрушается (рис. 3, в). Часть его рикошетирует, а часть массой 2,9 г и длиной $L = 2,08d_0$ останавливается в стальной пластине, образуя в ней кратер глубиной $h_{\max} = 1,13d_0$.

Таким образом, при скорости удара $V_0 = 1000$ м/с и угле наклона экранов $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$ I тип защиты не предохраняет ВВ от инициирования детонации, а II тип защиты разрушает и останавливает ударник, в результате чего он не достигает основной защитной конструкции ВВ.

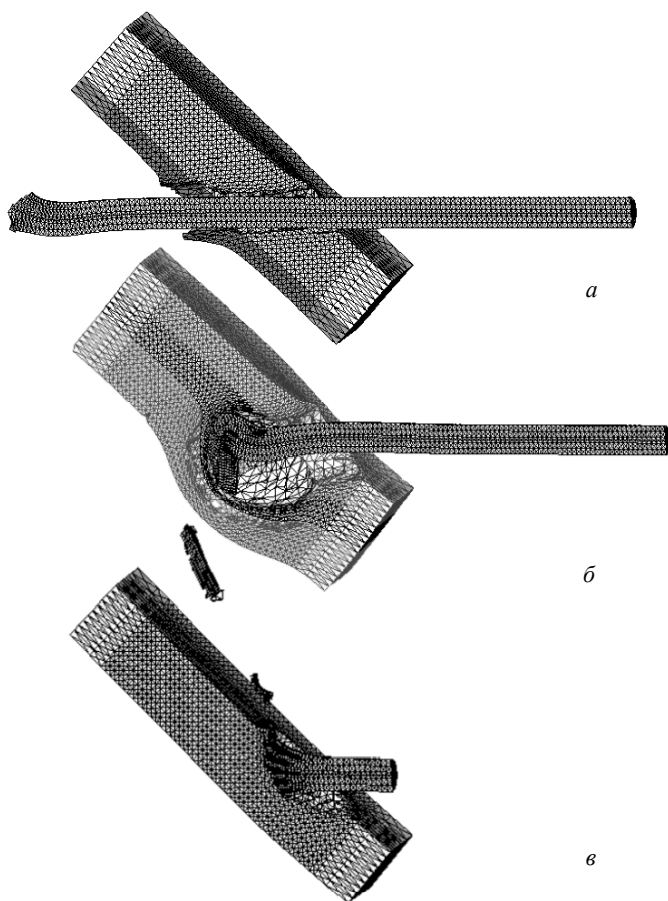


Рис. 3. Ударное взаимодействие стального стержня с экранной защитой ВВ при $V_0 = 1000$ м/с, $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$: а – пробитие первого экрана при $t = 60$ мкс; б – пробитие трехслойного экрана, I тип защиты, при $t = 154$ мкс; в – взаимодействие со стальным экраном, II тип защиты, при $t = 210$ мкс

При соударении под углом $\alpha_1 = 90^\circ$ пробитие первого экрана происходит к моменту времени $t = 50$ мкс (рис. 4, *а*). Стержень деформируется и частично разрушается в меньшей степени, чем в предыдущих случаях.

При взаимодействии с экранной защитой I типа на двух экранах ударник теряет 15 % от первоначальной массы. Относительная длина остатка стержня составляет $L/L_0 = 0,7$. Обладающий после этого достаточно высокой скоростью 730 м/с остаток стержня пробивает основную защиту: дюралюминиевый лист, слой пенопласта взаимодействует непосредственно с ВВ (рис. 4, *б*). На момент инициирования детонации длина остатка стержня $L/L_0 = 0,68$, а потерянная масса составляет 19 % от первоначальной (рис. 4, *б*).

При взаимодействии с экранной защитой II типа на двух экранах ударник теряет 22 % от первоначальной, а скорость падает до 150 м/с. При встрече с основной защитной конструкцией остаток стержня застревает в дюралюминиевом листе (рис. 4, *в*), не вызывая детонации ВВ.

Таким образом, при скорости удара $V_0 = 1000$ м/с и угле наклона экранов $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$ I тип защиты не предохраняет ВВ от инициирования детонации, а II тип защиты разрушает и останавливает ударник в основной защитной конструкции ВВ.

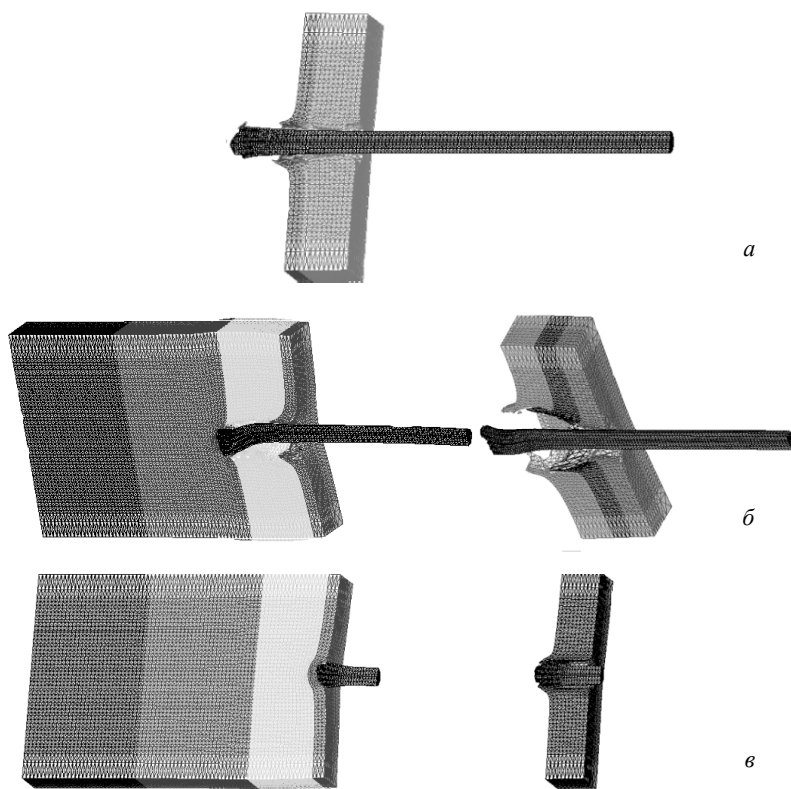


Рис. 4. Ударное взаимодействие стального стержня с экранной защитой ВВ при $V_0 = 1000$ м/с, $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$: *а* – пробитие первого экрана при $t = 50$ мкс; *б* – пробитие второго экрана, I тип защиты, при $t = 119$ мкс и инициирование детонации ВВ; *в* – пробитие второго экрана, II тип защиты, при $t = 210$ мкс и отсутствие инициирования детонации ВВ

В табл. 2 и на рис. 5 – 7 представлены данные математического моделирования ударного взаимодействия стального стержня с защитной конструкцией I типа со скоростью $V_0 = 500$ и 750 м/с при различных углах наклона экранов. В рассмотренных случаях ударник пробивает первый экран, в различной степени деформируясь.

Таблица 2

**Результаты расчета ударного взаимодействия стального стержня
с защитной конструкцией I типа**

V_0 , м/с	№	Углы наклона $\alpha_1 = \alpha_2 = 30^\circ$			Углы наклона $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$			Углы наклона $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$		
		V/V_0	L/L_0	m/m_0	V/V_0	L/L_0	m/m_0	V/V_0	L/L_0	m/m_0
750	1	0,86	0,87	0,95	0,92	0,96	0,97	0,94	0,97	0,98
	2	Застрял во второй преграде			0,72	0,69	0,86	0,72	0,82	0,91
	3	Нет детонации			0,48	0,43	0,85	0,69	0,79	0,88
500	1				Детонация ВВ			Детонация ВВ		
	2				0,868	0,975	0,976	0,918	0,993	0,984
	3				Рикошет			0,682	0,869	0,943
					Нет детонации			0,556	0,857	0,927
								Детонация ВВ		

При скорости удара $V_0 = 750$ м/с и углах наклона $\alpha_1 = \alpha_2 = 30^\circ$ взаимодействие стержня со вторым трехслойным экраном приводит к его изгибу и разрушению. Часть стержня рикошетирует, а часть застревает в экране (рис. 5). Таким образом, основная защитная конструкция не поражена.

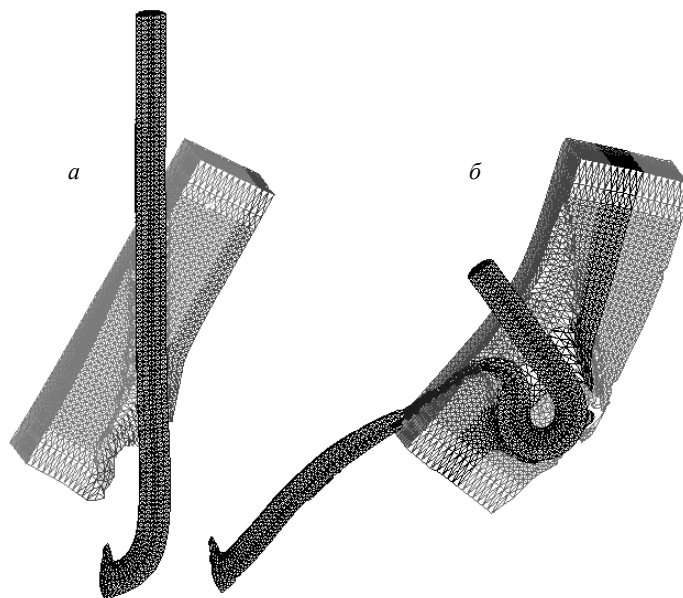


Рис. 5. Ударное взаимодействие стального стержня
с первым (а) и вторым (б) экранами при $V_0 = 750$ м/с, $\alpha_1 = \alpha_2 = 30^\circ$

При углах наклона $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$ взаимодействие стержня со вторым трехслойным экраном приводит к его изгибу и частичному разрушению в головной части (рис. 6, а). При взаимодействии с основной защитной конструкцией (рис. 6, б) происходит сильный изгиб стержня, потеря скорости и массы. Но детонация ВВ в этом случае происходит.

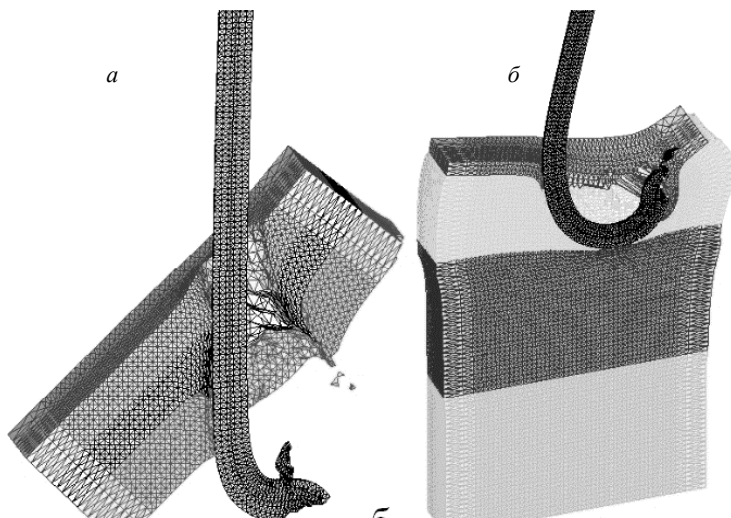


Рис. 6. Ударное взаимодействие стального стержня со вторым экраном (а) и основной защитной конструкцией (б) при $V_0 = 750$ м/с, $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$

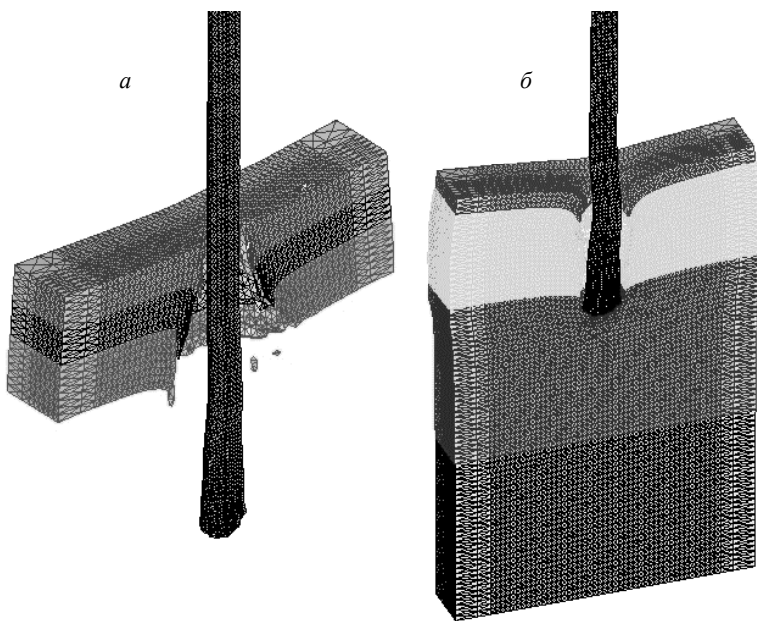


Рис. 7. Ударное взаимодействие стального стержня со вторым экраном (а) и основной защитной конструкцией (б) при $V_0 = 750$ м/с, $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$

При углах наклона $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$ взаимодействие стержня со вторым трехслойным экраном приводит к незначительной деформации стержня в головной части (рис. 7, а). Потеря скорости и массы составляет 28 и 14 % соответственно. Стержень проникает в основную защитную конструкцию и вызывает детонацию ВВ (рис. 7, б)

Как показывают расчеты, предельной скоростью удара для первого типа экранной защиты является $V_0 = 500$ м/с. При данной скорости удара детонирование ВВ происходит лишь при углах встречи $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 90^\circ$. При более низких скоростях удара критерий инициирования детонации не выполняется.

Исследование влияния материала стержня на процесс пробития защитной конструкции второго типа проведено при скорости удара $V_0 = 2000$ м/с и углах наклона $\alpha_1 = \alpha_2 = 30^\circ$. Результаты расчетов представлены в табл. 3 и рис. 8 для ударников из стали, металлокерамики на основе диборида титана и железа и из сплава ВНЖ. Стержни при одинаковой геометрии обладают различной массой, а следовательно, при одинаковой скорости удара и различной кинетической энергией. Параметр λ обозначает отношение кинетической энергии остатков стержней из рассмотренных материалов в запреградном пространстве к начальной кинетической энергии стального стержня

$$\lambda = (mV^2) / (m_{0c}V_0^2),$$

где m_{0c} – начальная масса стального стержня).

Таблица 3

Результаты расчетов ударного взаимодействия стержней из различных материалов с экранированным ВВ при $V_0 = 2000$ м/с, $\alpha_1 = \alpha_2 = 30^\circ$

Материал $m, \text{г}$	Параметры после 1-й преграды			
	V/V_0	L/L_0	m/m_0	λ
Сталь 12,4	0,94	0,73	0,85	0,75
М-кер 9,0	0,93	0,90	0,96	0,60
Сплав ВНЖ 26,9	0,97	0,80	0,91	1,86
Параметры после 2-й преграды				
Сталь 12,4	0,72	0,20	0,31	0,16
М-кер 9,0	0,55	0,49	0,59	0,13
Сплав ВНЖ 26,9	0,93	0,47	0,58	1,09
Параметры на момент детонации ВВ				
Сталь 12,4	0,59	0,13	0,25	0,1
М-кер 9,0	0,55	0,44	0,52	0,1
Сплав ВНЖ 26,9	0,91	0,42	0,54	1,0

Как и следовало ожидать, при пробитии первого двухслойного экрана наибольшая потеря скорости наблюдалась у металлокерамического стержня ($V/V_0 = 0,91$), наименьшая – у стержня из ВНЖ ($V/V_0 = 0,97$). Из-за более высоких прочностных характеристик металлокерамический стержень при пробитии первого экрана терял лишь 4 % массы, в то время как стальной – 15 %. При этом относительная длина L/L_0 металлокерамического стержня уменьшилась на 10 %, в стержне из ВНЖ на 20 %, в стальном – на 27 %.

За стальным экраном скорость металлокерамического стержня уменьшилась до 55 % от скорости удара, у стального – до 72 %, а у остатка стержня из ВНЖ – до 93 %. Относительная длина L/L_0 составила за вторым экраном у стального стержня 20 % от первоначальной, у стержней из ВНЖ и металлокерамики 47 и 49 % соответственно.

На рис. 8 представлены картины взаимодействия остатков стержней из стали, металлокерамики и сплава ВНЖ с ВВ на момент инициирования детонации после пробития экранной защиты. Стальной стержень к этому моменту потерял 69 % своей массы, металлокерамический стержень и стержень из ВНЖ – порядка 40 % каждый. При взаимодействии с третьей преградой, до момента инициирования детонации, наименьшее падение скорости было у стержня из ВНЖ ($V/V_0 = 0,91$), наибольшее – у металлокерамического ($V/V_0 = 0,54$). Скорость остатка стального стержня на момент инициирования детонации составила 59 % от начальной скорости удара, что на 5 % выше, чем у металлокерамического. Однако непосредственно на третьей преграде металлокерамический стержень потерял только 1 % скорости, остаток стержня из ВНЖ – 2 %, а остаток стального – 13 %.

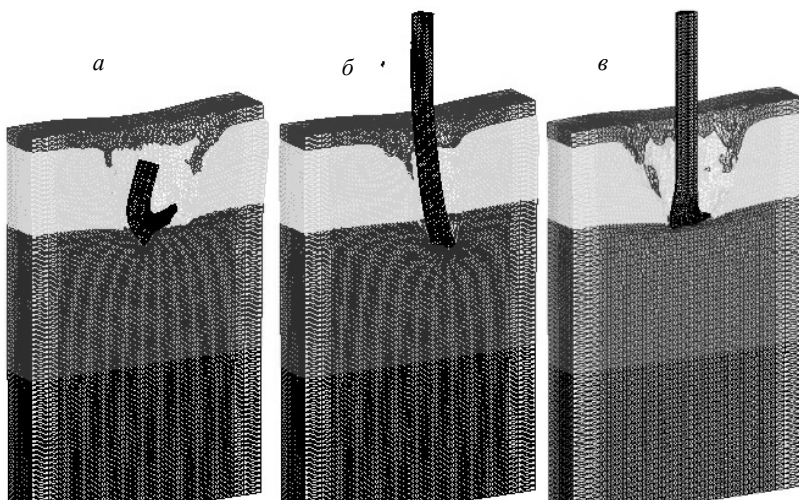


Рис. 8. Ударное взаимодействие остатков стержней с ВВ при $V_0 = 2000$ м/с, $\alpha_1 = \alpha_2 = 30^\circ$: а – стальной стержень; б – металлокерамический стержень ($t = 150$ мкс); в – стержень из ВНЖ ($t = 122$ мкс)

Наименьшей кинетической энергией на момент инициирования обладает остаток стального стержня ($\lambda = 0,088$). Несколько выше кинетическая энергия у остатка стержня из металлокерамики ($\lambda = 0,093$). Остаток из ВНЖ обладает кинетической энергией на порядок выше.

Таким образом, стержень из металлокерамики, массой на 25 % меньшей, чем стальной, оказывает на процесс инициирования детонации такое же воздействие как стальной.

В результате выполнения данного исследования разработаны математические модели и расчетные методики оценки инициирующего действия высокоскоростных ударников, позволяющие прогнозировать результаты высокоскоростного взаимодействия со сложными конструкциями, содержащими ВВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус, 1996.
2. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е. Экспериментальные профили ударных волн в конденсированных веществах. М.: Физматлит, 2008.
3. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках: монография / под общ. ред. М.В. Терноклетова. – Саратов: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2005.
4. Глушак Б.Л., Куропатеко В.Ф., Новиков С.А. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках. Новосибирск: Наука, 1992.
5. Фомин В.М., Гулидов А.И., Сапожников Г.А. и др. Высокоскоростное взаимодействие тел. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.
6. Высокоскоростные ударные явления / под. ред. В.Н. Николаевского. М.: Мир, 1973.
7. Детонация взрывчатого вещества: статьи / под ред. А.А. Борисова. М.: Мир, 1981.
8. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации. М.: Мир, 1985.
9. Белов Н.Н., Югов Н.Т., Копаница Д.Г., Югов А.А. Динамика высокоскоростного удара и сопутствующие физические явления. Томск: STT, 2005.
10. Пилчер Д., Бэкстэнд М., Кристенсен Л. и др. Сопоставление теории с результатами опытов по переходу горения в детонацию // Детонация и взрывчатые вещества. М.: Мир, 1981. С. 306 – 322.
11. Югов Н.Т., Белов Н.Н., Югов А.А. Расчет адиабатических нестационарных течений в трехмерной постановке (РАНЕТ-3) // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2010611042. Москва, 2010.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

БЕЛОВ Николай Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета. E-mail: n.n.belov@mail.ru

ЮГОВ Николай Тихонович – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета. E-mail: n.t.yugov@mail.ru

АФАНАСЬЕВА Светлана Ахмед-Рызовна – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета E-mail: s.a.afanasyeva@mail.ru

ЮГОВ Алексей Александрович – кандидат технических наук, докторант кафедры металлических и деревянных конструкций Томского государственного архитектурно-строительного университета. E-mail: yugalex@sibmail.com

АРХИПОВ Илья Николаевич – аспирант кафедры металлических и деревянных конструкций Томского государственного архитектурно-строительного университета. E-mail: i.n.arkhipov@mail.ru

ФЕДОСОВ Олег Юрьевич – старший инженер Управления перспективных межвидовых исследований и специальных проектов Министерства обороны РФ. E-mail: fedsv.oleg@rambler.ru

Статья принята в печать 16.04.2010 г.