

МЕХАНИКА

УДК 539.3

Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, А.Н. Табаченко,
С.А. Афанасьева, А.А. Югов, И.Н. Архипов

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОКЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ
ДИБОРИДА ТИТАНА ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ¹**

Методом компьютерного моделирования исследованы защитные свойства металлокерамики TiB_2+V_4C комбинированного строения в условиях высокоскоростного удара и особенности проникания стержней из металлокерамики TiB_2+Fe в многослойные пространственно-разнесенные преграды при наклонном соударении.

Ключевые слова: математическое моделирование, разрушение, высокоскоростной удар.

Анализ поведения металлов и сплавов в условиях высокоскоростного соударения показывает, что их прочностные свойства, как правило, резко снижаются при повышенных (предплавильных) температурах ($T > 0,5T_{пл}$). Представляется целесообразным и оправданным с целью повышения эффективности функционирования материалов в экстремальных условиях высоких давлений и температур сосредоточить внимание на разработке материалов и изделий на основе тугоплавких соединений и связей с особыми физико-механическими и специальными свойствами. В качестве защитных материалов на основе таких соединений могут быть использованы керамические и металлокерамические материалы, а также материалы комбинированного строения (слоевые и градиентные). Недостатком керамических материалов является их повышенная хрупкость. Перспективным направлением повышения физико-механических характеристик керамик, функционирующих в условиях высоких давлений и температур, является введение в их состав эффективной металлической связующей, например, методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) с приложением давления к продукту горения [1]. Разнообразие технологических схем позволяет получить СВС-методом как компактные однородные керамические материалы на основе тугоплавких карбидов, боридов, нитридов и т.д., так и материалы комбинированного строения, когда металлокерамика неразрывно связана с металлической подложкой или имеет градиентное строение. Экспериментальные исследования поведения материалов комбинированного строения на основе диборида титана показали их высокие защитные свойства в условиях высокоскоростного удара [2].

Совместное проведение лабораторного эксперимента и математического моделирования позволяет глубже понять протекающие процессы, дать верную интерпретацию полученных экспериментальных данных.

¹ Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №07-01-00414а и №08-01-00268а.

В [3] предложена математическая модель, позволяющая в рамках механики сплошной среды рассчитывать при ударно-волновом нагружении напряженно-деформированное состояние и разрушение, как в пластичных, так и в хрупких материалах. В рамках данной модели динамическое разрушение в материале рассматривается как процесс роста и слияния микродефектов под действием образующихся в процессе нагружения напряжений. Модель реализована в пакете вычислительных программ «РАНЕТ-3», предназначенном для решения задач удара и взрыва в полной трехмерной постановке модифицированным на решение динамических задач методом конечных элементов [3].

В данной работе пакет программ «РАНЕТ-3» был использован для исследования поведения металлокерамических материалов на основе диборида титана в составе элементов защитных конструкций и стержневых ударников. Компьютерное моделирование поведения материалов в условиях динамического нагружения позволяет сформулировать необходимые требования к физико-механическим характеристикам вновь разрабатываемых конструкционных материалов.

1. Математическая модель деформирования и разрушения конструкционных материалов при ударно-волновом нагружении

Неоднородная пористая среда представлена как двухкомпонентный материал, состоящий из твердой фазы – матрицы и включений – пор. Предполагается, что форма пор близка к сферической, а функция их распределения по размерам такова, что они могут быть охарактеризованы некоторым общим для всего ансамбля характерным размером a_0 . Удельный объем пористой среды v представляется в виде суммы удельного объема материала матрицы v_m , удельного объема пор v_p и удельного объема v_t , образующегося при раскрытии трещин: $v = v_m + v_p + v_t$. Пористость материала характеризуется относительным объемом пустот $\xi = \xi_p + \xi_t$ либо параметром $\alpha = v/v_m$, которые связаны зависимостью $\alpha = 1/(1-\xi)$. Здесь $\xi_p = v_p/v$, $\xi_t = v_t/v$ – относительные объемы пор и трещин соответственно. Система уравнений, описывающих движение пористой упруго-пластической среды, имеет вид [3]

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho dV &= 0; \quad \frac{d}{dt} \int_V \rho \mathbf{u} dV = \int_S \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} dS; \\ \frac{d}{dt} \int_V \rho E dV &= \int_S \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{u} dS; \quad \mathbf{e} = \frac{\mathbf{s}^J}{2\mu} + \lambda \mathbf{s}; \\ \mathbf{s} : \mathbf{s} &= \frac{2}{3} \sigma_T^2; \quad p = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{c_0^2 \rho_0 (1 - \gamma_0 \eta / 2) \eta}{(1 - s_0 \eta)^2} + \rho_0 \gamma_0 \varepsilon \right], \end{aligned}$$

где t – время; V – объем интегрирования; S – его поверхность; $\mathbf{n}$ – единичный вектор внешней нормали; ρ – плотность; $\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{g} + \mathbf{s}$ – тензор напряжений; $\mathbf{s}$ – его девиатор; p – давление; $\mathbf{g}$ – метрический тензор; $\mathbf{u}$ – вектор скорости; $E = \varepsilon + \mathbf{u} \cdot \mathbf{u} / 2$ – удельная полная энергия; ε – удельная внутренняя энергия; $\mathbf{e} = \mathbf{d} - (\mathbf{d} : \mathbf{g})\mathbf{g} / 3$ – девиатор тензора скоростей деформаций; $\mathbf{d} = (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) / 2$ – тензор скоростей дефор-

маций; $\mathbf{s}^J = \mathbf{s} + \mathbf{s} \cdot \boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{s}$ – производная девиатора тензора напряжений в смысле Яуманна – Нолла; $\sigma_T = \sigma_S / \alpha$, $\mu = \mu_0 (1 - \xi) \left[1 - (6\rho_0 c_0^2 + 12\mu_0) \xi / (9\rho_0 c_0^2 + 8\mu_0) \right]$ – эффективные предел текучести и модуль сдвига (для гранулированной среды $\sigma_T = Y_0 / \alpha + kp$); $\boldsymbol{\omega} = (\nabla \mathbf{u}^T + \nabla \mathbf{u}) / 2$ – тензор вихря; $\rho_0, c_0, \mu_0, \sigma_S, Y_0, k, s_0$ – константы материала матрицы; $\eta = 1 - \rho_0 \nu / \alpha$. Параметр λ исключается с помощью условия текучести.

Для замыкания системы необходимы уравнения, описывающие изменение параметра α при растяжении и сжатии.

При уплотнении изначально пористых пластичных материалов в условиях ударно-волнового нагружения параметр α при условии $p \geq \frac{2\sigma_S}{3\alpha} \ln\left(\frac{\alpha}{\alpha-1}\right)$ определяется из уравнения

$$\gamma_0 \rho_0 \varepsilon + \frac{\rho_0 c_0^2 \left(1 - \gamma_0 \eta / 2\right) \eta}{(1 - s_0 \eta)^2} - \frac{2\sigma_S}{3} \ln\left(\frac{\alpha}{\alpha-1}\right) = 0.$$

Хрупкие материалы содержат большое число концентраторов напряжений – пор, границ зерен, трещин, зарождение разрушения на которых происходит в области упругого деформирования. Микроразрушения в них могут появляться при сжатии под действием девиаторных напряжений, что приводит к падению сопротивления разрушению. Эта стадия деформирования характеризуется процессами образования, роста и слияния микротрещин. Уравнение, описывающее изменения параметра α при растяжении и сжатии на упругой стадии разрушения хрупких материалов имеет вид

$$\gamma_0 \rho_0 \varepsilon + \frac{\rho_0 c_0^2 \left(1 - \gamma_0 \eta / 2\right) \eta}{(1 - s_0 \eta)^2} + \frac{3\mu_0 (\alpha - \alpha_0)}{8(1 - \nu) N_0 \alpha_0 R^3 \alpha} = 0.$$

Рост трещин определяется уравнением

$$\dot{R}/R = F_1 + F_2,$$

где $F_1 = (\alpha s_i - s_*) / \eta_1$ при $\alpha s_i > s_*$ и $F_1 = 0$ при $\alpha s_i \leq s_*$; $F_2 = (|\alpha p| - p_*) / \eta_2$ при $p < 0, |\alpha p| > p_*$ и $F_2 = 0$ при $p \geq 0, |\alpha p| \leq p_*$; $p = p_0 (1 - R/R_*)$; $s_i = \sqrt{\frac{3}{2}} \mathbf{s} : \mathbf{s}$; $s_* = s_{01} (1 - R/R_*)$; $R_* = \beta / \sqrt[3]{N_0}$; R – радиус трещины; $s_{01}, p_0, \eta_1, \eta_2, \beta$ – константы материала, N_0 – число трещин в единице объема, ν – коэффициент Пуассона.

В пластичных материалах при действии растягивающих напряжений происходит рост пор. В этом случае при условии $p \leq -\frac{a_S}{\alpha} \ln\left(\frac{\alpha}{\alpha-1}\right)$ пористость α определяется из уравнения

$$\gamma_0 \rho_0 \varepsilon + \frac{\rho_0 c_0^2 \left(1 - \gamma_0 \eta / 2\right) \eta}{(1 - s_0 \eta)^2} + a_S \ln\left(\frac{\alpha}{\alpha-1}\right) = 0.$$

Слияние микротрещин в случае достаточно пластичных материалов происходит в результате их непосредственного соприкосновения. Расчеты системы упругих трещин показывают, что взаимодействие между ними и слияние имеет место при расстояниях между ближайшими их концами порядка двух-трех размеров трещин [4]. Это критическое расстояние связано с размером зоны вокруг трещины, где существенна концентрация их напряжений, обусловленная трещиной (область влияния трещины).

Построение количественной модели слияния микродефектов вплоть до образования микроскопических фрагментов является сложной задачей. Предполагается, что слияние микротрещин в высокопрочной керамике происходит, когда их характерный размер R при постоянной концентрации N_0 достигнет критической величины $R_* = \beta/\sqrt[3]{N_0}$.

В более вязких материалах, чем высокопрочная керамика, условие $R = R_*$ является лишь критерием начала фрагментации поврежденного трещинами материала. Процесс фрагментирования поврежденного трещинами материала и поведение разрушенного материала описываются в рамках модели пористой упруго-пластической среды. При действии растягивающих напряжений в пластически деформированном материале помимо роста трещин происходит рост пор. В этом случае локальным критерием разрушения поврежденного трещинами материала является условие достижения относительным объемом пустот $\xi = (\alpha - 1)/\alpha$ критического значения ξ^* .

Если поврежденный трещинами материал подвергнуть воздействию сжимающих напряжений, то критерием фрагментирования является предельная величина интенсивности деформаций e_u :

$$e_u = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{3T_2 - T_1^2},$$

где T_1 и T_2 – первый и второй инварианты тензора деформаций.

Поведение разрушенного материала описывается в рамках модели пористой упругопластической среды. При расчете уплотнения в изначально пористой

фрагментированной высокопрочной керамике $\left(p > -\frac{Y_0}{\alpha k} \left[1 - \left(\frac{\alpha}{\alpha - 1} \right)^{\frac{2k}{3-2k}} \right] \right)$ система уравнений замыкается уравнением $\alpha p + \frac{Y_0}{k} \left[1 - \left(\frac{\alpha}{\alpha - 1} \right)^{\frac{2k}{3-2k}} \right] = 0$.

2. Исследование защитных свойств металлокерамики $\text{TiB}_2 + \text{V}_4\text{C}$ комбинированного строения

Верификация математической модели, описывающей поведение металлокерамики при ударно-волновом нагружении, проведена на решении следующей задачи.

Металлокерамический ударник, имеющий форму параллелепипеда, в основании которого находится квадрат со стороной $d_0 = 9,3$ мм, соударяется по нормали со скоростью 870 м/с с алюминиевой полубесконечной плитой. Высота параллелепипеда $l_0 = 30$ мм. Решение задачи проведено при следующих физико-

механических параметрах модели: $R_0 = 2,5 \text{ мкм}$; $R = 11,6 \text{ мкм}$; $N_0 = 64 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$; $\eta_1 = 1,6 \text{ ГПа} \cdot \text{мкс}$; $\eta_2 = 0,7 \text{ ГПа} \cdot \text{мкс}$; $p_0 = 1,1 \text{ ГПа}$; $s_{01} = 5 \text{ ГПа}$. Параметры уравнения состояния приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры уравнения состояния

Материал	ρ_0 , $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	c_0 , $\frac{\text{см}}{\text{мкс}}$	s_0	γ_0	μ_0 , ГПа	α_0	a_s , ГПа	ξ^*	e_u^*
Металлокерамика	3,5	0,71	1,32	1,5	166,0	1,0006	0,08	0,1	0,25
Алюминий	2,785	0,525	1,34	2,13	27,7	1,0002	0,14	0,3	1,0
Сталь	7,85	0,457	1,49	1,5	79,0	1,0003	0,29	0,3	1,25
Титан	4,45	0,511	1,089	1,5	44,0	1,0003	0,5	0,3	1,25

На рис. 1 в два момента времени ($t_1 = 22 \text{ мкс}$, $t_2 = 280 \text{ мкс}$) изображены сечения изометрических проекций конфигураций соударяющихся тел. На нем же приведена фотография кратера в алюминиевой мишени, полученного в результате аналогичного эксперимента, проведенного в НИИ ПММ ТГУ Коняевым А.А. и Толкачевым В.Ф.

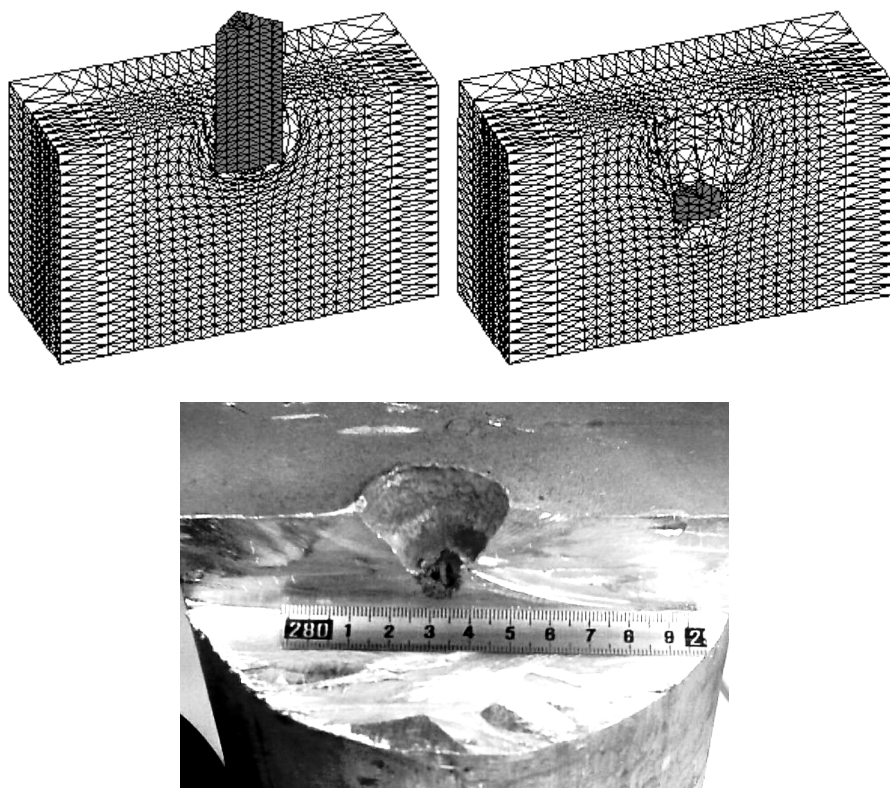


Рис. 1. Сравнение расчета с экспериментом

При взаимодействии металлокерамического ударника с алюминиевой плитой от границы контакта в соударяющиеся тела распространяются ударные волны, максимальная амплитуда которых к моменту времени 4 мкс достигает 8 ГПа.

По мере распространения волн сжатия в ударнике, происходит интенсивный рост трещин, которые успевают достичь критической величины. При этом область, в которой трещины достигают этой величины, занимает примерно $\frac{3}{4}$ высоты ударника к моменту времени 6 мкс. Идущая со свободных поверхностей ударника и мишени разгрузка приводит к тому, что внутри, в центральной части ударника, находящейся вблизи контактной поверхности, к моменту времени 4 мкс возникает область с растягивающими напряжениями, в которой и реализуется первоначальное разрушение ударника.

В связи со специфическими особенностями алгоритма перестройки расчетной сетки, области с разрушенным материалом ударника в данном конкретном случае из счета не удаляются, а лишь увеличиваются в объеме вплоть до момента времени 24 мкс, когда вся нижняя часть ударника не оказывается разрушенной. С этого момента происходит перестройка расчетной сетки. В результате образуются два целостных фрагмента ударника, движущихся вниз. Наряду с ними в расчете участвуют и частицы разрушенного материала ударника, которые заменяются точечными элементами, имеющими свою массу и скорость, определяемые из законов сохранения массы и количества движения после замены разрушенного элементарного тетраэдрального элемента его узловыми элементами [3]. Таким образом, осуществляется возможность моделировать воздействие мелких частиц разрушенного материала ударника на формирование кратера в мишени. К моменту времени 280 мкс процесс взаимодействия заканчивается. Видно, что от ударника остается небольшой неразрушенный фрагмент, который застревает в кратере плиты. Под фрагментом находится разрушенный материал ударника, который на рисунке не отображен. Кратер имеет специфическую, зауженную в глубину плиты форму, образующуюся под воздействием разрушенных частиц материала ударника.

И в эксперименте, и при расчете на дне кратера находится как разрушенный, так и частично не разрушенный спрессованный материал ударника. Кратер имеет качественно подобную форму, состоящую как бы из двух перевернутых конусов, вставленных друг в друга. Наружный конус, выходящий на лицевую поверхность, расширенный. Внутренний конус, уходящий в глубину мишени, зауженный, образующийся под воздействием мелких частиц разрушенного материала ударника. Различие по глубине кратера составляет 3 %, по входному диаметру кратера – 30 %.

Защитные свойства металлокерамики исследовались на примере решения следующей задачи проектирования. Необходимо разработать защитную конструкцию, способную противостоять удару стального элемента (СЭ) сферической формы массой 2 г в диапазоне скоростей до 2 км/с. Защитная конструкция может состоять из различных материалов, но непременно должна содержать стальной лист толщиной 4 мм и по удельному весу не должна значительно превышать эталонную преграду, состоящую из 10-мм дюралюминиевого слоя и 4-мм стальной подложки.

На рис. 2, а приведена конфигурация стального элемента и эталонной преграды в момент времени 50 мкс при соударении со скоростью 2 км/с. При данной скорости удара СЭ пробивает эталонную мишень. Масса элемента после пробивания составляет 1 г, скорость – 407 м/с.

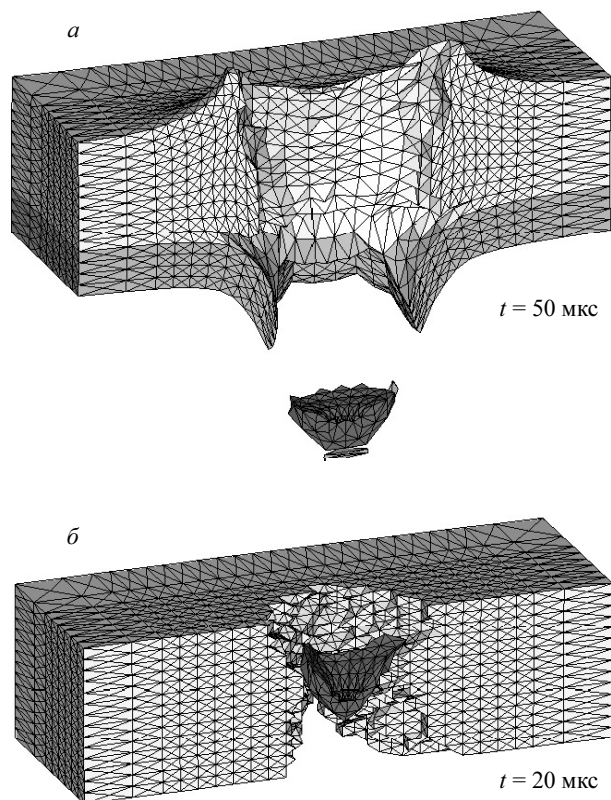


Рис. 2. Картина пробития СЭ эталонной и металлокерамической мишеней со скоростью удара 2 км/с

На рис. 2, б в момент времени 20 мкс приведены конфигурации СЭ и монолитной мишени из $\text{TiB}_2 + \text{B}_4\text{C}$ ($\rho_0 = 3,5 \text{ г/см}^3$) толщиной 14 мм. Скорость удара в данном варианте расчета и во всех последующих фиксирована и составляет 2 км/с. Как и следовало ожидать, вследствие высоких прочностных характеристик металлокерамики в первые микросекунды процесса соударения происходит сильная пластическая деформация элемента и его растекание по лицевой поверхности мишени. Данная металлокерамика разрушается хрупко.

Распространяющийся по мишени ударно-волновой фронт приводит к росту микротрещин. При выходе его на тыльную поверхность в мишени формируется волна разгрузки достаточно высокой интенсивности, которая приводит к фрагментации поврежденного материала и откольному разрушению. В момент времени 10 мкс область откольного разрушения в мишени достигает кратера. Образуется сквозное отверстие. После пробития мишени элемент имеет массу 0,9 г и скорость 150 м/с.

Для устранения откольного эффекта на тыльную поверхность мишени помещалась 2-мм титановая подложка. На рис. 3, а представлена двухслойная мишень, у которой толщина титановой подложки 2 мм, а высота металлокерамического слоя 10 мм ($t = 45 \text{ мкс}$). Вес рассматриваемой конструкции составляет 74 % от эталонного. Ударник останавливается в металлокерамическом слое.

Остаточная масса застрявшего СЭ составляет 0,7 г. На рис. 3, б в качестве подложки использована стальная пластина толщиной 4 мм (толщина слоя металлокерамики – 10 мм). Пробитие конструкции не происходит. Остаточная масса ударника 0,8 г.

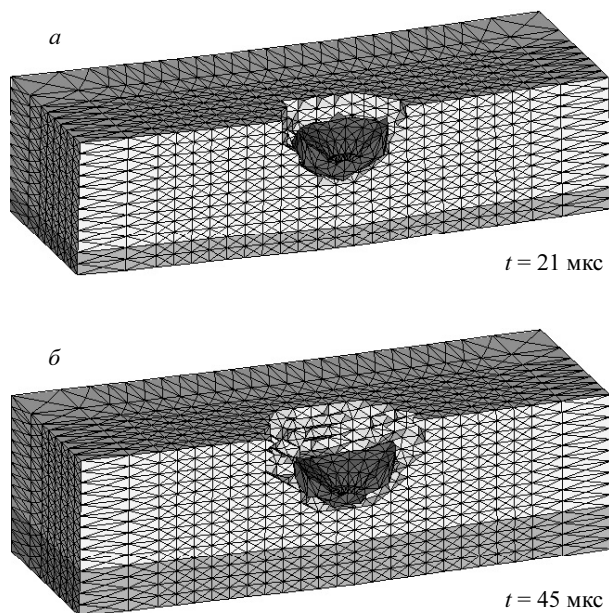


Рис. 3. Картины разрушения в двухслойных мишенях с титановой (а) и стальной (б) подложками при ударе СЭ со скоростью 2 км/с

Рис. 4 иллюстрирует особенности ударного взаимодействия СЭ с трехслойными мишенями. Во всех приведенных ниже вариантах расчета толщины слоев зафиксированы. Толщина стального слоя – 4 мм, титанового – 2 мм, металлокерамического – 8 мм. Вес конструкции при данных габаритах превышает вес эквивалентной мишени на 15 %. В расчете исследовалось влияние местоположения слоев на защитные свойства конструкции.

Если в качестве первого защитного слоя использовать стальной лист, то СЭ не пробивает его (рис. 4, а). Масса оставшейся части 0,8 г. На рис. 4, б приведена защитная конструкция, в которой в качестве первого слоя используется титановый лист, а в качестве подложки – стальной.

Принципиальным отличием данного расчета от всех предыдущих является то, что периодическое отражение волн сжатия и разгрузки от стальной подложки и титановой накладки приводит к интенсивному разрушению металлокерамического слоя. Остаточная масса СЭ в данном случае меньше, чем в предыдущем варианте, и составляет 0,5 г.

При использовании в качестве подложки одновременно титанового и стального листов происходит сильное разрушение металлокерамического слоя на границе с титановым листом (рис. 4, в). Пробитие защитной конструкции не происходит, остаточная масса ударника – 0,7 г.

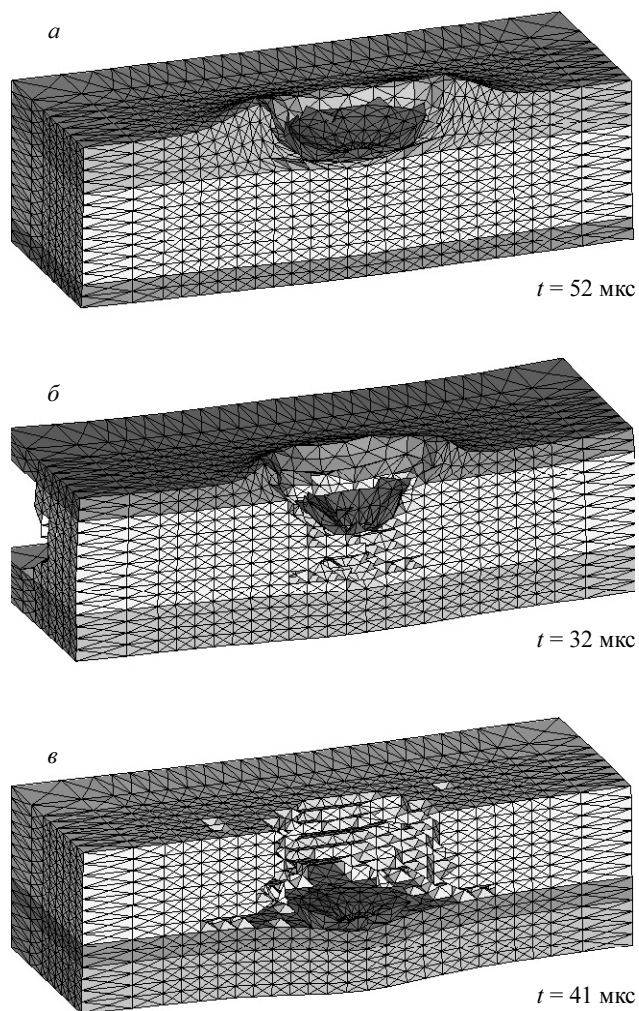


Рис. 4. Картины разрушения в трехслойных мишенях при ударе СЭ со скоростью 2 км/с.

3. Исследование проникания стержней из металлокерамики $\text{TiB}_2 + \text{Fe}$ в многослойные пространственно разнесенные преграды

Помещенный на стальное основание заряд РВХ-9404 толщиной 30 мм защищен с лицевой стороны 3-мм дюралюминиевым листом. Пространство между ВВ и дюралюминиевым листом заполнено слоем пенопласта толщиной 20 мм. На расстоянии 50 мм от лицевой поверхности дюралюминиевого листа расположен 10-мм стальной экран, за которым на том же расстоянии находится экран, состоящий из 10-мм слоя асботекстолита и 3-мм дюралюминиевой подложки. Экраны расположены под некоторыми углами α_i к оси стержня и лицевой (α_i – угол между осью стержня и лицевой поверхностью i -го экрана). Стержень представляет собой цилиндрическое тело с конической головной частью. Диаметр стержня

$d_0 = 4,5$ мм, длина $L_0 = 105$ мм, удлинение $L/d_0 = 23,33$. Расчет проведен для скорости удара 2 км/с и углах подхода стержня к экранам: $\alpha_1 = 30^\circ$, $\alpha_2 = 30^\circ$. Рассматривались стержни из стали и металлокерамики $\text{TiB}_2 + \text{Fe}$ (массовые доли $m_1 = m_2 = 0,5$). Результаты расчетов представлены в табл. 2 и на рис. 4, на которых приведены картины пробития экранов и взаимодействие остатков стержней с ВВ на момент его детонации.

Таблица 2

Результаты расчетов ударного взаимодействия стержней из различных материалов с экранированным ВВ со скоростью 2 км/с и углах подхода $\alpha_1 = \alpha_2 = 30^\circ$

Материал	Параметры после 1-й преграды				Параметры после 2-й преграды				Параметры на момент детонации ВВ			
	$\frac{V}{V_0}$	$\frac{L}{L_0}$	$\frac{m}{m_0}$	λ_1	$\frac{V}{V_0}$	$\frac{L}{L_0}$	$\frac{m}{m_0}$	λ_1	$\frac{V}{V_0}$	$\frac{L}{L_0}$	$\frac{m}{m_0}$	λ_1
Сталь, $m_0 = 12,4$ г	0,94	0,73	0,85	0,752	0,72	0,20	0,31	0,160	0,59	0,13	0,25	0,088
Металлокерамика, $m_0 = 9,0$ г	0,93	0,90	0,96	0,602	0,55	0,49	0,59	0,129	0,54	0,44	0,52	0,093

Для оценки инициирующей способности использовался критерий инициирования детонации (при $p > p_{\min}$) в виде [5]

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

где K – константа материала; p – давление в ВВ, $p_{\min}$ – минимальное давление, при котором происходит инициирование детонации.

Масса стержня из металлокерамики ($m_0 = 9,0$ г) составляет приблизительно 75 % от стального ($m_0 = 12,4$ г). Как и следовало ожидать, при пробитии первого экрана наибольшая потеря скорости наблюдается у металлокерамического стержня ($V/V_0 = 0,93$). Однако из-за более высоких прочностных характеристик (предел прочности металлокерамики в 4,5 раза выше, чем у стали) металлический стержень при пробитии потерял лишь 4 % первоначальной массы, в то время как стальной – 15 %. При этом относительная длина L/L_0 у стержня из металлокерамики уменьшилась на 10 %, у стального – на 27 %. За стальным экраном скорость металлокерамического стержня упала до 55 % от начальной скорости удара, у стального – до 72 %. При пробитии двух экранов стержень из металлокерамики потерял 41% массы, из стали – 69 %. Его длина составила лишь 20 % от первоначальной, в то время как металлокерамический стержень по длине сократился лишь вдвое ($L/L_0 = 0,49$).

При взаимодействии с основной конструкцией до момента инициирования детонации в ВВ наименьшее падение скорости наблюдается у металлокерамического стержня. В отличие от сильно деформируемой головной части стального стержня, головная часть металлокерамического, из-за его высоких прочностных характеристик на момент удара по дюралюминиевому слою, получилась скошен-

ной (заостренной, рис. 5, б). В табл. 2 параметр λ обозначает отношение кинетической энергии стержней в запреградном пространстве к начальной кинетической энергии стального стержня ($\lambda = m/m_{0c} \cdot (V/V_0)^2$, m_{0c} – начальная масса стального стержня). На момент инициирования детонации остатки ударников из стали ($\lambda = 0,088$) и металлокерамики ($\lambda = 0,093$) обладают приблизительно одинаковой кинетической энергией.

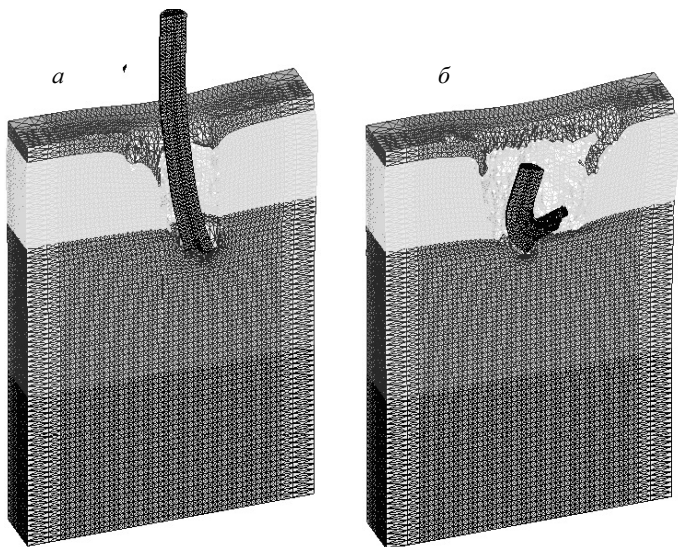


Рис. 5. Картины взаимодействия остатков стержней с основным элементом конструкции на момент инициирования детонации ВВ (*а* – металлокерамический стержень, *б* – стальной, $t = 150$ мкс)

Проведенный анализ показывает, что металлокерамический стержень с используемыми в расчетах прочностными характеристиками производит на процесс инициирования детонации в данном экранированном ВВ такое же воздействие, как и стальной, несмотря на то, что его масса на 25 % меньше и, следовательно, он обладает меньшей на момент удара кинетической энергией.

Рис. 6, *а* иллюстрирует картину пробития в первом экране составным ударником (10 мм – $\text{TiB}_2 + \text{Fe}$ + 90 мм – сталь) диаметром 6 мм при скорости удара $V_0 = 2$ км/с при угле подхода 30° . Головная часть монолитного стального стержня (рис. 6, *в*) при прохождении через двухслойный экран сильнее деформируется, чем у составного, и тем более, чем у металлокерамического (рис. 6, *б*). Видно, что металлокерамический стержень при проникании через образованное в экране отверстие взаимодействовал с его боковой поверхностью, в результате чего в нем образовался изгиб.

В процессе внедрения составного стержня происходит пластическое натекание материала стальной части стержня на металлокерамический насадок, который в области раздела сред находится в упругом состоянии. В дальнейшем высокопрочный насадок поворачивается относительно основной части стержня и отламывается от него. Пробивные свойства стержня падают.

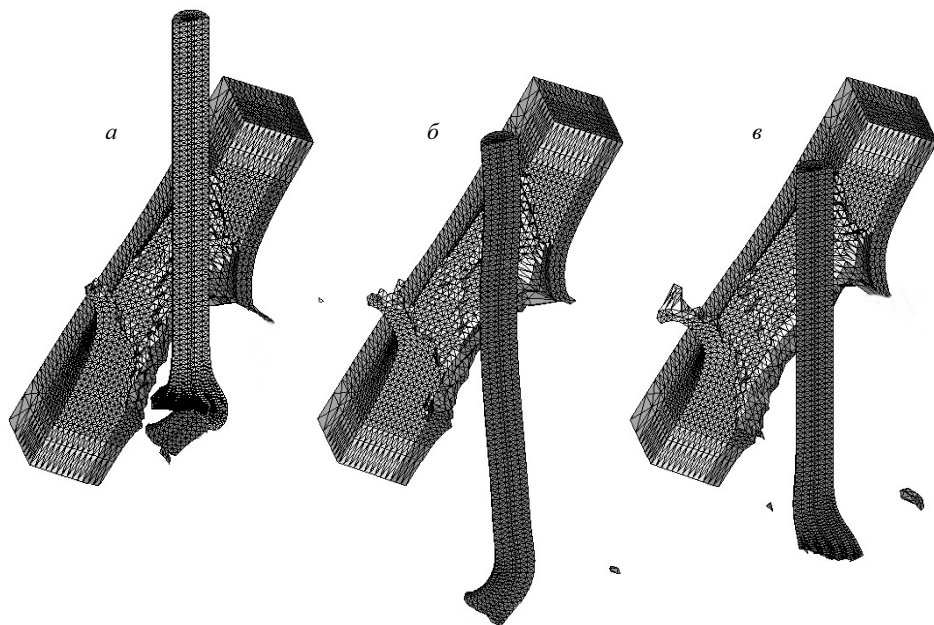


Рис. 6. Картины пробития стержнями двухслойного экрана. Скорость удара 2000 м/с, $\alpha_1 = 30^\circ$: *a* – составной стержень, $t = 35$ мкс; *б* – металлокерамический, $t = 50$ мкс; *в* – стальной, $t = 50$ мкс

Анализируя особенности ударного взаимодействия монолитных и составных стержней с двухслойным экраном, можем утверждать, что при наклонном соударении в запреградном пространстве составные ударники будут ломаться в местах изгиба при взаимодействии со вторым стальным экраном. На наш взгляд, более эффективными будут стержни из градиентных материалов, в которых физико-механические характеристики непрерывно меняются по длине стержня.

ЛИТЕРАТУРА

1. Табаченко А.Н., Крючкова Г.П. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез композиционных материалов. Тугоплавкие соединения (TiC , TiB_2) – интерметаллиды, их структура и свойства. // Инженерно-физический журнал АН Беларуси. 1993. Т. 65. № 4. С. 492 – 495.
2. Белов Н.Н., Югов Н.Т., Афанасьева С.А. и др. Исследование особенностей разрушения керамики и металлокерамики на основе диборида титана и карбида бора в условиях высокоскоростного удара // Механика композиционных материалов и конструкций. 2005. Т. 11. №1. С. 113 – 126.
3. Белов Н.Н., Югов Н.Т., Копаница Д.Г., Югов А.А. Динамика высокоскоростного удара и сопутствующие физические явления. Томск: STT, 2005. 356 с.
4. Салганик Р.Л. Механика тел с большим числом трещин // Изв. АН СССР. МТТ. 1973. № 4. С. 149 – 158.
5. Пилчер Д., Бекстенд 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.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

БЕЛОВ Николай Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры высшей математики Томского государственного архитектурно-строительного университета, 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, профессор кафедры общей математики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета. E-mail: n.t.yugov@mail.ru

ТАБАЧЕНКО Анатолий Никитович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией Сибирского физико-технического института Томского государственного университета. E-mail: tabachenko@spti.tsu.ru

АФАНАСЬЕВА Светлана Ахмед-Рызовна, кандидат физико-математических наук, старший 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, доцент 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

Статья принята в печать 02.09.2009 г.