

Особенности формирования высокоскоростных компактных элементов из тяжелых сплавов плоской детонационной волной

12, декабрь 2014

Бандурин И. Н., Колпаков В. И.

УДК: 519.63:539.5:621.7

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

ibandurin@yandex.ru

Введение

Представляемая работа посвящена вопросам, связанным с совершенствованием, так называемых, снарядоформирующих зарядов (СФЗ), которые, в основном, используются в самоприцеливающихся боевых элементах и реализуют дистанционное действие по наименее защищенным проекциям цели. Они являются основой современного высокоточного кассетного оружия.

Анализ современных разработок и исследований в плане повышения эффективности действия СФЗ за последнее десятилетие позволил выделить наиболее перспективные пути их совершенствования. В целом они реализуются по следующим направлениям. Во-первых, это использование танталовых сплавов для изготовления облицовок СФЗ; Во-вторых, повышение скорости поражающего элемента (ПЭ), действующего по преграде и, наконец, в-третьих, создание ПЭ повышенного удлинения. В настоящей работе рассмотрено несколько конструктивных схем СФЗ, развивающих первое и второе направления и использующих в своей основе танталовые облицовки.

Постановка задачи

Целью настоящей работы является повышение эффективности действия СФЗ за счет использования танталовых кумулятивных облицовок (КО), допускающих простую технологию изготовления последних.

Математическое моделирование процесса формирования ПЭ взрывом из КО рационально проводить в двумерной осесимметричной постановке. При этом расчетная схема представляет собой прямоугольную область, заполненную воздухом и имеющую продольную ось симметрии. В эту область вписана конструкция заряда, которая состоит из стального корпуса (1), наполненного взрывчатым веществом (ВВ) (2), и танталовой КО (3). В начальный момент времени $t = 0$ мкс ПВГ (4) инициирует ДВ, формой которой мож-

но управлять в определенных пределах. В выбранной системе координат ось абсцисс совпадает с осью симметрии расчетной области, а её направление — с направлением предполагаемого движения формируемого элемента. Начало отсчета (точка 0) помещена в плоскость основания заряда ВВ так, как показано на рис. 1.

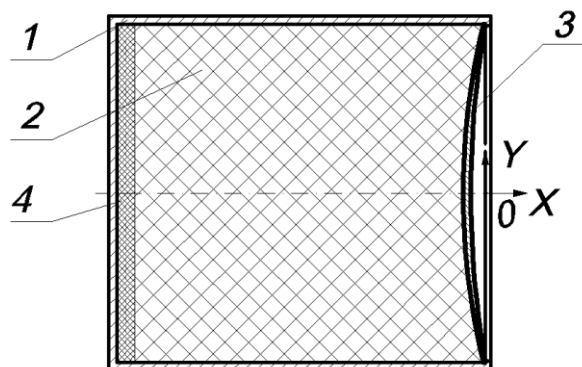


Рис. 1. Расчетная схема СФЗ

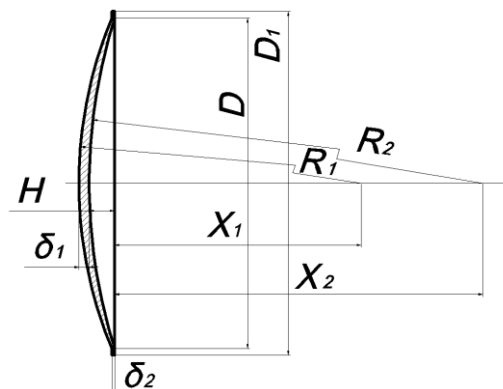


Рис. 2. Параметрическая схема КО

Рассматриваемый процесс может быть описан как в пространственных координатах Эйлера, так и Лагранжа. Недостатком эйлера метода применительно к данной задаче является то, что в процессе своего формирования ПЭ преодолевает расстояние, превышающее несколько диаметров (калибров) заряда. Из этого следует, что эйлера область должна быть построена достаточно длинной, либо же ее необходимо достраивать в процессе выполнения расчетов. Данное обстоятельство влечет за собой определенные технические трудности при выполнении моделирования. Кроме того, при использовании метода Эйлера для получения результатов с достаточной точностью необходимо применять мелкие ячейки расчетной области, что значительно уменьшает скорость расчета. Поэтому, применительно к данной задаче, целесообразным является применение сочетания эйлера и лангражева подходов описания среды, в котором лангранжев метод применяется для расчета КО, а эйлеров – для расчета остальных элементов конструкции заряда [1]. При этом, пропадает необходимость построения протяженной расчетной области, что значительно упрощает выполнение расчетного исследования.

Для описания поведения взаимодействующих материалов принималась идеальная упругопластическая модель среды. Распространение детонации рассматривалось вне общей системы уравнений. При этом фронт ДВ определял границу области, охваченную течением в текущий момент времени. С учетом сделанных допущений система уравнений, описывающая двумерное осесимметричное течение в переменных Эйлера, имеет классический вид [2 – 3].

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\rho v_y}{y} &= 0; \\ \rho \frac{d v_y}{d t} &= \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial D_{xy}}{\partial x} + \frac{D_{xx} + 2D_{yy}}{y}, \quad \rho \frac{d v_x}{d t} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial D_{xy}}{\partial y} + \frac{D_{xy}}{y}; \\ \rho \frac{de}{dt} &= \sigma_{xx} \dot{\varepsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\varepsilon}_{yy} + \sigma_{\theta\theta} \dot{\varepsilon}_{\theta\theta} + 2\sigma_{xy} \dot{\varepsilon}_{xy}; \\ p &= p(\rho, e); \quad \sigma_{ij} = -p g_{ij} + D_{ij}; \\ \dot{\varepsilon}_{yy} &= \frac{\partial v_y}{\partial y}, \quad \dot{\varepsilon}_{\theta\theta} = \frac{v_y}{y}, \quad \dot{\varepsilon}_{xx} = \frac{\partial v_x}{\partial x}, \quad \dot{\varepsilon}_{xy} = \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x}; \\ \frac{D D_{yy}}{D t} &= 2G \left(\dot{\varepsilon}_{yy} + \frac{1}{3\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt} \right), \quad \frac{D D_{xx}}{D t} = 2G \left(\dot{\varepsilon}_{xx} + \frac{1}{3\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt} \right), \quad \frac{D D_{xy}}{D t} = G(\dot{\varepsilon}_{xy}); \\ f &= 2 \cdot (D_{xx}^2 + D_{xy}^2 + D_{yy}^2 + D_{xx} \cdot D_{yy}) \leq \frac{2}{3} \sigma_T^2. \end{aligned}$$

Здесь ρ – плотность; p – давление; e – удельная внутренняя энергия; t – текущее время; x, y – осевая и радиальная координаты; v_x, v_y – компоненты вектора скорости; g_{ij} – метрические коэффициенты основного базиса выбранной системы координат, причем $i, j = x, \theta, y$; $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{\theta\theta}$ – нормальные напряжения в осевом, радиальном и тангенциальном направлениях; σ_{xy} – касательные напряжения; D_{ij} – компоненты девиатора напряжений; $\dot{\varepsilon}_{ij}$ – компоненты тензора скоростей деформаций; $D(\dots)/Dt$ – производная в смысле Яуманна; G – модуль сдвига; σ_T – динамический предел текучести среды. В приведенной системе уравнений в порядке следования представлены законы сохранения массы, импульса и энергии, в общем виде уравнения состояния взаимодействующих сред (КО, ВВ, продуктов детонации (ПД), воздуха и преграды), взаимосвязь компонентов тензора полных напряжений с шаровой и девиаторной составляющими, кинематические соотношения, физические соотношения в виде закона Гука в дифференциальной форме и условия пластического течения Мизеса.

Для описания формирования ПЭ использовались критерии откольной прочности $\sigma_i = \sigma_p^*$ (σ_i – интенсивность напряжений, σ_p^* – откольная прочность) и деформационный критерий Смирнова-Аляева $\varepsilon_i = \varepsilon_p^*$ ($\varepsilon_p^* = 2 \ln(1/(1-\psi))$) – предельная пластическая деформация, ψ – относительное сужение материала (равно 0.75 для стали 11ЮА и тантала высокой чистоты) [4].

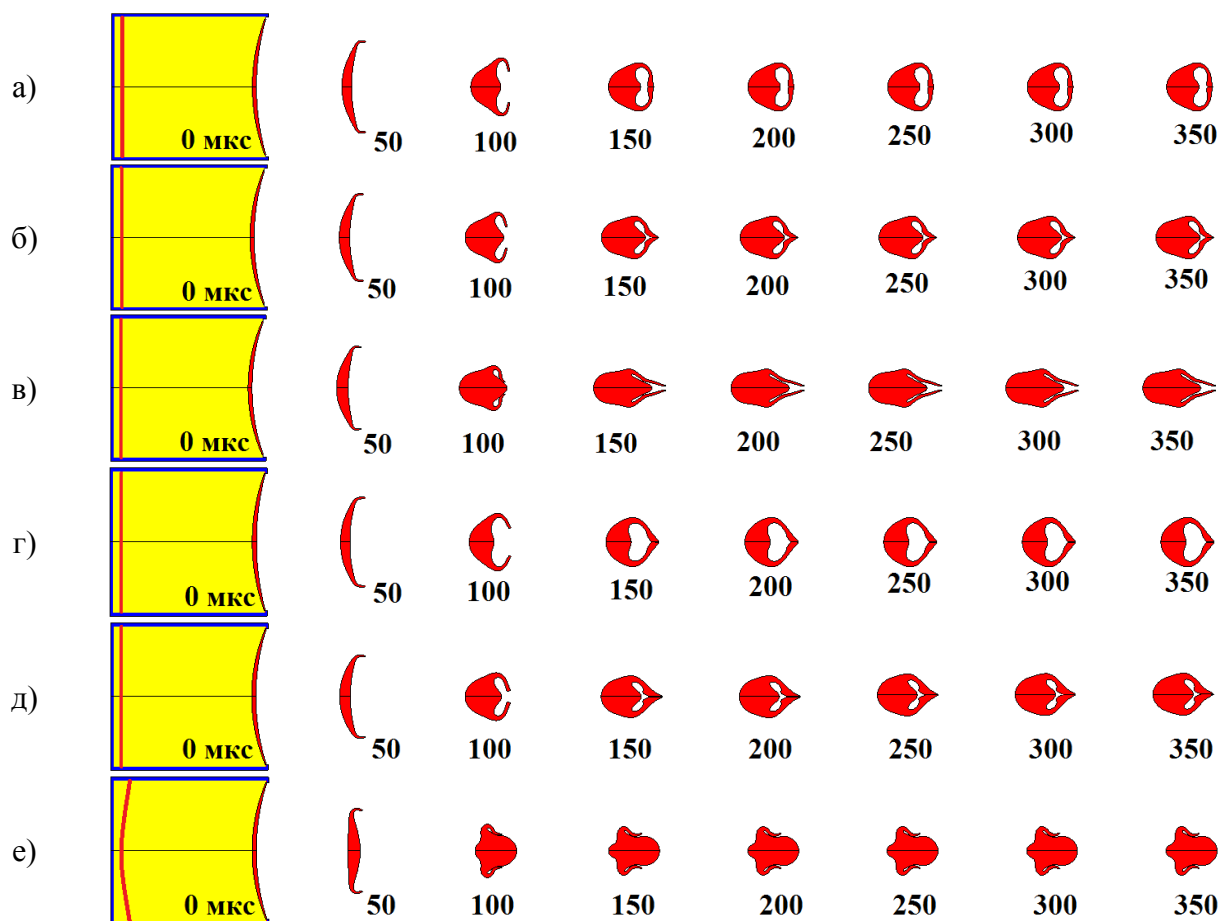


Рис. 3. Результаты расчетов

В качестве уравнений состояния для всех рассматриваемых материалов за исключением воздуха использовались либо линейная зависимость вида $p = K \cdot (\rho/\rho_0 - 1)$, либо ударная адиабата вида $D_\Phi = a + bv$, позволяющая вычислить давление в ударно сжатом веществе посредством задания констант a и b [2]. Здесь K – модуль объемного сжатия вещества, D_Φ , a – скорости ударной волны и звука в материале, b – коэффициент сжимаемости, v – массовая скорость за фронтом ударной волны. Для воздуха использовалось уравнение состояния совершенного газа с постоянным показателем адиабаты равным 1.4. При этом удельная внутренняя энергия подбиралась таким образом, чтобы давление в воздухе при его начальной плотности соответствовало атмосферному давлению.

В качестве ВВ использовался состав ОЛД-20 ($\rho_{ВВ} = 1.77 \text{ г/см}^3$, $D = 8.5 \text{ км/с}$, $P_{СЛ} = 32 \text{ ГПа}$), а для ПД — уравнение состояния в форме Джонсона – Уилкинса – Ли (JWL) [2]

$$p = A_{ВВ} \left(1 - \frac{\omega}{r_1 V} \right) \exp(-r_1 V) + B_{ВВ} \left(1 - \frac{\omega}{r_2 V} \right) \exp(-r_2 V) + \frac{\omega}{V} e_v,$$

где $V = \rho_{ВВ}/\rho$ – относительный удельный объем; $A_{ВВ}$, $B_{ВВ}$, r_1 , r_2 , ω – эмпирические коэффициенты, определяемые ВВ; $e_v = e \rho_{ВВ}$.

Граничные условия для рассматриваемой задачи в рамках идеализированной расчетной схемы СФЗ, учитывающей наличие облицовки и наружного корпуса, задавались на

участках поверхностей взаимодействующих сред. На поверхностях КО и корпуса, контактирующих с ПД, накладывались ограничения на скорость движения индивидуальных точек в соответствии с условием непроницаемости:

$$v_i^{(КО)} n^i = v_i^{(ПД)} n^i, v_i^{(корп)} n^i = v_i^{(ПД)} n^i,$$

а также на напряженное состояние, реализующееся в этих точках в соответствии с третьим законом Ньютона:

$$\sigma_{ij}^{(КО)} n^j = p_{ni}^{(ПД)}, \sigma_{ij}^{(корп)} n^j = p_{ni}^{(ПД)}.$$

Физико-механические характеристики тантала высокой чистоты принимались следующими – $\rho = 16.69$, $K = 211.1$, $G = 70.4$, $\sigma_T = 0.95$, $\sigma_p^* = 4.4$, $\varepsilon_p^* = 2.75$.

Начальные условия конкретной задачи задавались распределением параметров ρ , p , v_x и v_y в поле течения. Компоненты напряжений принимались равными нулю. Для получения более полной информации о процессе формирования элемента КО маркировалась реперными точками (маркерами), в которых дополнительно вычислялись параметры текущего состояния среды.

На рис. 2 представлена параметрическая схема используемой КО, на которой введены следующие обозначения: H – прогиб; δ_1 , δ_2 – толщина у вершины и основания; R_1 , R_2 – внешний и внутренний радиусы; D , D_1 – внутренний и наружный диаметры облицовки.

На рис. 3 представлены результаты математического моделирования процесса, соответствующие формированию компактного ПЭ. При этом геометрические параметры облицовки и форма фронта ДВ, соответствующие каждому отдельному варианту расчет, представлены в таблице.

№ п/п, индекс рис. 3	Фронт ДВ	H , мм	δ_1 , мм	δ_2 , мм	R_1 , мм	R_2 , мм	D , мм
1, а	плоский	9	4	0.8	174	226	128
2, б	плоский	10	4	0.8	160	204	128
3, в	плоский	11	4	0.8	150	175	128
4, г	плоский	8	4	1.0	178	240	124
5, д	плоский	10	4	1.0	160	205	124
6, е	сходящийся	10	4	1.0	160	205	124

Как видно из представленных расчетов, все полученные ПЭ имеют достаточно компактную форму. Наиболее успешным вариантом, по мнению авторов, можно считать вариант исполнения заряда и соответствующий ему элемент, представленный на рис. 3, е. В этом случае осевая массовая скорость ПЭ составляла ~ 2.6 км/с, а сам элемент имел наиболее компактную форму.

Необходимо отметить также технологичность конструкции выбранного варианта облицовки. Ее достаточно просто изготовить из профилированной заготовки методом штамповки пластичным металлом. Дополнительным преимуществом данной конструкции является возможность использования минимального количества механообрабатывающих операций, что обеспечивает высокий коэффициент использования материала.

Заключение

Таким образом, определены конструктивно-технологические параметры танталовой кумулятивной облицовки, обеспечивающие формирование компактного ПЭ, движущегося со скоростью не менее 2.6 км/с и простую технологию ее изготовления – штамповка из профилированной заготовки пластичным металлом.

Список литературы

1. Нох В.Ф. СЭЛ – совместный эйлеро-лагранжев метод для расчета нестационарных двумерных задач // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С.128-184.
2. Физика взрыва. В 2 т. Т. 2. / Под ред. Л.П. Орленко. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 656 с.
3. Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. Численные методы в задачах физики быстропротекающих процессов: учебник для втузов. 2-е изд., испр. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 520 с.
4. Селиванов В.В. Механика разрушения деформируемого тела: учебник для втузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 420с.