

УДК 539.3

О.В. Иванова, С.А. Зелепугин

## ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ АМПУЛЫ

Численно моделируется процесс взрывного компактирования инертной трехкомпонентной смеси в цилиндрической ампуле сохранения. Поведение смеси описывается с помощью математической модели многокомпонентной среды. Основное внимание уделено моделированию действия продуктов взрыва на ампулу. Подобраны параметры взрывного нагружения цилиндрических ампул сохранения, проведены сравнения с экспериментом.

**Ключевые слова:** взрывное компактирование, модель многокомпонентной среды, численное моделирование.

Современная техника все более нуждается в высокоплотных материалах, но некоторые из них могут не поддаваться обработке традиционными методами – плавлением или статическим сжатием – из-за высоких температур плавления или жесткости. Использование взрывных технологий снимает эти ограничения. Большим преимуществом взрывного компактирования является, прежде всего, высокая и равномерно распределенная плотность получающихся материалов. Эти преимущества обеспечили взрывному компактированию широкое применение, и хотя первые работы были сделаны уже давно, возможности данного метода далеко не исчерпаны [1–3]. Здесь необходимы дальнейшие исследования параметров уплотняемых и упрочняемых материалов и используемых взрывчатых веществ (ВВ).

Для получения высокоплотных однородных материалов необходимо реализовать режим взрывного нагружения, исключаящий нежелательные последствия отраженных ударных волн и волн разрежения. Дополнительная трудность заключается в выборе типа и количества ВВ. Так, в первых опытах для уплотнения использовали ВВ с высокой скоростью детонации, поскольку они развивают и самые высокие давления, что позволяло надеяться и на самые высокие плотности компактируемых материалов [1]. Однако при этом не принималось во внимание, что высокие давления приводят к дополнительному упругому или пластическому сжатию уже спрессованного тела. В результате после прохождения детонационной волны волна разгрузки вызывает резкое увеличение объема. К тому же отраженные друг от друга (как от жесткой стенки) ударные волны достигают поверхности цилиндра, отражаются от нее и движутся обратно к оси образца уже как волны разгрузки. В результате интерференции волн разрежения возникают трещины.

Экспериментальные исследования наряду с численным моделированием таких процессов позволяют в широком диапазоне управлять структурообразованием и создавать принципиально новые материалы с ультрамелкозернистой структурой, градиентные, слоистые и другие материалы, обладающие уникальными свойствами и повышенными эксплуатационными характеристиками.

Цель данной работы заключается в численном моделировании на основе модели многокомпонентной среды взрывного компактирования трехкомпонентной

смеси алюминий – сера – углерод с учетом варьирования толщины слоя ВВ в осевом направлении.

### Система уравнений, описывающая поведение инертных многокомпонентных сред в условиях динамического нагружения

Система уравнений, описывающая нестационарное адиабатическое движение каждого компонента в некотором фиксированном в пространстве объеме прочной сжимаемой смеси  $V$ , ограниченном поверхностью  $S$ , состоит из уравнений неразрывности, движения и энергии [4 – 6]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla \alpha_i \rho_i v_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

$$\alpha_i \rho_i \frac{d_i v_i}{dt} = \nabla \sigma_i + \alpha_i \sum_{j=1}^N \alpha_j R_{ji}, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

$$\alpha_i \rho_i \frac{d_i E_i}{dt} = \sigma_i \varepsilon_i + \alpha_i \sum_{j=1}^N \alpha_j \Phi_{ji}, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

где  $\frac{d_i}{dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + v_i^k \frac{\partial}{\partial x^k}$ .

Здесь  $t$  – время,  $\rho_i$  – истинная плотность  $i$ -го компонента, равная массе  $i$ -го компонента в единице его объема,  $v_i$  – вектор скорости,  $E_i$  – удельная внутренняя энергия,  $\varepsilon_i$  – тензор скоростей деформаций,  $\sigma_i = -P_i \delta_i + S_i$  – тензор напряжений,  $P_i$  – давление,  $S_i$  – девиатор напряжений,  $R_{ji}$  – интенсивность обмена импульсом между  $j$ -м и  $i$ -м компонентами,  $\Phi_{ji}$  – интенсивность обмена энергией между  $j$ -м и  $i$ -м компонентами,  $N$  – число компонентов.

Доли объема смеси, занимаемые каждым компонентом [4]:

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_N = 1, \quad (\alpha_i \geq 0), \quad \alpha_i = \rho_i^* / \rho_i,$$

где  $\rho_i^*$  – приведенная плотность (масса  $i$ -го компонента в единице объема среды).

Моделирование эволюции пористости в материале (как сжатия пор, так и их роста) проводится с помощью кинетической модели активного типа, определяющей непрерывное изменение удельного объема пор, непрерывно изменяющих свойства материала и вызывающих релаксацию напряжений [7]:

$$\frac{dV_{fi}}{dt} = \begin{cases} 0, & \text{если } |P_{si}| \leq P_i^* \text{ или } (P_{si} > P_i^* \text{ и } V_{fi} = 0), \\ -\text{sign}(P_{si}) K_{fi} (|P_{si}| - P_i^*) (V_{2i} + V_{fi}), & \\ \text{если } P_{si} < -P_i^* \text{ или } (P_{si} > P_i^* \text{ и } V_{fi} > 0), \end{cases}$$

где  $P_i^* = P_{ki} V_{1i} / (V_{fi} + V_{1i})$ ,  $P_{si}$  – давление в сплошной (неповрежденной) части компонента  $i$  смеси,  $V_{1i}$ ,  $V_{2i}$ ,  $P_{ki}$ ,  $K_{fi}$  – экспериментально определяемые константы материала компонентов.

При исследовании деформирования многокомпонентных сред необходимо учитывать состояние и реакцию каждого компонента, а также, в отличие от гомогенной смеси, не только смещение внешних границ выделенного объема, но и смещение компонентов внутри выделенного объема смеси. В данной работе условие равенства давлений при взаимодействии компонентов рассматривается как

условие совместного деформирования компонентов в смеси, определяющее их объемные содержания [4]:

$$P = P_i(V_i, E_i) = P_j(V_j, E_j) = \dots = P_N(V_N, E_N).$$

Для вычисления температуры использовались соотношения [5, 8]

$$dT_i = \begin{cases} d(E_i - E_{0xi}) / c_{pi}, & \text{если } T_i < T_{mi}, \\ 0, & \text{если } T_i = T_{mi}, \\ d(E_i - E_{0xi} - \Delta H_{mi}) / c_{pi}, & \text{если } T_i > T_{mi}, \end{cases}$$

где удельная теплоемкость  $c_{pi}$  возрастает линейно с ростом температуры до температуры плавления вещества,  $E_{0xi}$  – «холодная» составляющая удельной внутренней энергии,  $T_{mi}$  – температура плавления и  $\Delta H_{mi}$  – удельная теплота плавления  $i$ -го компонента.

### Моделирование действия продуктов взрыва

Для математического описания процесса взрывного нагружения, помимо знания скорости детонации, необходимо знать зависимость действующего на цилиндрическую ампулу давления продуктов взрыва от времени. В данной работе предполагается, что процесс детонации стационарен, давление продуктов взрыва изменяется (падает) во времени прямолинейно.

При данных предположениях изменение давления можно описать уравнением [9–11]

$$P = P_0 - kt, t = 0 \dots \Delta t,$$

которое является уравнением прямой с угловым коэффициентом  $k$  и начальной ординатой  $P_0$ . Угловой коэффициент этой прямой находится по формуле

$$k = \frac{P_0}{\Delta t}.$$

Тогда окончательный вид уравнения для вычисления давления продуктов взрыва на ампулу принимает вид

$$P = \begin{cases} P_0 - \frac{P_0}{\Delta t} t & \text{при } 0 \leq t < \Delta t, \\ 0 & \text{при } t \geq \Delta t, \end{cases} \quad \Delta t = \frac{\Delta}{c}, \quad c = \frac{D}{2},$$

где  $\Delta$  – толщина слоя ВВ,  $c$  – средняя скорость волны разгрузки (оценка),  $D$  – скорость детонации. В [9–11] подобный подход применялся к моделированию действия продуктов взрыва на цилиндрическую ампулу с реакционноспособным наполнителем. При этом внимание уделялось воздействию ВВ на боковую поверхность ампулы, а возможное влияние осевого слоя, расположенного на верхнем торце ампулы, не рассматривалось.

### Выбор параметров взрывного нагружения цилиндрической ампулы

Численно в осесимметричной постановке рассмотрена задача взрывного компактирования смеси алюминий – сера – графит в стальной цилиндрической ампуле на основе модели многокомпонентной среды. Смесь алюминий – сера разбавлялась инертном (графитом) в пропорции 2/1, где две массовые доли приходятся на графит, а одна – на смесь Al – S, для исключения реакционного взаимодействия

алюминия с серой. Экспериментальные исследования, проведенные в ИГиЛ СО РАН [9–12], показывают, что в рассмотренных условиях нагружения поведение данной смеси близко к инертному. Массовые доли компонентов в образце (смеси) брались следующие: Al – 11,5, S – 21,5, C – 67; объемные доли: Al – 9,55, S – 23,35, C – 67,1. Пористость смеси составила 0,4 (отношение объема пор к общему объему). Высота цилиндрического образца смеси составила 64 мм, диаметр 14 мм. Толщина боковых стенок ампулы – 3 мм, верхней и нижней торцевых крышек – 10 мм. Высота ампулы  $H$  составила 84 мм, внешний диаметр ампулы – 20 мм (рис. 1, а).

Воздействие продуктов детонации взрывчатого вещества, окружающего ампулу, в расчетах моделировалось действием давления на верхний торец ампулы в вертикальном (осевом) направлении и на боковую поверхность ампулы в горизонтальном (радиальном) направлении. В осевом направлении воздействие началось с начального момента процесса, а в радиальном – по мере продвижения фронта детонации сверху вниз [9, 10]. Скорость детонации задавалась  $D = 2,8$  км/с на основе экспериментальных данных [11]. Значение  $P_0$  подбиралось на основе численных и экспериментальных оценок и составило 3,2 ГПа.

В расчетах варьировалась толщина слоя взрывчатого вещества  $\Delta_z$  в осевом направлении, воздействующего на верхний торец ампулы, с целью изучения влияния данного параметра на конечную форму и размеры ампулы. Величина  $\Delta_r$  для ВВ, действующего в радиальном направлении на боковую стенку ампулы, была постоянной и составила 18 мм.

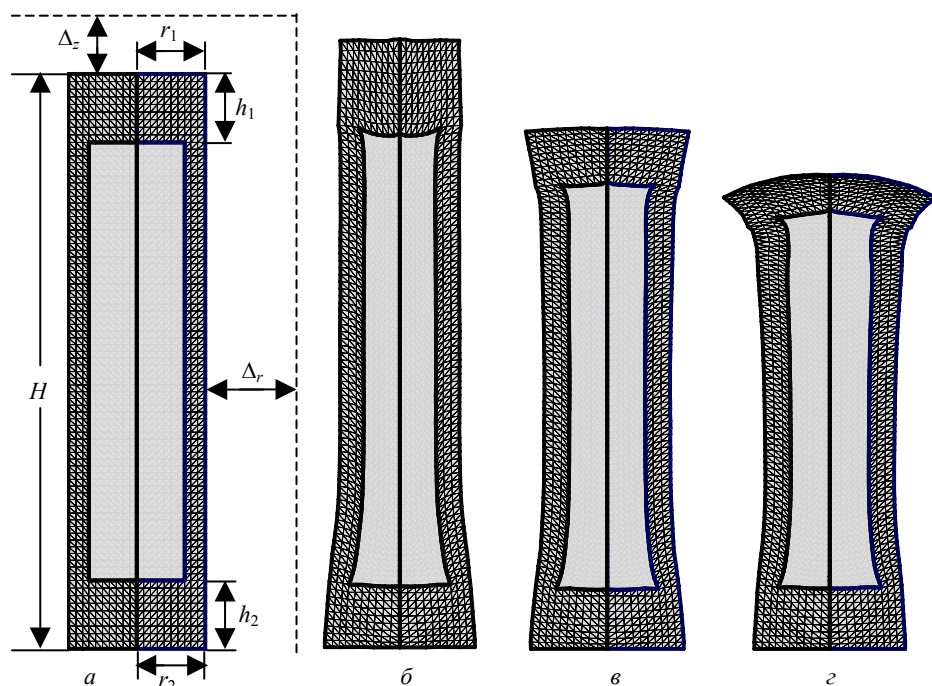


Рис. 1. Взрывное компактирование ампулы при разной толщине осевого слоя ВВ для начального момента времени (а) и для 80 мкс:  $\Delta_z = 5$  мм (б);  $\Delta_z = 30$  мм (в);  $\Delta_z = 40$  мм (г)

На рис. 1, б–г показана динамика процесса взрывного компактирования цилиндрической ампулы с инертной смесью для различных толщин осевого слоя ВВ. Хронограммы процесса представлены для момента времени 80 мкс. Данный момент времени иллюстрирует заключительную стадию процесса взрывного компактирования инертной смеси в цилиндрической ампуле. Результаты расчетов показывают существенное влияние осевого слоя ВВ на итоговый результат взрывного нагружения. При незначительной толщине  $\Delta_z$  влияние боковой нагрузки преобладает, что приводит к растягиванию ампулы в осевом направлении (рис. 1, б). При избыточной величине  $\Delta_z$  имеет место дополнительная нагрузка на верхнюю область ампулы, что вызывает деформацию верхней крышки ампулы (сжатие в осевом направлении и растяжение – в радиальном) и части смеси. Анализируя рис. 1, можно сделать вывод, что для положительного результата процесса компактирования необходимо подбирать ряд параметров взрывного нагружения. Важным является выбор ВВ и его толщина. Недостаточная толщина ВВ, также как и избыточная, приведут к неудовлетворительным результатам взрывного компактирования, а именно, к недостаточно уплотненному конечному продукту либо к трещинам или его разрушению. Кроме того, избыточная толщина слоя ВВ в осевом направлении сильно искажает форму ампулы в процессе взрывного компактирования (рис. 1, г).

В таблице представлены результаты численных расчетов для нагружаемой цилиндрической ампулы с инертной смесью алюминий – сера – углерод при изменении толщины слоя ВВ в осевом направлении. Здесь  $\Delta_z$  – толщина осевого слоя,  $H$  – высота ампулы после нагружения,  $h_1$ ,  $r_1$  и  $h_2$ ,  $r_2$  – соответственно высота и радиус верхней и нижней крышек ампулы.

Результаты расчетов

| № | $\Delta_z$ , мм | $H$ , мм | $h_1$ , мм | $h_2$ , мм | $r_1$ , мм | $r_2$ , мм |
|---|-----------------|----------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 0               | 92,8     | 17,2       | 9          | 7,6        | 11,1       |
| 2 | 5               | 89       | 13,9       | 9          | 8,8        | 11,1       |
| 3 | 10              | 85,4     | 11,9       | 9          | 9,8        | 11,1       |
| 4 | 15              | 83,2     | 10,8       | 8,9        | 10,3       | 11,1       |
| 5 | 20              | 80,9     | 10         | 8,9        | 10,5       | 11,1       |
| 6 | 25              | 78,6     | 9,3        | 8,7        | 11         | 11,2       |
| 7 | 30              | 76,1     | 8,2        | 8,7        | 11,9       | 11,2       |
| 8 | 35              | 73,2     | 6,9        | 8,8        | 13,4       | 11,1       |
| 9 | 40              | 69,6     | 5,5        | 8,9        | 15,4       | 11         |

На рис. 2 и 3 представлены графики изменения параметров ампулы с инертной смесью, подвергаемой взрывному компактированию, в зависимости от толщины осевого слоя ВВ. Данные графики представлены для момента времени 80 мкс после начала процесса компактирования. Расчеты показывают, что волновые и деформационные процессы к данному моменту времени в целом завершаются, и полученные данные можно рассматривать как конечные после нагружения.

Результаты расчетов показывают, что изменение толщины слоя  $\Delta_z$  в диапазоне 0÷13 мм не достаточно для компактирования ампулы в осевом направлении и приводит к росту конечной высоты ампулы. Кроме того, наблюдается рост высоты верхней крышки ампулы (рис. 2, кривая 1). При увеличении осевого слоя ВВ  $\Delta_z$  проявляется тенденция к уменьшению конечной высоты ампулы и, как следствие, дополнительному компактированию смеси в осевом направлении. Использо-

вание толщины слоя ВВ  $\Delta_z$  в диапазоне 35÷40 мм приводит к сильному искажению формы ампулы, в частности ее верхней крышки и смеси в этой области. Параметры ампулы, полученные для толщины слоя ВВ  $\Delta_z = 30$  мм, хорошо согласуются с экспериментальными данными [9–12]. Результаты численных расчетов показали, что в данном случае степень компактирования пористого образца смеси составила примерно 0,97. Параметры нижней крышки ампулы изменяются незначительно для всех рассмотренных случаев.

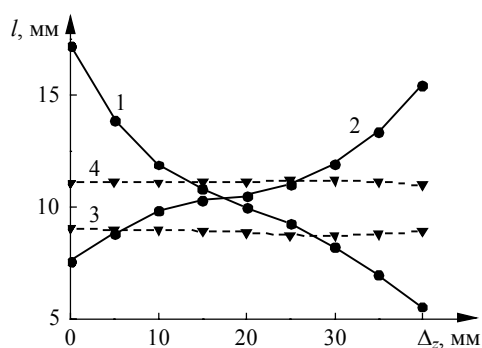


Рис. 2. Изменение высоты и радиуса крышек ампулы в зависимости от толщины осевого слоя ВВ: кр. 1, 2 — высота и радиус верхней крышки ампулы; кр. 3, 4 — высота и радиус нижней крышки ампулы

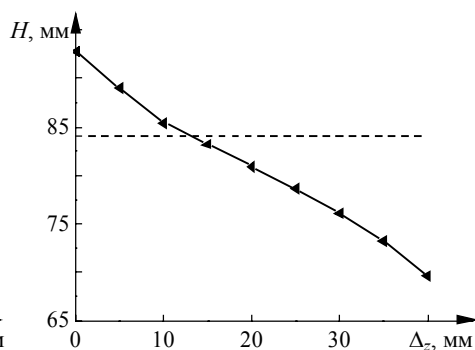


Рис. 3. Изменение высоты ампулы после нагружения в зависимости от толщины осевого слоя ВВ. Штриховая линия — начальное значение высоты ампулы

### Заключение

Численно в осесимметричной постановке исследован процесс взрывного компактирования инертной трехкомпонентной смеси алюминий – сера – углерод в цилиндрической ампуле сохранения, с учетом влияния начальной толщины слоя ВВ в осевом направлении.

Установлено существенное влияние толщины рассматриваемого слоя ВВ на конечный результат взрывного компактирования. Недостаточная толщина слоя ВВ, также как и избыточная, могут являться причиной недостаточно уплотненного конечного продукта либо привести к образованию трещин или его разрушению.

Подобраны значения параметров взрывного нагружения (толщина осевого слоя при фиксированной толщине бокового слоя ВВ), при которых результаты численных расчетов соответствуют экспериментам.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Прюммер Р. Обработка порошковых материалов взрывом. М.: Мир, 1990. 128 с.
2. Селиванов В.В., Новиков С.А., Кобылкин И.Ф. Взрывные технологии. М.: МГТУ им. Баумана, 2008. 648 с.
3. Даниленко В.В. Взрыв: физика, техника, технология. М.: Энергоатомиздат, 2010. 784 с.
4. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
5. Иванова О.В., Зелепугин С.А. Многокомпонентная модель среды для численного моделирования ударно-волнового воздействия на реагирующие пористые смеси // Изв. вузов. Физика. 2008. Т. 51. № 8/2. С. 180–189.

6. Куропатенко В.Ф. Обмен импульсом и энергией в неравновесных многокомпонентных средах // ПМТФ. 2005. Т. 46. № 1. С. 7–15.
7. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортков В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996. 446 с.
8. Зелепугин С.А., Никуличев В.Б. Численное моделирование взаимодействия серы и алюминия при ударно-волновом нагружении // ФГВ. 2000. Т. 36. № 6. С. 186–191.
9. Зелепугин С.А., Иванова О.В., Юношев А.С., Сильвестров В.В. Развитие реакции синтеза сульфида алюминия при взрывном нагружении цилиндрической ампулы // Докл. РАН. 2010. Т. 434. № 5. С. 643–647.
10. Иванова О.В., Зелепугин С.А., Юношев А.С., Сильвестров В.В. Экспериментально – теоретическое определение параметров взрывного нагружения цилиндрической ампулы // Изв. вузов. Физика. 2009. Т.52. № 7/2. С. 115–121.
11. Ivanova O.V., Zelepugin S.A., Yunoshev A.S., Silvestrov V.V. A multicomponent medium model for reacting porous mixtures under shock wave loading // J. Energ. Materials. 2010. V. 28. Iss. S1. P. 303–317.
12. Зелепугин С.А., Долгобородов А.Ю., Иванова О.В., Зелепугин А.С. Ударно-волновой синтез в твердых смесях. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2012. 230 с.

Статья поступила 08.07.2013 г.

*Ivanova O. V., Zelepugin S.A. SELECTION OF PARAMETERS FOR EXPLOSIVE LOADING OF CYLINDRICAL AMPOULES. We numerically simulate explosive compaction of an inert three-component mixture in a cylindrical conservation ampoule. The behavior of the mixture is described by a mathematical model of a multi-component medium. The attention is focused on simulating the action of explosion products on the ampoule. Parameters for explosive loading of cylindrical conservation ampoules were selected and the results were compared with the experiment.*

Keywords: explosive compaction, model of a multicomponent medium, numerical simulation

*Ivanova Oksana Vladimirovna* (Department for Structural Macrokinetics TSC SB RAS)  
E-mail: bliz3@yandex.ru

*Zelepugin Sergey Alekseevich* (Department for Structural Macrokinetics TSC SB RAS, Tomsk State University)  
E-mail: szel@dsm.tsc.ru