

МЕХАНИКА

УДК: 539.3

О.В. Иванова, С.А. Зелепугин

УСЛОВИЕ СОВМЕСТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ
КОМПОНЕНТОВ СМЕСИ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ
КОМПАКТИРОВАНИИ¹

Численно исследовано поведение пористой смеси, помещенной в цилиндрическую ампулу сохранения, в условиях ударно-волнового нагружения на основе многокомпонентной модели среды. В качестве условия совместного деформирования компонентов выбрано равенство давлений компонентов смеси. Определены оптимальные параметры получения максимальной плотности конечных продуктов.

Ключевые слова: компактирование, многокомпонентная среда, численное моделирование.

При исследовании деформирования среды в рамках многокомпонентной модели необходимо учитывать состояние и реакцию каждого компонента, а также, в отличие от однокомпонентной смеси, не только смещение внешних границ выделенного объема, но и смещение компонентов внутри выделенного объема смеси. Смещение компонентов внутри объема зависит как от свойств, так и от структуры компонентов смеси. Поэтому в теории движения многокомпонентной среды должны учитываться условия совместного поведения или деформирования компонентов, которые кроме физических свойств компонентов в общем случае должны учитывать их структуру [1]. Следует заметить, что эффекты прочности твердых компонентов существенно усложняют указанные условия, которые должны учитывать в этом случае и различие упругопластических свойств компонентов смеси.

Цель данной работы заключается в выборе и адаптации условия совместного деформирования компонентов смеси и в определении оптимальных параметров ударно-волнового компактирования с точки зрения обеспечения максимальной плотности смеси после обработки в рамках модели многокомпонентной среды.

Для численного моделирования адиабатического движения каждого i -го компонента в некотором фиксированном в пространстве объеме V прочной сжимаемой смеси из N компонент используется система уравнений, состоящая из уравнений неразрывности, движения и энергии, с учетом соответствующего обмена массой, импульсом и энергией между компонентами внутри объема V [1 – 3]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla \alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i = \sum_{j=1}^N J_{ji}; \quad (1)$$

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 07-08-00037-а, 08-08-12055-р-офи).

$$\alpha_i \rho_i \frac{d_i \mathbf{v}_i}{dt} = \nabla \alpha_i \sigma_i + \alpha_i \sum_{j=1}^N \alpha_j \mathbf{R}_{ji}; \quad (2)$$

$$\alpha_i \rho_i \frac{d_i E_i}{dt} = \alpha_i \sigma_i \varepsilon_i + \alpha_i \sum_{j=1}^N \alpha_j \Phi_{ji}, \quad \text{где } \frac{d_i}{dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + v_i^k \frac{\partial}{\partial x^k}. \quad (3)$$

Здесь t – время; ρ_i – истинная плотность i -го компонента ($i = 1, 2, \dots, N$), равная массе i -го компонента в единице объема i -го компонента; \mathbf{v}_i – вектор скорости; E_i – удельная внутренняя энергия; ε_i – тензор скоростей деформаций; $\sigma_{ij} = -(P_i + Q_i)\delta_{ij} + S_{ij}$ – компоненты тензора напряжений; P_i – давление; Q_i – искусственная вязкость; S_{ij} – компоненты деватора напряжений; J_{ji} – интенсивность перехода массы из j -го в i -й компонент; \mathbf{R}_{ji} – интенсивность обмена импульсом между j -м и i -м компонентами; Φ_{ji} – интенсивность обмена энергией между j -м и i -м компонентами.

Для определения доли объема смеси, занимаемой каждым компонентом, используется параметр $\alpha_i \geq 0$ [1]:

$$\alpha_i = \rho_i^* / \rho_i, \quad (4)$$

где ρ_i^* – приведенная плотность (масса i -го компонента в единице объема среды V), причем

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_N = 1. \quad (5)$$

Компоненты смеси взаимодействуют друг с другом, обмениваясь количеством движения \mathbf{R}_{ji} , энергией Φ_{ji} и при наличии химических реакций – массой J_{ji} в рамках многокомпонентной модели среды [1, 4].

Давление в неповрежденной части i -го компонента смеси является функцией удельного объема, удельной внутренней энергии, удельного объема пор и во всем диапазоне условий нагружения определяется с помощью уравнения состояния типа Ми – Грюнайзена [5]:

$$P_i = \rho_{0_i} u_{c_i}^2 \mu_i + \rho_{0_i} u_{c_i}^2 [1 - \gamma_{0_i} / 2 + 2(b_i - 1)] \mu_i^2 + \rho_{0_i} u_{c_i}^2 [2(1 - \gamma_{0_i} / 2)(b_i - 1) + 3(b_i - 1)^2] \mu_i^3 + \gamma_{0_i} \rho_{0_i} E_i, \quad (6)$$

где $\mu_i = V_{0_i} / (V_i - V_{f_i}) - 1$; γ_{0_i} – коэффициент Грюнайзена; V_{0_i} и V_i – начальный и текущий удельные объемы компонента; u_{c_i} и b_i – константы ударной адиабаты Гюгионо, описываемой линейным соотношением [2]:

$$u_{s_i} = u_{c_i} + b_i u_{p_i},$$

где u_{s_i} – скорость ударной волны, u_{p_i} – массовая скорость компонента за фронтом ударной волны.

В данной работе рассматривается распространение ударных волн, приводящих к фазовым переходам в твердых компонентах смеси, что в свою очередь приводит к тому, что прочность материала, хотя и растет с давлением, ограничена, и при высоких давлениях свойства твердого тела в некоторых отношениях приближаются к свойствам жидкости. Кроме того, сжимаемости, истинные плотности и те-

плотности твердых компонентов достаточно близки, что уменьшает эффекты различия давлений в компонентах. В таком случае, равновесное состояние, к которому каждый раз переходит смесь, в первую очередь определяется условием равенства давлений компонентов, которые в свою очередь определяются удельным объемом и удельной внутренней энергией компонентов смеси. Указанные обстоятельства позволяют воспользоваться условием равенства давлений при взаимодействии компонентов в качестве условия совместного деформирования компонентов в смеси:

$$P = P_1(V_1, E_1) = P_2(V_2, E_2) = \dots = P_N(V_N, E_N). \quad (7)$$

Равенство (7) является условием совместного поведения (деформирования) компонентов, достаточным для определения их объемного содержания α_i .

Для достижения механического равновесия в компонентах смеси используется подход, предложенный в [6]. В данном случае необходимо найти новое давление, общее для всех компонентов, так чтобы механическое равновесие достигалось на каждом расчетном шаге и при выполнении условия (5). Такое механическое равновесие может быть достигнуто при решении следующей системы уравнений:

$$P = P_i + \Delta P_i = P_i - \frac{K_i}{\alpha_i} \Delta \alpha_i; \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N \Delta \alpha_i = 0, \quad (9)$$

где $K_i = \alpha_i \rho_i c_i^2$ – модуль объемного сжатия; c_i – объемная скорость звука.

Значение изменения объемной доли $\Delta \alpha_i$ компонентов находится из следующих уравнений:

$$P = \sum_{i=1}^N \frac{\alpha_i P_i}{K_i} \Big/ \sum_{i=1}^N \frac{\alpha_i}{K_i}; \quad (10)$$

$$\Delta \alpha_i = \frac{\alpha_i}{K_i} (P_i - P). \quad (11)$$

В результате выравнивания давлений компонентов следует найти новое значение внутренней энергии E_i :

$$\alpha_i \rho_i E_i = \alpha_i \rho_i E_i - P \Delta \alpha_i. \quad (12)$$

Для выполнения сохранения массы смеси необходимо получить новое значение плотности:

$$\rho_i = \frac{\alpha_i \rho_i}{\alpha_i + \Delta \alpha_i}, \quad (13)$$

что в свою очередь, используя условие (4), позволяет определить новые объемные содержания компонентов α_i .

Ввиду малой длительности процесса сделано предположение, что за период межфазного взаимодействия компонентов отсутствует необходимость пересчета тепловой части E_i в уравнении состояния. Все уравнения применяются итерационно, при соответственном оценивании уравнения состояния для определения давления и модуля объемного сжатия каждого компонента.

В данной работе в осесимметричной постановке в рамках лагранжева подхода была рассмотрена задача динамического взаимодействия стального ударника (полого цилиндра), метаемого скользящей детонацией взрывчатого вещества (ВВ), с цилиндрической ампулой, содержащей образец – прессованную пористую смесь алюминий (Al) – сера (S). Пористость смеси β варьировалась в пределах 0,2 – 0,4. Состав смеси представлял собой 0,65 массовых долей серы и 0,35 массовых долей алюминия. Высота цилиндрического образца 27 мм, диаметр 16 мм. Внутренний диаметр ударника 36 мм, толщина стенок 4 мм. Толщина торцевых стенок ампулы – 1,5 мм, толщина боковых стенок ампулы Δh в расчетах варьировалась от 2 до 4 мм. Действие окружающего ударник ВВ в расчетах моделировалось заданием горизонтальному слою материала ударника с координатой $z = -D_0 t$ скорости v_0 по мере продвижения фронта детонации со скоростью $D_0 = 2,5$ км/с. Скорость ударника варьировалась в пределах 600 – 1200 м/с. Численные расчеты выполнены методом конечных элементов. Константы материалов можно найти в [3].

На рис. 1 представлены графики изменения давлений в компонентах в центре прессуемой смеси без учета совместного деформирования компонентов в зависимости от времени при начальном значении пористости 0,4 и скорости ударника $v_0 = 800$ м/с. Результаты расчетов показали неравновесность давлений и других параметров компонентов смеси из-за различных свойств материалов. Один из компонентов (Al) имеет достаточно большие пиковые давления по сравнению с другим компонентом (S). В первом случае максимальное значение давления составило 12,8 ГПа, во втором – 2,9 ГПа

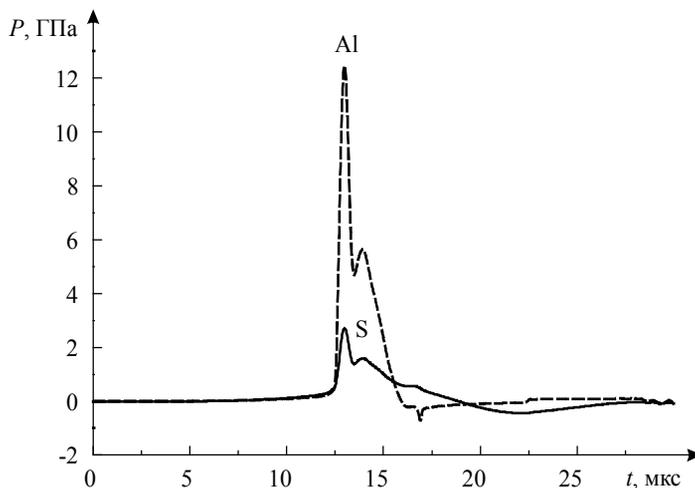


Рис. 1. Несогласованные давления в компонентах смеси в центре ампулы. Начальная скорость ударника $v_0 = 800$ м/с, начальная пористость смеси $\beta_0 = 0,4$, толщина стенки ампулы $\Delta h = 2$ мм.

На рис. 2 представлены графики изменения давлений в компонентах в центре прессуемой смеси с учетом совместного деформирования компонентов в зависимости от времени при варьировании скоростей ударника и начальном значении пористости компонентов 0,4 и толщине стенки ампулы 2 мм. Сравнивая пиковые значения давлений компонентов на кривых 1 ($P_{\max} = 13,2$ ГПа), 2 ($P_{\max} = 7,1$ ГПа),

и 3 ($P_{\max} = 3,8$ ГПа), очевидно, что увеличение скорости ударника приводит к более высоким давлениям в прессуемых компонентах.

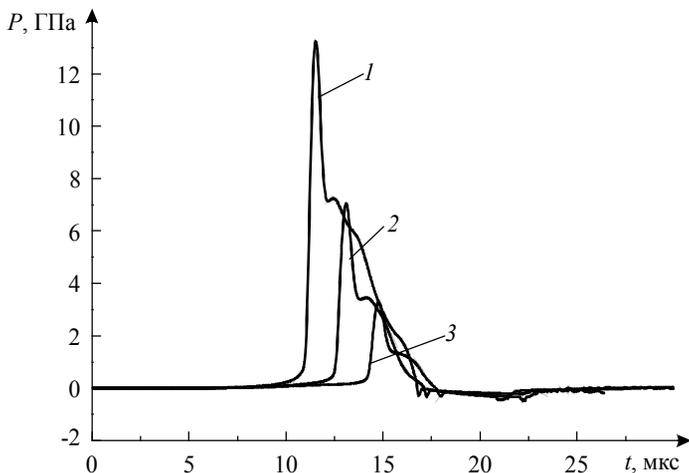


Рис. 2. Согласованное давление в компонентах смеси в центре ампулы для различных начальных скоростей ударника: 1 – $v_0 = 1200$ м/с; 2 – $v_0 = 800$ м/с; 3 – $v_0 = 600$ м/с. Для всех вариантов: $\beta_0 = 0,4$, $\Delta h = 2$ мм

На рис. 3 представлены графики изменения удельного объема пор в центре прессуемых компонентов в зависимости от времени для начальной скорости ударника 1200 м/с и значения пористости компонентов 0,4. Толщина стенки ампулы – 2 мм. Результаты расчета показывают, что компоненты одновременно достигают нулевой пористости к моменту времени процесса 10 мкс. После стадии схлопывания у обоих компонентов наблюдается последующий рост пористости,

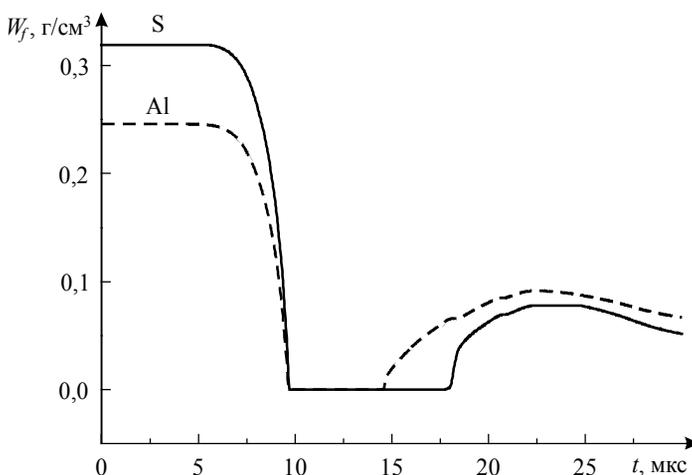


Рис. 3. Изменение пористости компонентов смеси во времени в центре ампулы: $v_0 = 1200$ м/с, $\beta_0 = 0,4$, $\Delta h = 2$ мм

вызванный интенсивной разгрузкой, что наблюдается и в эксперименте [7]. Стоит отметить, что в первую очередь поры растут в Al.

На рис. 4 представлены графики изменения истинных плотностей компонентов в зависимости от времени для начальной скорости ударника 1200 м/с и значения пористости компонентов 0,4. Толщина стенки ампулы – 2 мм. Пики плотностей компонентов наблюдаются в моменты полного схлопывания пор компонентов и соответствуют пикам на кривых давлений. Но после завершения процесса ударно-волнового нагружения значения плотностей конечных продуктов не намного выше значений исходных плотностей компонентов смеси и заметно ниже значений плотностей в беспористом состоянии (линии 1, 2 на рис. 4).

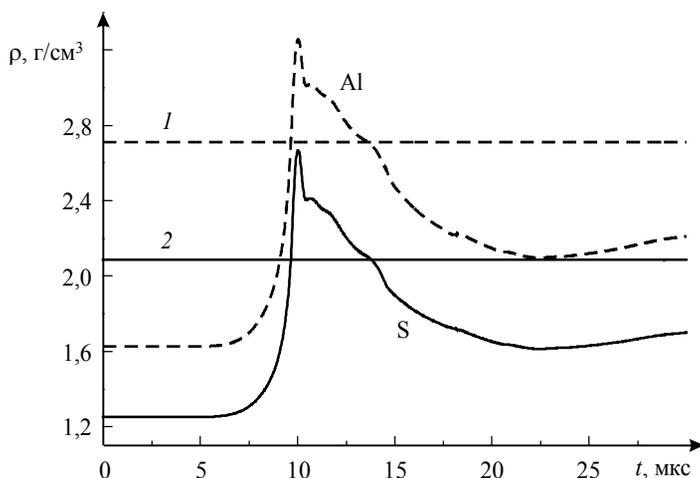


Рис. 4. Изменение истинной плотности компонентов смеси во времени в центре ампулы: $v_0 = 1200$ м/с, $\beta_0 = 0,4$, $\Delta h = 2$ мм. 1 – плотность монолитного алюминия ($2,71$ г/см³); 2 – плотность монолитной серы ($2,085$ г/см³)

На рис. 5 представлены значения согласованных давлений в смеси с учетом совместного деформирования компонентов в зависимости от времени при варьировании начальных скоростей ударника. Начальное значение пористости компонентов 0,4, толщина стенки ампулы – 4 мм. При сравнении с рис. 2 очевидно, что увеличение толщины стенки ампулы приводит к понижению давления в прессуемых компонентах (кривая 1 – $P_{\max} = 11,3$ ГПа; 2 – $P_{\max} = 4,2$ ГПа; 3 – $P_{\max} = 0,4$ ГПа на рис. 5).

На рис. 6 представлены графики изменения истинных плотностей компонентов в зависимости от времени при начальной скорости ударника 600 м/с, значении пористости компонентов 0,4 и варьировании толщины стенки ампулы. Пики плотностей соответствуют моментам полного схлопывания пор компонентов, а также пикам на кривых давления. Анализ численных результатов показывает, что для скорости ударника 600 м/с и пористости компонентов 0,4 при увеличении толщины стенки ампулы пиковые значения плотностей уменьшаются как у Al, так и у S, что в свою очередь вызвано понижением максимальных давлений (рис. 5). Но после завершения процесса ударно-волнового нагружения более высокие плотности наблюдаются у компонентов при большей толщине стенки ампулы.

Очевидно, что для каждого уплотняемого материала существуют оптимальные параметры процесса динамического компактирования, которые обеспечивают максимальную плотность конечного продукта.

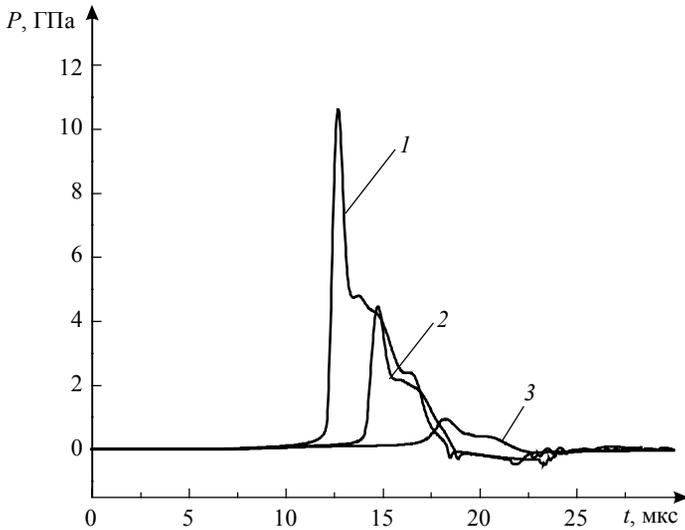


Рис. 5. Согласованное давление в компонентах смеси в центре ампулы для различных начальных скоростей ударника: 1 – $v_0 = 1200$ м/с; 2 – $v_0 = 800$ м/с; 3 – $v_0 = 600$ м/с. Для всех вариантов: $\beta_0 = 0,4$, $\Delta h = 4$ мм

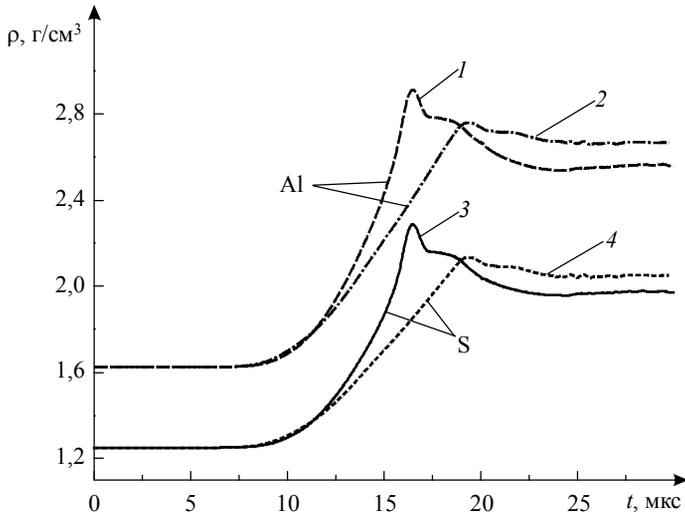


Рис. 6. Изменение истинной плотности компонентов смеси во времени в центре ампулы для начальной скорости удара 600 м/с и пористости 0,4. Кр. 1, 3 соответствуют толщине стенки ампулы $\Delta h = 2$ мм; 2, 4 – 4 мм

Заключение

Численно исследовано поведение пористой смеси Al–S, помещенной в цилиндрическую ампулу, в условиях ударно-волнового нагружения на основе многокомпонентной модели среды. В качестве совместного условия деформирования компонентов выбрано условие равенства давлений компонентов смеси.

Выявлено, что малопрочный компонент (сера) и более прочный компонент (алюминий) достигают нулевой пористости в одно и то же время, но в дальнейшем, на стадии действия растягивающих напряжений, поры растут в первую очередь в более прочном компоненте.

Увеличение скорости ударника и соответственно давлений и температур обязательно приводит к увеличению плотностей конечных продуктов и может являться причиной для образования полостей на стадии разгрузки в материалах.

Самая максимальная плотность смеси после компактирования в исследованных условиях наблюдалась для скорости ударника 800 м/с, толщины стенки ампулы 4 мм и начальной пористости компонентов 0,2. При начальной пористости компонентов 0,4 максимальная плотность достигается для скорости ударника 600 м/с и толщине стенки ампулы 4 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. Ч.1. М.: Наука, 1987. 464 с.
2. *Физика взрыва* / Под ред. Л.П. Орленко. М.: Физматлит, 2002. 1488 с.
3. *Зелепугин С.А., Никуличев В.Б., Иванова О.В.* Моделирование твердофазных химических превращений в пористых смесях при ударно-волновом нагружении // Горение и плазмохимия. 2005. Т. 3. № 3. С. 235 – 245.
4. *Иванова О.В., Зелепугин С.А.* Многокомпонентная модель среды для численного моделирования ударно-волнового воздействия на реагирующие пористые смеси // Изв. вузов. Физика. 2008. № 9. С. 141 – 150.
5. *Gust W.H.* High impact deformation of metal cylinders at elevated temperatures // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. N. 5. P. 3566 – 3575.
6. *Miller G.H., Puckett E.G.* A high-order Godunov Method for multiple condensed phases // J. Comp. Phys. 1996. V. 128. No. 200. P. 134 – 164.
7. *Прюммер Р.* Обработка порошковых материалов взрывом. М.: Мир, 1990. 128 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

ИВАНОВА Оксана Владимировна – младший научный сотрудник Отдела структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН. E-mail: bliz3@yandex.ru

ЗЕЛЕПУГИН Сергей Алексеевич – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Отдела структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН. E-mail: szel@dsm.tsc.ru

Статья принята в печать 22.12.2008 г.