

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СНАРЯДОВ ЗАПОЛНЕННЫХ ПОРОШКОВЫМИ РЕАГЕНТАМИ

В.А. ГЛАЗЫРИН, В.А. ГОРЕЛЬСКИЙ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия
e-mail: glazyrin@mail2000.ru, gorelski@ismtb.tomsk.su

Большое значение приобретает численное моделирование реакций синтеза неорганических соединений при ударно-волновом воздействии на смесь исходных компонентов. Численное моделирование позволяет детально интерпретировать экспериментальные данные и прогнозировать поведение реагирующих компонентов при таких интенсивностях ударно-волнового воздействия, которые пока не доступны для прямого исследования экспериментальными методами. В данной работе рассмотрен пример реакции синтеза дисилицида титана из простых веществ.

В расчетах использовались следующие геометрические размеры устройства сохранения: длина снаряда – 10,9 мм, диаметр – 10,9 мм. При расчетах полагали, что скорость химического превращения является постоянной величиной и что реакция протекает, если давление в смеси превышает 350 кБар или температура достигает температуры плавления кремния.

В работе используется модель химически активной среды, характеризующаяся наличием микро полостей (пор, трещин). Общий объем среды W составляют неповрежденная часть среды, занимающая объем W_c и характеризующаяся плотностью ρ_c и микрополости, занимающие объем W_T , в которых плотность полагается равной нулю. Средняя плотность повреждаемой среды связана с введенными параметрами соотношением $\rho = \rho_c (W_c/W)$. Степень поврежденности среды характеризуется согласно удельным объемом трещин $V_T = W_T/(W\rho)$.

Система уравнений, описывающая нестационарные адиабатические движения химически активной среды с учетом изменяющейся пористости, состоит из уравнений неразрывности, движения, энергии, изменения удельного объема пор и кинетического уравнения химической реакции:

$$\rho dv_i / dt = \sigma_{ij,j}, \quad (1.1)$$

$$\partial\rho/\partial t + \text{div}(\rho v) = 0, \quad (1.2)$$

$$dE / dt = (1/\rho)\sigma_{ij}\epsilon_{ij}, \quad (1.3)$$

$$\frac{dV_T}{dt} = \begin{cases} 0 & \text{при } |P_c| \leq P^* \text{ или } P_c > P^* \text{ и } V_T = 0 \\ -\text{sgn}(P_c)K_4(|P_c| - P^*)(V_2 + V_T) & \\ \text{при } P_c < -P^* \text{ или } P_c > P^* \text{ и } V_T > 0, & \end{cases} \quad (1.4)$$

где ρ — плотность; v_i — компоненты вектора скорости; E — удельная внутренняя энергия; ϵ_{ij} - компоненты тензора скоростей деформаций; $\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + S_{ij}$ — компоненты тензора напряжений; P_c — давление в сплошной компоненте вещества; $P = P_c(\rho/\rho_c)$ — среднее давление; V_1, V_2, P_k, K_4 — экспериментально определяемые константы материала.

Моделирование разрушений проводится с помощью кинетической модели разрушения активного типа, определяющей рост микротрещин, непрерывно изменяющих свойства материала и вызывающих релаксацию напряжений. Давление в неповрежденном веществе является функцией удельного объема, внутренней энергии и удельного объема трещин:

$$P_c = \rho_0 a^2 \mu + \rho_0 a^2 [1 - \gamma_0 / 2 + 2(b - 1)] \mu^2 + \rho_0 a^2 [2(1 - \gamma_0 / 2)(b - 1) + 3(b - 1)^2] \mu^3 + \gamma_0 \rho_0 E$$

$$\mu = V_0 / (V - V_T) - 1,$$

где γ_0 — коэффициент Грюнайзена, V_0 и V — начальный и текущий удельные объемы, a и b — константы из адиабаты Гюгонио, описываемой линейным соотношением:

$$D = a + bu_m,$$

где D — скорость ударной волны, u_m — массовая скорость вещества за фронтом ударной волны.

Девиаторные составляющие тензора напряжений находятся из соотношения:

$$2G \left(\varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \right) = \frac{dS_{ij}^0}{dt} + \lambda S_{ij},$$

где dS_{ij}^0/dt — производная по Яуманну, определяемая формулой:

$$\frac{dS_{ij}^0}{dt} = \frac{dS_{ij}}{dt} - S_{ik} W_{jk} - S_{jk} W_{ik}$$

причем $2W_{ij} = \partial v_i / \partial x_j - \partial v_j / \partial x_i$. Параметр λ тождественно равен 0 при упругой деформации, а при наличии пластической — определяется с помощью условия текучести Мизеса:

$$S_{ij} S_{ij} = \frac{2}{3} \sigma^2.$$

Здесь G — модуль сдвига, σ — динамический предел текучести, которые определяются согласно соотношениям: $\sigma = \sigma_0 \left[1 + cP / (1 + \mu)^{1/3} + d(T - 300) \right] (1 - V_T / V_4)$ при $T \leq T_m$ и $V_T \leq V_4$,

$$\sigma = \sigma_p \text{ при } (V_{TK} \leq V_T \leq V_4 \text{ и } T \leq T_m),$$

$$\sigma = 0 \text{ при } T > T_m \text{ или } V_T > V_4 \text{ или } \sigma_{sw} \leq p_{fr}.$$

Здесь T_m — температура плавления вещества, c , d , V_3 и V_4 — экспериментально определяемые константы материала. Значение температуры вычисляется согласно: $T = (E - E_{0x}) / c_p =$

$$= \left[E - E_0 - E_1 \mu - (-E_1 + E_2) \mu^2 - (E_1 - 2E_2 + E_3) \mu^3 - (-E_1 + 3E_2 - 3E_3 + E_4) \mu^4 \right] / c_p,$$

$$E_0 = -300c_p, \quad E_1 = \gamma_0 E_0, \quad E_2 = (a^2 + \gamma_0^2 E_0) / 2, \quad E_3 = (4ba^2 + \gamma_0^4 E_0) / 16,$$

$$E_4 = (-2\gamma_0 ba^2 + 18b^2 a^2 + \gamma_0^4 E_0) / 24,$$

где c_p — удельная теплоемкость, E_{0x} — холодная составляющая удельной внутренней энергии.

Давление в матрице является функцией удельного объема, внутренней энергии и удельного объема трещин.

В результате численного моделирования получена информация о состоянии системы в интервале времени порядка 3 мкс с момента входа ударной волны в ампулу. Сюда следует отнести хронограммы процесса взаимодействия ударника с ампулой, данные о распределении давления, температуры, удельного объема пор и степени превращения по всему объему образца. Указанный интервал времени охватывает стадию ударно-волнового нагружения смеси, процесс сброса динамического давления и начальную стадию нахождения вещества в нагруженном состоянии.

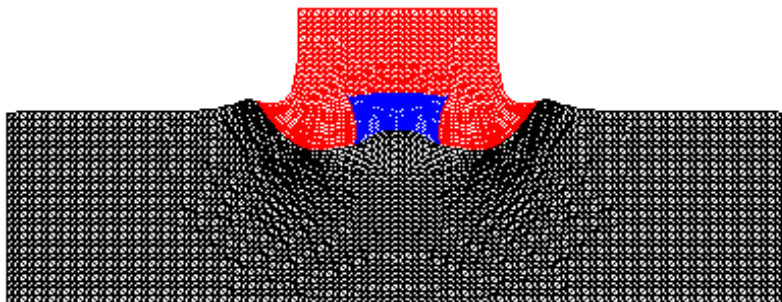


Рис. 1 Взаимодействие снаряда заполненного реакгентной смесью Ti+Si с преградой.

На рис.1 в качестве примера процесса взаимодействия снаряда заполненного Ti+Si с преградой в момент времени $t = 3$ мкс. Длина снаряда – 10,9 мм, скорость соударения = 2,0 км/с.

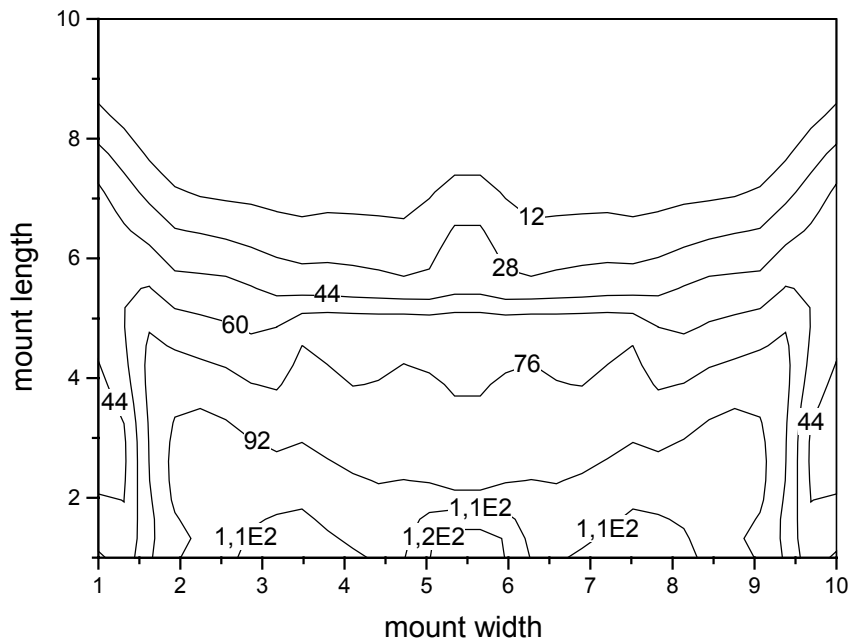


Рис.2 Изолинии давления в снаряде.

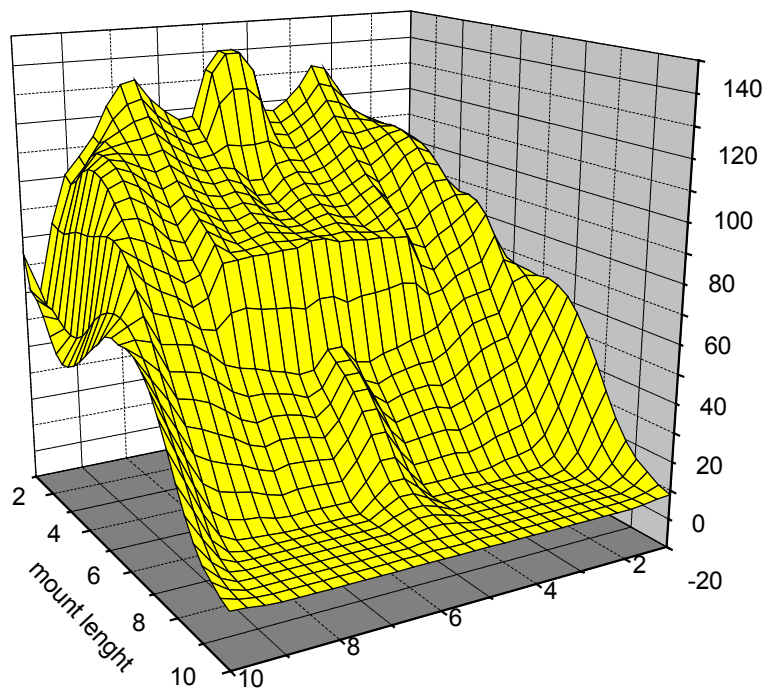


Рис.3 Поверхность давления в снаряде при скорости 2500 м/с.

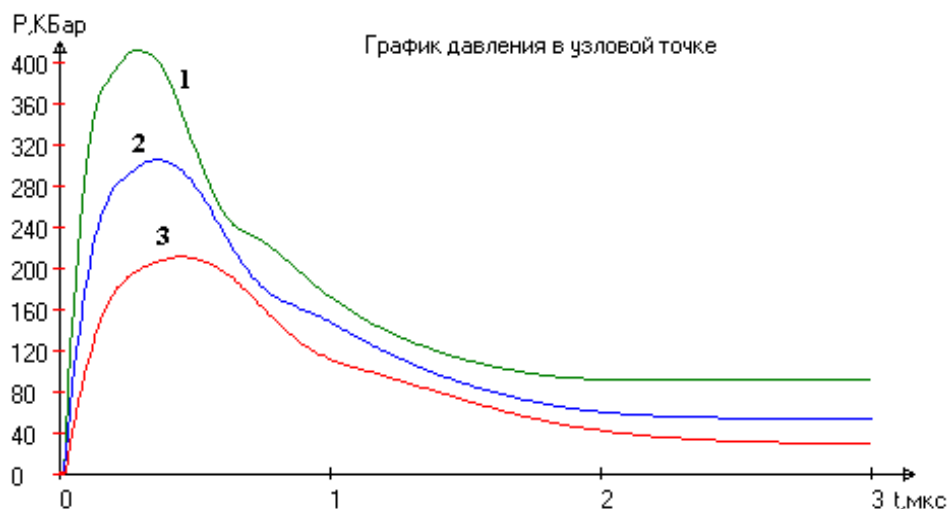


Рис.4 График давления в снаряде.

1-при скорости 2500 м/с,
 2-при скорости 2000 м/с,
 3-при скорости 1500 м/с.

Рис.4 иллюстрирует профиль давления в центре симметрии образца для случая 1.5, 2.0 и 2.5 км/с. При чем только при начальной скорости 2.5 км/с достигается давление при котором начинается химическая реакция. Критерием служащим прекращением химической реакции является полное превращения реагентной смеси Ti+Si в продукт реакции.

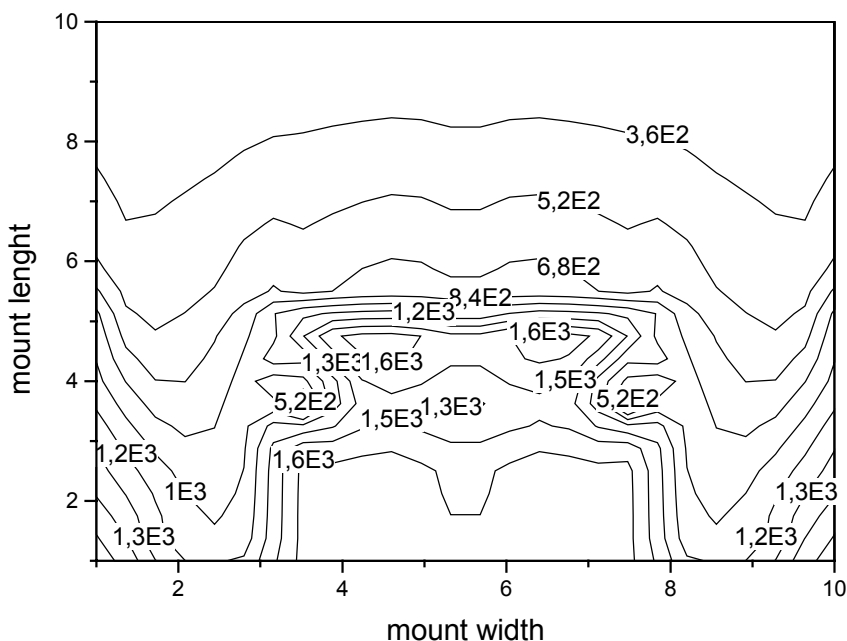


Рис.5 Изолинии температуры в снаряде

Привлечение методов численного моделирования в двумерной постановке задач позволяет осуществить количественное описание состояния ампулы сохранения в различные моменты времени после начала динамического воздействия.