

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ В БИДИСПЕРСНОЙ СМЕСИ АЛЮМИНИЯ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ

А.В. Фёдоров, Т.А. Хмель, С.А. Лаврук

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
630090, Новосибирск, Россия*

Исследования проблем гетерогенной детонации порошков алюминия имеет большое значение для различных отраслей применения. Эта задача актуально в связи с развитием детонационных технологий, а так же с точки взрыва-пожаробезопасности на производстве.

Реальные порошки алюминия характеризуются неоднородностью и наличием определенного разброса в размерах частиц. В работах [1-3] было проведено исследование процессов инициирования и распространения волн плоской и ячеистой детонации в бидисперсных и полидисперсных смесях алюминия. В настоящей работе исследуются процессы распространения детонации в в плоском канале заполненного бидисперсной смесью частиц 3.5 мкм и 0.5 мкм. Целью работы является анализ влияния фракционного состава бидисперсной взвеси на режимы распространения и характеристики детонационных течений.

**Математическая модель.** Используется двухтемпературная двухскоростная модель механики многофазных сред. Горение алюминия описывается как приведенная реакция, инициируемая после достижения критической температуры, с учетом неполного сгорания частиц.

Для описания горения микроразмерных частиц алюминия диаметром менее 3.5 мкм использовалась усовершенствованная полуэмпирическая модель горения [4], в которой учитывается переход от диффузионного к кинетическому режиму горения частиц. Используется уравнение приведенной кинетики аррениусовского типа с энергией активации 32 кДж/моль. Зависимость характерного времени горения частиц от их диаметра соответственно данным [5] принимается в виде

$$\tau_{\varepsilon} = \tau_0 (d / d_0)^{0.3} \exp(E_a / RT_2) \quad (1)$$

где  $d_0 = 3.5$  мкм,  $\tau_0 = 0.294$  мс.

Плотность частиц в облаке отвечает стехиометрии:

$$\rho_{20} + \rho_{30} = 1.34 \text{ кг} / \text{м}^3 \quad (2)$$

Состав дискретной фазы характеризуется параметром насыщенности

$$\eta = \rho_{30} / (\rho_{20} + \rho_{30}) \quad (3)$$

Значение этого параметра варьировалось в диапазоне от 0 до 1. Размеры частиц бидисперсной взвеси принимались равными  $d_2 = 3.5$  мкм и  $d_3 = 0.5$  мкм.

**Результаты расчетов.** В ходе моделирования были получены поля максимальных давлений, из которых видно, что в монодисперсной смеси частиц 3.5 мкм при ширине канала 6 см устанавливается регулярная ячеистая структура в 1.5 ячейки на ширину канала (рис. 1а). Давление в тройных точках составляет около 130 атм. Рассматривая бидисперсную смесь с коэффициентом насыщенности в 10% (рис.1б), видно, что ячеистая структура сохраняется, но давление в тройных точках падает с 130 атм, до 100атм. Увеличивая  $\eta$  до 30% из рис. 1в видно, что происходит выполаживание детонационного фронта. Ярко выраженных поперечных волн практически не наблюдается. Давление в областях, которые можно считать тройными точками не превышает 70 атм.

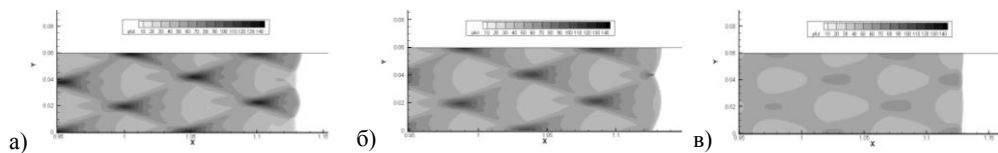


Рис. 1. Поля максимального давления. а)  $\eta=0$ ; б)  $\eta=0.1$ ; в)  $\eta=0.3$ .

Дальнейшее увеличение количества мелких частиц приводит к образованию плоского лидирующего фронта детонационной волны (рис.2). Из полей максимального давления видно, что при  $\eta=40\%$  и  $45\%$  (рис.2а и 2б) в канале отсутствуют поперечные волны, а давление стабилизируется в диапазоне 50 – 60 атм, характерное для детонации Чепмена – Жуге для алюминиевых частиц. На картинах заметны незначительное повышение давления, однако, они не приводят к переходу к ячеистой форме распространения детонации. При  $\eta=50\%$  в канале наблюдается ячеистая детонационная структура. На ширину канала приходится 6 детонационных ячеек. Давление в тройных точках не превышает 70-80 атм, но как видно из рис.2в полученная структура достаточно регулярна.

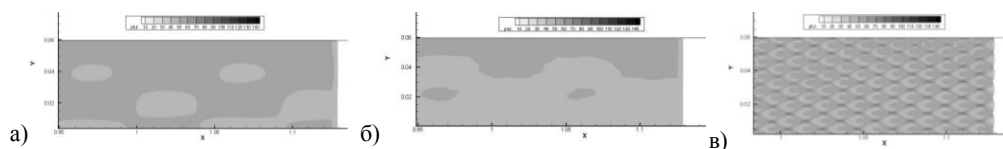


Рис. 2. Поля максимального давления. а)  $\eta=0.4$ ; б)  $\eta=0.45$ ; в)  $\eta=0.5$ .

При  $\eta=70\%$  на полях максимального давления в тройных точках увеличивается до 100 атм (рис.3а). Для  $\eta=90\%$  на ширину канала приходится 5.5 ячеек. Давление в тройных точках равно около 130 атм (рис. 3б). В монодисперсной 500нм смеси частиц наблюдается периодически регулярная ячеистая структура с 5.5-6 ячейками на ширину канала. Из полученных результатов видно, что добавление доли крупных частиц ведет к стабилизации размера ячейки на ширину канала.

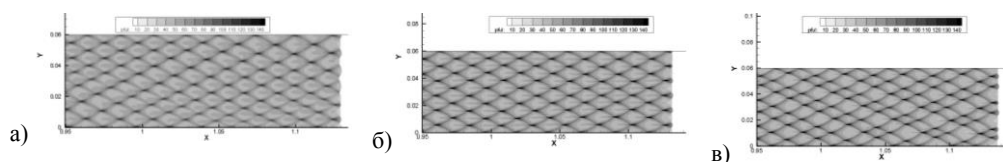


Рис. 3. Поля максимального давления. а)  $\eta=0.7$ ; б)  $\eta=0.9$ ; в)  $\eta=1$ .

**Выводы.** В рамках физико-математической модели детонации микронных и субмикронных частиц алюминия с учетом переходного режима горения численно исследованы задачи о распространении детонации в бидисперсной смеси в плоском канале. При наличии двух фракций ячеистые структуры являются менее выраженным (ослабление поперечных волн, снижение пиковых давлений), чем в монодисперсной смеси. Для смеси 3.5мкм и 500нм переход от одной структуры к другой происходит при доли мелких частиц примерно в 45%. Добавление небольшой доли крупных частиц в смесь к мелким частицам приводит к стабилизации размера ячейки на ширину канала.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект №17-69-00006)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Крагова Ю.В., Федоров А.В., Хмель Т.А.** Особенности ячеистой детонации в полидисперсных газовзвесах частиц алюминия // Физика горения и взрыва. 2011, т. 47, № 5, с. 85–94.
2. **Федоров А. В., Хмель Т. А.** Структура и инициирование плоских волн детонации в бидисперсной газовзвеси частиц алюминия // ФГВ, 2008, Т.44, № 2, с. 46-55.
3. **Федоров А. В., Хмель Т. А.** Формирование и вырождение ячеистой детонации в бидисперсных газовзвесах частиц алюминия // ФГВ, 2008, Т. 44, №3, с. 109-120.
4. **Fedorov A.V., Khmel T.A.** Detonation structures in gas suspensions of submicron and nano aluminum particles//In: Nonequilibrium Processes in Physics and Chemistry. V. II. / Ed. by A.M. Starik and S.M. Frolov. – M.: TORUS-PRESS. 2016. P. 341-351.
5. **Сандарам Д., Янг В., Зарко В.Е.** Горение наночастиц алюминия (обзор)// ФГВ, 2015, Т. 51, № 2. С. 37-63.