

Переход волны безгазового горения через воздушный зазор

Р.М. Габбасов^{1,}, В.Д. Китлер¹, В.Г. Прокофьев^{1,2}, А.М. Шульпеков¹*

¹Томский научный центр СО РАН, Томск, Россия

²Томский государственный университет, Томск, Россия

*pvg@fif.tsu.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности перехода волны безгазового горения через воздушный промежуток, разделяющий два образца цилиндрической формы, приготовленные из одной смеси реагентов. Состав шихты для изготовления образцов варьировался: Ni-Al, FeO-Al, Ti-Si. Экспериментально найдены критические значения ширины воздушного зазора, при которых еще возможен переход волны горения от одного образца к другому. Рассмотрен переход горения для образцов одного и разного диаметра. Построена математическая модель, на основе которой рассчитан эффективный коэффициент излучения с торцевой поверхности горящего образца, согласованный с экспериментальными данными.

Ключевые слова: безгазовое горение, поток излучения, критические условия.

1. Введение

В работах [1–3] проведено исследование перехода волны безгазового горения через газовый зазор и определено время задержки зажигания образца в зависимости от ширины промежутка между двумя образцами. Основной вклад в процесс теплопередачи через газовый зазор вносит излучение с поверхности горящего образца. Влияние лучистого теплопереноса на структуру фронта в СВС-процессе для высокопористой среды рассматривался в [4] на примере горения смеси Ni+Al с высокой пористостью. Получены оценочные значения коэффициента излучательной способности интерметаллида алюминид никеля. В [5] решена задача о зажигании к-вещества через отслаивающуюся преграду, где неидеальность теплового контакта была обусловлена образованием газового зазора между тонким инертным слоем и реакционноспособным веществом. В настоящей работе для цилиндрических образцов одного состава рассмотрены временные закономерности перехода горения одного образца к другому и установлены критические условия перехода. Рассмотрены смеси следующего состава: Ni+Al, FeO+60%Al, Ti+26%Si.

2. Экспериментальная часть

Наиболее детально процесс перехода волны горения через воздушный зазор между образцами рассмотрен на примере систем Ni – Al и Ti – Si. Для приготовления реакционных смесей использовали порошки алюминия АСД6 (размер частиц < 10 мкм), никеля УТ4 (размер частиц < 15 мкм), титана ПТС (размер частиц < 63 мкм), кремния КР1 (размер частиц < 63 мкм). Образцы готовили методом двухстороннего прессования в стальной пресс-форме в виде цилиндрических образцов диаметром 15 мм и 20 мм, относительной плотностью 0.47-0.5. Видеосъемку процесса горения проводили через окно из кварцевого стекла в реакционной камере. Скорость распространения фронта волны горения и время задержки перехода волны горения от одного образца к другому определяли из видеозаписи процесса горения с помощью высокоскоростной видеокамеры (9) Motion ProX-3 (частота кадров 1000 с⁻¹). Значения ширины воздушного зазора и времени задержки перехода волны горения от одного образца к другому приведены в Таблице 1. При ширине зазора $h = 1.8$ мм для системы Ni-Al время задержки воспламенения составило 40 секунд (не включено в Таблицу 1), т.к. второй образец реагировал в режиме теплового взрыва. С увеличением промежутка до 1.9 мм переход волны горения с воспламенением второго образца не происходит. Для системы Ti-Si переход волны горения при $h = 8.6$ мм не регистрировался. Особенности перехода волны горения от образца 1 к образцу 2 для системы Ti+26 мас. % Si

иллюстрируют видеокдры на Рис. 1. Заключительная фаза горения первого образца – выход волны горения на торцевую поверхность принимается за начало отсчета времени задержки зажигания. Через 3 секунды появляется очаг горения на поверхности второго образца. Это время принимали за окончание отсчета времени задержки зажигания. Разница между начальным и конечным временем определяли как время задержки зажигания t_{ign} . Далее волна горения устойчиво распространяется по второму образцу.

Таблица 1. Время задержки зажигания.

	Ni+31.5%мас.Аl				Ti+26%мас.Si				
h , мм	1.1	1.5	1.7	1.5	2.8	5	6	7.6	8
t_{ign} , с	0.9	8.2	10.4	1	1.6	2.5	3.1	4	6

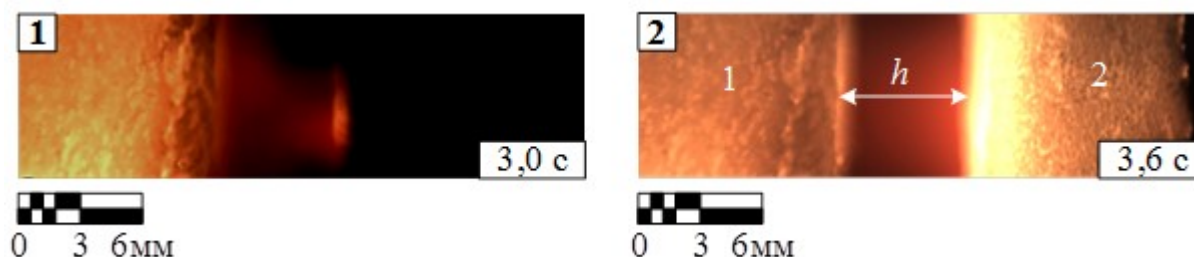


Рис. 1. Переход волны горения через воздушный зазор для системы Ti+26%Si.

3. Теоретическая часть

Основу одномерной математической модели, описывающей процесс перехода волны горения через воздушный зазор, составляет известная модель безгазового горения Мержанова А.Г. Конвективный перенос тепла [6] в модели не рассматривается. Рассматриваются два образца цилиндрической формы имеющие радиусы r_1 и r_2 , расположенные соосно и разделенные воздушным промежутком шириной h . Предполагается, что образцы изготовлены из одной и той же смеси элементов. На боковой поверхности образцов осуществляется теплообмен по закону Ньютона с внешней средой. На торцевых поверхностях, ограничивающих воздушный промежуток, задаются сопряженные граничные условия с учетом кондуктивного и лучистого переноса тепла. Математическая модель включает уравнения теплопроводности для конденсированной и газовой фазы и уравнение химического превращения.

$$c_p \rho \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) - \frac{2\alpha}{r} (T_i - T_0) + Q \rho W(\eta_i, T_i), (0 < x < L_1, L_2 < x < L) \quad (1)$$

$$c_g \rho_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x} \right), (L_1 < x < L_2) \quad (2)$$

$$\frac{d\eta_i}{dt} = W(\eta_i, T_i), (0 < x < L_1, L_2 < x < L) \quad (3)$$

$$W(\eta_i, T_i) = \begin{cases} (1 - \eta_i) k_0 \exp(-E / RT_i), & T_i \geq T_k \\ 0, & T_i < T_k \end{cases}, (i=1, 2). \quad (4)$$

Система уравнений (1)–(4) дополняется следующими краевыми условиями

$$x = 0: T_1(0, t) = T_w \quad (t < t_w), \quad \frac{\partial T_1}{\partial x} = 0 \quad (t > t_w) \quad (5)$$

$$x = L_1: \lambda \frac{\partial T_1}{\partial x} + \varepsilon_{red} \bar{\varphi}_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4) = \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x}, \quad T_1 = T_g \quad (6)$$

$$x = L_2: -\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x} = -\lambda \frac{\partial T_2}{\partial x} + \varepsilon_{red} \bar{\varphi}_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4), \quad T_g = T_2 \quad (7)$$

$$x = L: \lambda \frac{\partial T_2}{\partial x} - \alpha (T_0 - T_2) = 0. \quad (8)$$

Здесь $\bar{\varphi}_{12}$ – средний угловой коэффициент излучения. Для системы из двух соосных кругов радиусов r_1 и r_2 , расположенных на расстоянии h , угловой коэффициент равен [7]:

$$\bar{\varphi}_{12} = \frac{1}{2} \left(z^2 - \sqrt{z^4 - 4r_2^2 / r_1^2} \right), \quad z = 1 + (h / r_1)^2 + r_2^2 / r_1^2.$$

Рассчитанные зависимости задержки времени зажигания от ширины воздушного промежутка для системы Ti+26мас.%Si для образцов разного диаметра представлены на Рис. 2. Для определения эффективного коэффициента излучения использовалось согласование рассчитываемого времени задержки зажигания для значения ширины воздушного зазора $h = 1.1$ мм с экспериментальным значением. Согласованный коэффициент излучения равен $\varepsilon_{red} = 0.58$. Дальнейшие расчеты времени задержки зажигания, проводимые с этим значением коэффициента для других значений h , почти совпадают с экспериментальными данными. Критическое значение ширины зазора равно 2.7/2.9 мм эксперимент/теория.

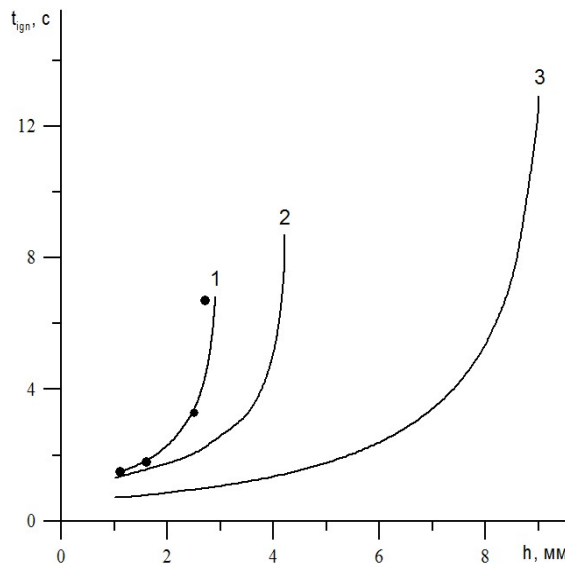


Рис. 2. Время задержки зажигания Ti+26%Si: 1 – $r_1 = 5$ мм, $r_2 = 7.5$ мм; 2 – $r_1 = 5$ мм, $r_2 = 10$ мм; 3 – $r_1 = 7.5$ мм, $r_2 = 10$ мм; • – эксперимент.

С увеличением радиуса образцов увеличивается ширина воздушного зазора, при котором возможен переход волны горения от одного образца к другому под действием потока излучения с горячей поверхности первого образца.

Следует отметить, что учет излучения при теоретическом описании синтеза композитов в режиме горения приведет к развитию математических моделей процессов горения широкого класса гетерогенных систем [8].

4. Выводы

Установлены критическая толщина воздушного промежутка и закономерности перехода волны безгазового горения от одного образца к другому для систем Ni+Al (критическая толщина 1.8 мм) и Ti+26%Si (критическая толщина 8.6 мм). Построена математическая модель переходного процесса на основе радиационно-кондуктивного механизма теплопередачи с учетом геометрических размеров СВС-образцов, включающая теплофизические характеристики рассматриваемых сред и кинетические параметры реакции. В результате согласования данных эксперимента и параметров математической модели по кинетическому механизму химической реакции и времени задержки зажигания рассчитана эффективная степень черноты синтезируемых в режиме горения материалов.

5. Список литературы

- [1] S.G. Vadchenko, Gasless Combustion of a Model Multilayer System (Combustion of Disks with a Gap), *Combust., Explos. Shock Waves*, vol. **37**(2), 159, 2001; doi: 10.1023/A:1017501608547
- [2] P.M. Krishenik, A.G. Merzhanov, and K.G. Shkadinskii, Frontal transformation modes of structured energetic heterogeneous systems, *Combust., Explos. Shock Waves*, vol. **41**(2), 164, 2005; doi: 10.1007/s10573-005-0019-x
- [3] P.M. Krishenik, S.V. Kostin, and S.A. Rogachev, Combustion Wave Stability in Transition through the Interface of Gasless Systems, *Russian journal of physical chemistry B*, vol. **12**(4), 677, 2018; doi: 10.1134/S1990793118040255
- [4] В.В. Евстигнеев, П.Ю. Гуляев, В.И. Иордан, А.В. Калачёв, Теоретические модели и экспериментальные методы исследования механизма формирования тепловой структуры в волне горения самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, *Ползуновский вестник*, **1**, 313, 2005.
- [5] A.G. Knyazeva, Ignition of a Solid Through a Detachable Shield, *Combust., Explos. Shock Waves*, vol. **37**(1), 46, 2001; doi: 10.1023/A:1002864608479
- [6] V.G. Prokofiev, V.K. Smolyakov, Thermocapillary Convection in a Gasless Combustion Wave, *Combust., Explos. Shock Waves*, vol. **55**(1), 89, 2019; doi: 10.1134/S0010508219010106
- [7] А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков, *Теплообмен излучением. Справочник*, Москва: Энергоатомиздат, 1991.
- [8] А.Г. Князева, Двухуровневые модели синтеза композитов: история и возможности, *Физика горения и взрыва*, **60**(1), 48, 2024; doi: 10.15372/FGV2023.9332