На правах рукописи

Писклов Андрей Вячеславович

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА СЛОЕВЫХ БЕЗГАЗОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ

01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника по физико-математическим наукам

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2009

Работа выполнена на кафедре математической физики физико-технического факультета ГОУ ВПО «Томский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, Прокофьев Вадим Геннадьевич (Томский государственный университет)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор, Старченко Александр Васильевич (Томский государственный университет)

доктор физико-математических наук, профессор, Кузнецов Гений Владимирович (Томский политехнический университет)

Ведущая организация: Институт химической кинетики и горения, Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск)

Защита состоится 18 декабря 2009 года в 10 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 при ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Автореферат разослан «17» ноября 2009 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук Ю.Ф. Христенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. С открытием явления «волновой локализации автотормозящихся твердофазных реакций» в 60-х годах [1, 2], появился новый метод производства материалов – твердопламенное горение. В современной литературе этот метод более известен, как самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС). СВС - это процесс распространения волны экзотермической химической реакции по смеси реагентов с образованием твердых конечных продуктов. Необходимым условием протекания СВС является способность системы реагировать с высоким экзотермическим эффектом. В синтезе новых материалов методом СВС могут участвовать все химически активные при высоких температурах вещества в качестве реагентов и инертные вещества в качестве наполнителей или разбавителей. При этом наиболее популярные реагенты: H_2, B, Al, C, N_2, O_2, Mg, Ti, Nb, Mo, Si, Ni, Fe, TiO_2, Cr_2O_3, MoO_3, Fe_2O_3, NiO и др.

Отличительные черты нового метода от традиционной печной технологии, такие как: высокая скорость достижения необходимых температур, чистота полученных продуктов, простота процесса, возможность работы с большим количествами вещества и др. - сделали метод СВС реальным технологическим приемом для создания усовершенствованной керамики, композитов, интерметаллических составов, функционально-градиентных материалов (ФГМ). Успешное применение СВС для синтеза неорганических соединений стимулировало активные исследования по его усовершенствованию [3]. Новая технология создания готового продукта, в условиях высокого спроса на рынке потребления, позволяет расширить ассортимент изготовляемых материалов. Производится более качественная продукция, отвечающая высоким современным техническим требованиям. Создание многослойных композиций несущих различную функциональную нагрузку обеспечивает многовариантность сочетания свойств синтезируемого продукта заданного состава. С целью повышения эффективности изготовления конечного продукта с заданными свойствами возникает необходимость предварительного теоретического исследования и численного моделирования физико-химических процессов, сопровождающих СВС.

Теоретический анализ и математическое моделирование синтеза позволяют не только детально рассмотреть формирование и движение волны горения, оценить время и скорость реакции, установить параметры, определяющие режимы фазовых переходов, влияние внешних факторов на процесс горения, но и, например, разработать принципы построения многослойных композиций необходимых для получения современных

ФГМ (необходимые кинетические и теплофизические параметры исходных компонентов, соотношение размеров слоев, и т.д.).

В связи с этим являются актуальными теоретические исследования получения неоднородных материалов методом СВС.

Цели и задачи исследований.

Целями настоящей работы являются:

- Разработка физико-математических моделей СВС – процесса для образцов цилиндрической и плоской формы с учетом внешнего теплообмена с окружающей средой.
- Разработка физико-математической модели СВС – процесса для образца со ступенчато меняющимся диаметром и исследование на ее основе критических условий распространения волны твердопламенного горения с изменением характерного размера образца.
- Построение математической модели СВС – процесса для слоевой системы, сформированной по принципу «химической печки» (тепловая энергия от высококалорийных вспомогательных слоев используется для дополнительного подогрева реагентов в основных слоях синтеза и продуктов реакции).
- Исследование влияния инертных теплопроводящих элементов на среднюю скорость горения безгазовых слоевых композиций.
- Разработка математической модели СВС – сварки плоского слоевого пакета с учетом фазовых переходов первого рода.

Методы исследований. Исследование полученных математических моделей осуществлялось на основе численных методов, разработанных для решения нестационарных многомерных и сопряженных задач теории теплопроводности. Для описания процессов химического и фазового превращения использовался макрокинетический подход.

Научная новизна.

1. Показано существование минимального диаметра зажигания (критического диаметра) для образцов со ступенчато меняющимся диаметром. Установлена сильная зависимость критического диаметра от чисел Зельдовича и Аррениуса.
2. Введение в безгазовые составы инертных элементов из высокотеплопроводящих металлов приводит к эффективному увеличению средней скорости горения образца.
3. Установлено, что горение горизонтального слоевого пакета, сформированного по принципу «химической печки», возможно в одном из трех режимов: управления, отрыва и индукционном режиме, которые отличаются временем и скоростью реагирования основного слоя синтеза.

4. Разработана математическая модель СВС – сварки. В зависимости от соотношения размеров и теплофизических свойств материала слоев композиции и параметров фазового перехода возможны три стационарных режима плавления инертного внутреннего слоя: полное плавление, комбинированное плавление и контактное плавление.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Физико-математическая модель, описывающая перемещения волны экзотермической химической реакции по смеси реагентов безгазового состава для образцов цилиндрической и плоской формы с интегрированными в них инертными высоко-теплопроводящими элементами, и результаты численного ее исследования.
2. Математическая модель твердопламенного горения образца со ступенчато меняющимся диаметром и результаты численного ее исследования.
3. Модель безгазового горения химически и термически неоднородных образцов, сформированных в виде слоевого пакета, с учетом фазового перехода и внешнего теплообмена с окружающей средой. Режимы горения слоевого пакета в зависимости от параметров слоевой системы.

Достоверность. Достоверность полученных результатов работы обеспечивается строгостью используемых математических постановок задач, непротиворечивостью результатов и выводов. Результаты численных решений исследуемых математических моделей качественно совпадают с известными экспериментальными данными. Соблюдались все критерии, обеспечивающие устойчивость и сходимость численных решений.

Практическая значимость. Значимость диссертационной работы обусловлена возможностью применения построенных математических моделей и результатов их численного исследования для описания и объяснения явлений в реальных СВС-процессах для термически и химически неоднородных систем. Разработанная методика построения слоевых безгазовых композиций для осуществления синтеза материалов в «химической печке» и сварки объектов позволяет рассчитать параметры слоевой композиции для эффективного осуществления конкретного процесса сварки.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на: I. Международных конференциях: IV международный симпозиум «Горение и плазмохимия», Алматы, 2007г., V международная научная конференция «Хаос и структуры в нелинейных системах», Астана, 2006г., III международная конференция студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», Томск. 2006, III международный симпозиум «Горение и плазмохимия», Алматы, 2005г., международная шко-

ла-конференция молодых ученых «Физика и химия наноматериалов», Томск, 2005г.,
II. Всероссийских конференциях: XIV Симпозиум по «Горению и взрыва», г.Черноголовка, 2008, IV всероссийская школа – семинар по структурной макрокинетике для молодых ученых, Черноголовка, 2006г., всероссийская научная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», Томск, 2006г., II всероссийская конференция молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем», Томск, 2006г., всероссийская научная конференция молодых ученых «НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ», Новосибирск, 2005г., всероссийская научная конференция «Физика и химия высокоэнергетических систем» Томск, 2003г., всероссийская научная конференция «НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ», Новосибирск, 2003.

Основные результаты работы опубликованы в 3 статьях в журналах, относящихся к перечню Высшей аттестационной комиссии.

По теме диссертации опубликовано 16 работ, включая тезисы и материалы докладов всероссийских, региональных и международных конференций.

Вклад автора. При получении результатов представляемой к защите работы автором сделан определяющий вклад, заключающийся в участие в разработке математических формулировок, в выполнении численных расчетов, анализе и обобщении результатов.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 101 страницу. Список источников литературы содержит 87 названий.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и новизна темы, дается общая характеристика работы, определяется тематика и цель работы.

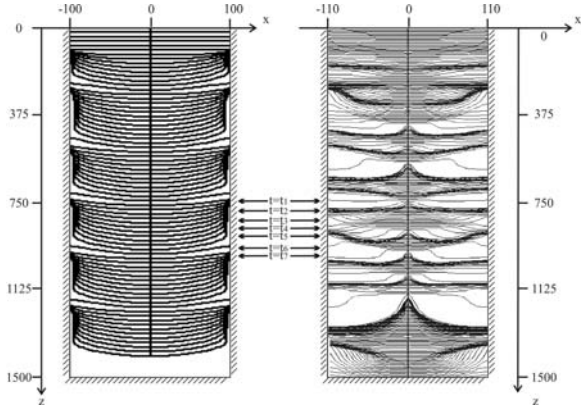
Первая глава разделена на два параграфа, в первом - решается задача о распространении пламени по образцу цилиндрической формы с фиксированным значением диаметра. Рассматривается упрощенная модель твердопламенного горения цилиндрического образца, учитывающая теплопередачу в образце, тепловыделение в ходе химического превращения и теплообмен с внешней средой. Исследуются закономерности изменения структуры фронта реакции в процессе горения образца в зависимости от соотношения масштабов и параметров теплообмена с внешней средой.

Математическая модель распространения фронта горения в двумерном приближении по образцу цилиндрической формы с образованием конденсированных продуктов реакции описывается уравнениями теплопровод-

ности, химической кинетики, граничными и начальными условиями [3]. Сравнение значений средней скорости горения при решении задачи в трехмерной постановке, взятые из работ Т.П. Ивлевой, и в двумерной постановке показывают, что отличие не превышает 2-4 %. Следовательно, для получения приближенных количественных оценок средней скорости горения цилиндрического образца, полноты превращения, температуры конденсированной фазы, в случае, когда нет необходимости детально анализировать и описывать изменения структуры волны горения, предпочтительнее решать задачи горения в двухмерном приближении. Это существенно уменьшает время численных расчетов и позволяет провести более полное параметрическое исследование задачи, что имеет большое значение при анализе решений, представляющих интерес для практики.

Система дифференциальных уравнений, записанная в безразмерном виде, решалась конечно-разностным методом со вторым порядком точности по пространственной координате и первым порядком по времени. Использовался метод продольно-поперечной прогонки. В ходе численных расчетов, находили пространственно – временное распределение температуры, глубины превращения, скорости распространения фронта химической реакции, а также его структуру. Положение фронта определяли по координатам точек с глубиной превращения равной 0.5, что примерно соответствует максимуму функции тепловыделения химической реакции. Для качественного анализа результатов, на основе рассчитанных данных строили распределения температуры, глубины превращения, положения фронта в различных сечениях образца, а так же трехмерные в аксонометрии поверхности горения.

Исследовалось влияние коэффициента теплоотвода α_X на процесс горения. Показано влияние теплопотерь на геометрическую форму фронтальной поверхности, а также на среднюю скорость ее перемещения вдоль оси образца. У боковой поверхности наблюдается искривление фронта горения в приповерхностном слое под влиянием теплопотерь. На рис.1 представлена эволюция структуры фронта в продольно-осевом сечении образца для разных значений коэффициента теплоотвода α_X с боковой поверхности и других параметров задачи. Более сильные колебания фронта горения на рис.1b, обусловленные снижением начальной температуры образца, наблюдаются даже при малом коэффициенте теплоотвода. Искривление фронтальной поверхности более значительно, чем при существенно большем значении коэффициенте теплоотвода на рис.1a.



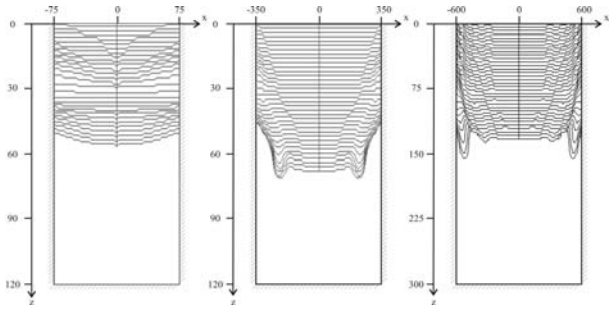
a b

Эволюция фронтальной поверхности
для различных вариантов.

a) $\theta_0 = -6, \mathrm{Ar} = 0.1, Z_0 = 1500, X_0 = 100, \alpha_X = \alpha_Z = 0.56;$

b) $\theta_0 = -8, \mathrm{Ar} = 0.1, Z_0 = 1500, X_0 = 110, \alpha_X = \alpha_Z = 0.003;$

Рис.1



a b c

Положение фронта в различные моменты времени
в продольном сечении образца для неадиабатического случая
при различных значениях диаметра образца

a) $\theta_0 = -8, \mathrm{Ar} = 0.1, Z_0 = 1500, X_0 = 75, \alpha_X = \alpha_Z = 0.003;$

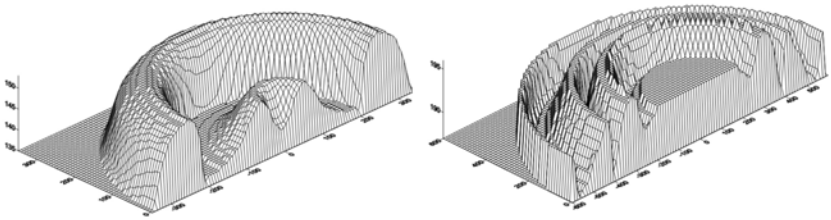
b) $\theta_0 = -8, \mathrm{Ar} = 0.1, Z_0 = 1500, X_0 = 350, \alpha_X = \alpha_Z = 0.003;$

c) $\theta_0 = -8, \mathrm{Ar} = 0.1, Z_0 = 1500, X_0 = 600, \alpha_X = \alpha_Z = 0.003;$

Рис.2

В неадиабатических условиях, наблюдается зависимость структуры колебаний от величины диаметра. Увеличение радиального размера образца при неизменных остальных теплофизических и геометрических параметрах является причиной возникновения сильных релаксационных колебаний температурного поля (рис.2). Переход от двумерной к трехмерной постановке приводит к появлению спиновых режимов горения подробно исследованных в диссертации Т.П. Ивлевой [4].

Фронтальная поверхность в поперечном сечении образца имеет форму колец (рис.3). Такой нестационарный режим распространения твердого пламени называют радиально-кольцевым [3].



a b

Влияние радиального размера образца
на структуру фронтальной поверхности
a) $\theta_0 = -8, \mathrm{Ar} = 0.1, Z_0 = 1500, X_0 = 350, \alpha_X = \alpha_Z = 0.003;$
b) $\theta_0 = -8, \mathrm{Ar} = 0.1, Z_0 = 1500, X_0 = 600, \alpha_X = \alpha_Z = 0.003;$
Рис.3

Во втором параграфе рассматривается распространение фронта горения в образце цилиндрической формы со ступенчато изменяющимся диаметром с целью исследования критических условий перехода волны горения в полуограниченное пространство и определения критического диаметра перехода. Численно решалась модельная задача твердопламенного горения цилиндрического образца с углом расширения $\pi/2$, который представляет собой два одноосных цилиндра разного диаметра соединенных по торцевой поверхности. На рис.4 представлены образец и схема организации горения.

Записанная в безразмерном виде с использованием традиционных для задач горения масштабов математическая модель твердопламенного горения [3] в двумерной осесимметричной постановке включает следующие уравнения и краевые условия:

Уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial\theta}{\partial\tau}=\frac{1}{x}\frac{\partial}{\partial x}\left(x\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)+\frac{\partial^2\theta}{\partial z^2}+(1-\eta)\exp\left(\frac{\theta}{1+Ar\theta}\right);$$

Уравнение химической кинетики:

$$\frac{\partial\eta}{\partial\tau}=\frac{(1-\eta)}{Ze}\exp\left(\frac{\theta}{1+Ar\theta}\right);$$

Граничные условия:

$$\tau\le\tau_{ign}:\ \theta(0,x,\tau)=0;$$

$$\tau>\tau_{ign}:\ \frac{\partial\theta(0,x,\tau)}{\partial z}=0;$$

$$x=x_1,\ 0<z<z_1:\ \frac{\partial\theta}{\partial x}=0;$$

$$x=x_2,\ z_1<z<z_2:\ \frac{\partial\theta}{\partial x}=0;$$

$$z=z_1,\ x_1<x<x_2:\ \frac{\partial\theta}{\partial z}=0;$$

$$z=z_2:\ \frac{\partial\theta}{\partial z}+\alpha_Z(\theta+Ze)=0;$$

Начальные условия:

$$\theta(z,x,0)=-Ze;\ \eta(z,x,0)=0;$$

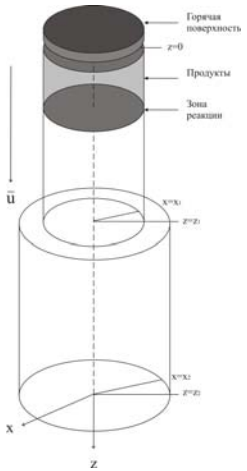


Схема образца
и организации горения

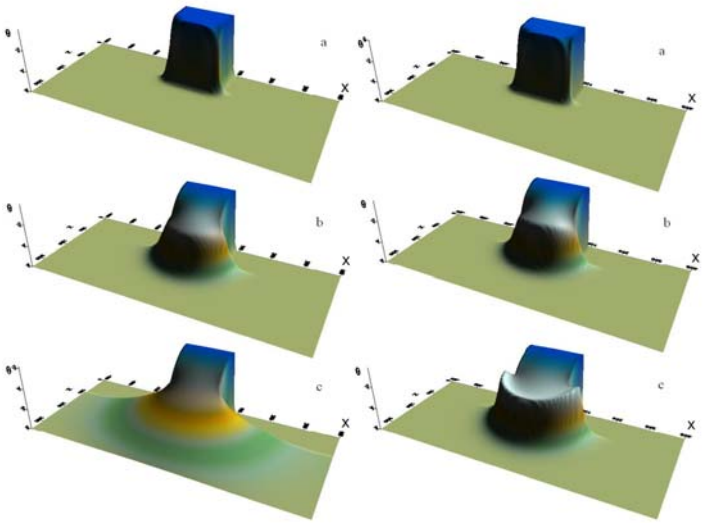
Рис.4

После зажигания и выгорания части образца малого радиуса начинает формироваться очаг горения в расширенной части. Существует определенное значение диаметра (критическое значение диаметра), которое определяет два возможных варианта дальнейшего развития процесса горения в расширенной части образца.

В первом (рис.5a), если диаметр малого цилиндра меньше критического значения, то обязательно существует определенное значение радиуса большого цилиндра, начиная с которого переход горения в расширенную часть образца становится невозможен. С течением времени температура сгоревшей части образца падает, стремясь к начальной температуре. Реакционное вещество в расширенной части образца остается полностью непрореагировавшим.

В другом случае (рис.5b), когда радиус малого цилиндра больше критического значения, горение всегда переходит в расширенную часть образца через определенное время задержки, которое зависит от радиуса большого цилиндра.

Обнаружено, что критический диаметр зажигания d_*, подобно нормальной скорости горения, является характеристикой самой реакционной среды. Наиболее значимые параметры задачи, определяющие значения d_*, – числа Зельдовича и Аррениуса.



a) $d = 168 < d_* = 170$ b) $d = d_* = 170$

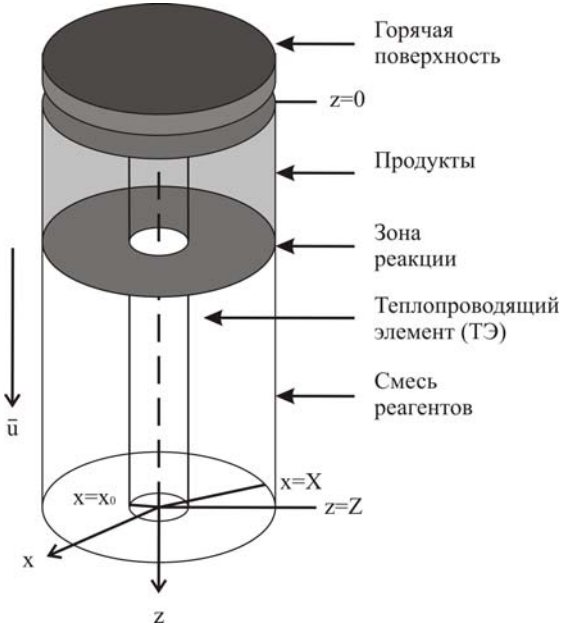
Рис.5

Во второй главе диссертации построена математическая модель горения цилиндрического образца безгазового состава с внутренним теплопроводящим элементом в виде коаксиального цилиндра. Внутренний радиус реакционного слоя и радиус сердечника совпадают. Зажигание осуществлялось накаленной поверхностью с торцевой поверхности образца в двух вариантах:

1) контакт накаленной поверхности с реагирующим веществом и с одновременной теплоизоляцией сердечника;

2) одновременный нагрев реакционного вещества и сердечника.

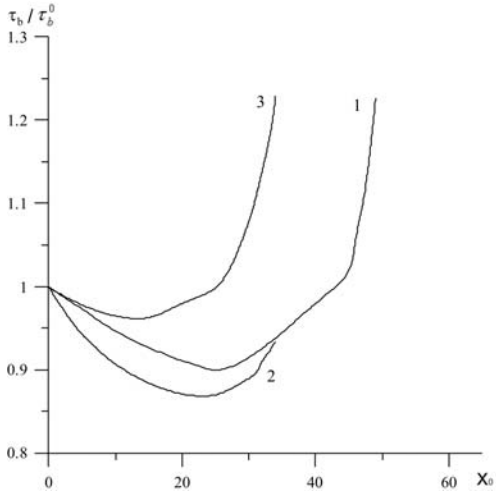
Противоположная торцевая поверхность образца теплоизолирована. На внешней боковой поверхности образца заданы условия теплообмена с окружающей средой по закону Ньютона. На (рис.6) представлена структура образца и схема организации горения.



Структура образца и схема организации горения.

Рис.6

Математическая модель, записанная в двумерной осесимметричной постановке, приводилась к безразмерному виду и решалась численно методом покоординатного расщепления с использованием неявной схемы. Граница инертной и реагирующей среды располагалась между узлами расчетной сетки. Использован численный алгоритм сквозного решения сопряженных задач теплообмена предложенный в [5]. Для аппроксимации тепловых потоков использована разностная схема с центральными разностями. Отношение теплофизических параметров инертного сердечника и реакционного вещества $\Lambda = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 38$ и $\Omega = \frac{c_1\rho_1}{c_2\rho_2} = 1{,}8$ соответствовали следующим материалам: ТЭ – Cu и Nb+2B – реакционное вещество (РВ). Растекание расплава по исходной шихте в рамках гомогенной модели не учитывалось. Зависимость времени горения реакционного слоя от радиуса сердечника имеет немонотонный характер (рис.7).



$1 - \theta_0 = -6$;

$2 - \theta_0 = -7$ (зажигание при полном контакте накаленной поверхности с образцом);

$3 - \theta_0 = -6$; (контакт накаленной поверхности только с РВ).

Зависимость времени горения образца от радиуса ТЭ.
$Ar = 0{,}1; \alpha_X = 0{,}02; X = 80;\ Z = 300.$

Рис.7

Время сгорания слоя при соотношении радиусов $\sigma = \frac{x_0}{X} \approx 0.3$ на 10 % меньше, чем время горения однородного цилиндрического образца τ_b^0 без ТЭ. С относительным увеличением теплопроводящих свойств материала сердечника эффективность его возрастает. Для значений параметров $\Lambda = 10^3$ и $\Omega = 1$ средняя скорость горения образца с ТЭ более чем в два раза превышает скорость горения однородного образца.

В третьей главе диссертации построена математическая модель «химической печки». Для синтеза материалов из слабокалорийной или эндотермической смеси из шихты реакционных компонентов определенным образом формируется слоевой пакет и обеспечивается горение в режиме «химической печки» [6, 7]. Слоевой пакет представляет совокупность сопряженных слоев с различной химической активностью (рис.8). Для вспомогательных слоев (ВС) используются высококалорийные металлотермитные составы с высокой температурой горения. Тепловая энергия от ВС поступает в основной внутренний слой синтеза (ОС) для дополнительного подогрева реагентов и продуктов реакции.

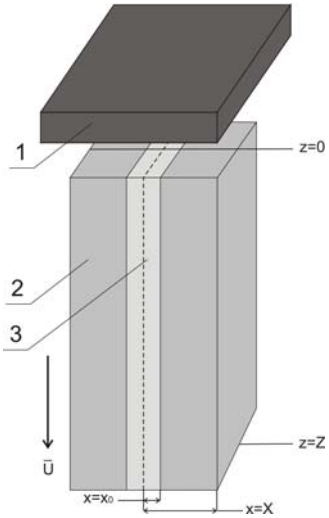


Схема организации процесса.
1 – горячая поверхость; 2 – вспомогательный слой; 3 – основной слой.

Рис.8

Рассмотрено безгазовое горение плоского трехслойного пакета прямоугольного сечения. Параметры и состав внешних слоев совпадают, а внутренний слой имеет однородную структуру. Внешний слой, являясь слоем-энергоносителем, выполняет вспомогательную функцию – обеспечивает тепловой энергией внутренний слой. Зажигание осуществляется при одновременном контакте всех слоев образца с накаленной поверхностью в плоскости перпендикулярной плоскости симметрии образца (горизонтальное формирование слоевого пакета [6]). Противоположная плоскости зажигания поверхность образца теплоизолирована. На внешней поверхности вспомогательного слоя задаются условия теплообмена с окружающей средой по закону Ньютона.

Математическая постановка задачи описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

Уравнения теплопроводности:

$$x > x_0 : \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial z^2} + \frac{1}{Td_1}\frac{\partial \eta_1}{\partial \tau};$$

$$x \le x_0 : \frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} = \delta\frac{\partial^2 \theta_2}{\partial x^2} + \delta\frac{\partial^2 \theta_2}{\partial z^2} + \frac{\Omega}{Td_2}\frac{\partial \eta_2}{\partial \tau};$$

Уравнения химической кинетики:

$$x > x_0 : \frac{\partial \eta_1}{\partial \tau} = Td_1(1-\eta_1)\exp\left(\frac{\theta_1}{1+Ar\theta_1}\right);$$

$$x \le x_0 : \frac{\partial \eta_2}{\partial \tau} = Td_2(1-\eta_2)\exp\left(\frac{\sigma\theta_2}{1+Ar\theta_2}\right);$$

Краевые условия:

$$\tau \le \tau_{ign} : \theta_i(0,x,\tau) = 0;$$

$$\tau > \tau_{ign} : \frac{\partial \theta_i(0,x,\tau)}{\partial z} = 0;$$

$$x = x_0 : \theta_1 = \theta_2,\ \frac{\partial \theta_1}{\partial x} = \Lambda\frac{\partial \theta_2}{\partial x};$$

$$\frac{\partial \theta_i(Z,x,\tau)}{\partial z} = 0;$$

$$\frac{\partial \theta_1(z,X,\tau)}{\partial x} + \alpha_X[\theta_1(z,X,\tau) - \theta_0] = 0;$$

$$\theta_i(z,x,0) = \theta_0;\ \eta_i(z,x,0) = 0; \qquad i = 1,2;$$

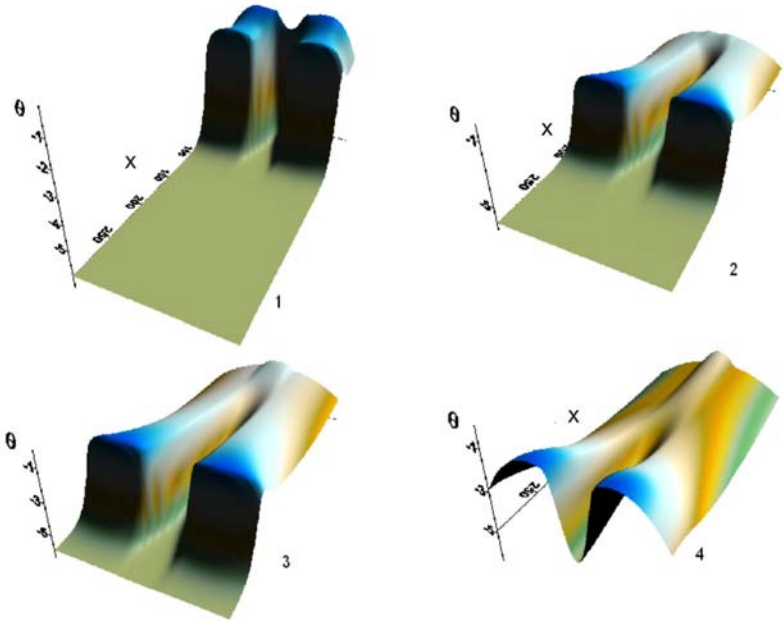
Здесь индекс 1 относится к внешнему реакционному слою (ВС), а 2 – к основному внутреннему слою (ОС). Численное решение системы уравнений получено аналогично решению задачи с ТЭ из второй главы. Аппроксимационная сходимость проверялась сгущением узлов расчетной сетки. Погрешность при вычислении времени сгорания слоевого пакета не превышала 1 %.

Для проведения синтеза материалов в соответствии с методом «химической печки» необходимым условием является сочетание высоко и слабо калорийных слоев. Теплопроводность и калорийность вспомогательного слоя, как правило, значительно выше, чем у основного внутреннего слоя синтеза, что обеспечивает высокую скорость нагрева внутреннего слоя. Основные результаты получены для следующих базовых значений параметров внутреннего слоя

$$\mathrm{Td}_2 = \mathrm{Td}_1,\ \sigma = \frac{E_1}{E_2} = 1,\ \Lambda = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 0.1,\ \delta = \frac{x_0}{X} = 0.1,\ \Omega = \frac{c_1\rho_1}{c_2\rho_2} = 0.017,$$

характерных для синтеза материалов методом «химической печки»; Td – параметр Тодеса. Линейные скорости фронта определялись по перемещению поверхностей с глубиной превращения $\eta_1 = 0.5$ и $\eta_2 = 0.5$ в сечениях $x = 0$ (плоскость симметрии образца) и $x = x_0 + \frac{(X - x_0)}{2}$ (среднее сечение внешнего слоя) параллельных оси z.

Установлены три основных режима горения слоевого пакета, два из которых можно классифицировать, используя терминологию горения конденсированных систем с последовательными реакциями [18], как режимы управления и отрыва. Режим слияния возможен только для высококалорийного внутреннего слоя, что в целом нетипично для проведения синтеза в условиях «химической печки». В режиме управления скорость горения внутреннего слоя (вторая реакция) с некоторой задержкой времени стремится к установившемуся стационарному значению скорости горения ВС (первая реакция). Затем скорости горения слоев становятся равными до заключительной фазы сгорания ВС, где сказывается влияние адиабатической границы с резким ростом скорости горения. В отличие от горения конденсированных систем с последовательными реакциями в режиме управления, которое имеет другую особенность – скорость горения определяется параметрами второй реакции. Горение ОС продолжается в стационарном режиме до границы слоя.



Режим отрыва:
Температурное поле в поперечном сечении образца
в различные моменты времени.

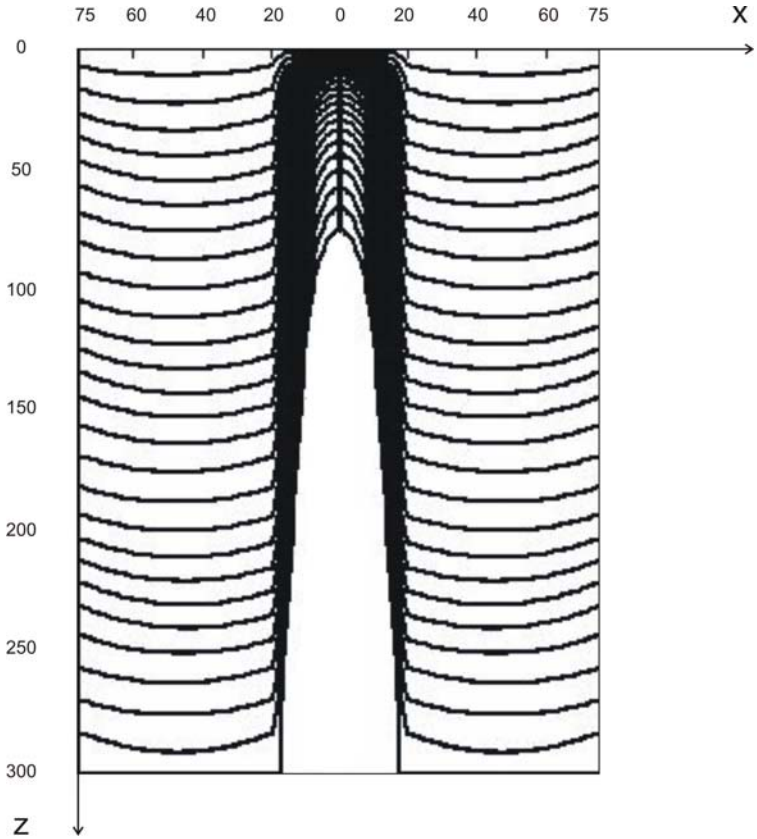
$$1-\tau=600;\ 2-\tau=1800;\ 3-\tau=2400;\ 4-\tau=3300;$$

$$\theta_0=-6; Ar=0{,}1; Bi_X=0.03; X=75;\ x_0=20;\ Z=300;\ \tau_{ign}=200;$$

Рис.9

В режиме отрыва (рис.9), 40-50% массы ОС реагирует уже после выгорания ВС. Однако установившееся значение скорости горения ОС попрежнему равно установившейся ранее скорости горения ВС. Характерной особенностью режима отрыва является промежуток времени между сгоранием ВС и выходом скорости горения ОС.

Третий режим – индукционный – отличается большим временем реагирования внутреннего слоя. В этом режиме (рис.10) более 50% объема внутреннего слоя реагирует в условиях теплового взрыва с большим периодом индукции, уже, после того как выгорит ВС.



Эволюция фронта горения в индукционном режиме
(периодичность линий с промежутком времени $\Delta\tau = 100$).
$\theta_0 = -6; Ar = 0,1; \alpha_X = 0.03; X = 75;\ x_0 = 20;\ Z = 300;\ \tau_{ign} = 200;$

Рис.10

В третьей главе во втором параграфе решалась модельная задача одного из возможных вариантов СВС-сварки. Для надежного осуществления СВС–сварки необходимо использовать шихту из высококалорийных смесей, которые реагируют с большим выделением тепла. Для эффективного процесса сварки необходимо рассчитать такое соотношение слоев, которое позволяет достичь в системе необходимой для жидкофазного спекания температуры плавления.

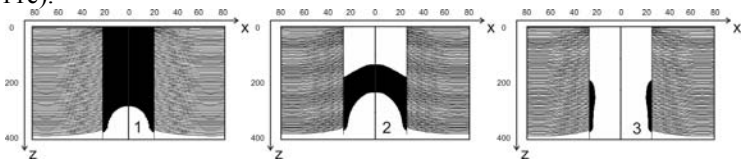
Рассмотрено безгазовое горение композиции, собранной из трех плоских слоев прямоугольного сечения аналогично «химической печке». Параметры и состав внешних (вспомогательных) слоев одинаковы и выполнены из высококалорийной смеси, а внутренний слой представляет собой пластину из инертного плавящегося материала. Инициирование горения осуществляется в результате одновременного импульсного контакта всех слоев с горячей поверхностью. Контакт композиции с накаленной поверхностью считается идеальным. Рассматривается плавление внутреннего слоя без учета возможного растекания и смачивания расплавом внешних слоев. В макроскопической модели среды не рассматривается диффузия атомов жидкой фазы в приповерхностный слой твердой фазы.

Исследована динамика процесса плавления внутреннего слоя, изучены возможные стационарные режимы плавления внутреннего слоя, границы существования которых зависят от параметров волны горения внешнего слоя, соотношения размеров и теплофизических свойств слоев.

1. Режим полного плавления. Плавление происходит по всей толщине и объему внутреннего слоя. Кристаллизации расплава за время горения ВС не происходит (рис.11a).

2. Комбинированный режим плавления. Плавление внутреннего слоя происходит по всей толщине, но в области удаленной от фронта внутренний слой кристаллизуется. Такой случай характеризуется наличием, как фронта плавления, так и фронта кристаллизации, которые определяют границы расплава (рис.11b).

3. Режим контактного плавления. Плавление инертного материала наблюдается только вблизи межслоевой границы. Глубина зоны расплава много меньше толщины внутреннего слоя. Такая локализованная область расплава перемещается вместе с фронтом горения внешнего слоя (рис.11c).



a b c

Рис.11

Основные результаты и выводы

1. Под влиянием теплоотвода зарождаются возмущения у боковой поверхности образца, вследствие чего происходит искривление поверхности фронта горения. В нестационарном периодическом режиме горения колебания фронта в диаметральном сечении имеют кольцеобразную форму, зависящую от диаметра образца.
2. Для образцов со ступенчато меняющимся диаметром показано существование минимального значения диаметра зажигания (критического диаметра), при котором еще возможен переход горения в расширенную часть образца. Определяющие значения критического диаметра параметры – числа Зельдовича и Аррениуса. Критический диаметр зажигания подобно нормальной скорости горения, является характеристикой самой реакционной среды.
3. Введение в безгазовые составы инертных теплопроводящих элементов с коэффициентом теплопроводности на 2-3 порядка выше теплопроводности исходной шихты приводит к эффективному увеличению скорости горения аналогично горению модельных пиротехнических составов с теплопроводящими элементами.
4. Введение в слоевую композицию инертных высокотеплопроводящих элементов при наличии внешнего теплоотвода способствует «запуску» синтеза в реагирующих слоях композиции за счет переноса тепла от внешнего источника в глубинные слои вещества.
5. Горение горизонтального слоевого пакета, сформированного по принципу «химической печки», осуществляется в режимах управления, отрыва и индукционном режиме, отличающихся временем и скоростью реагирования основного слоя синтеза.
6. Существует оптимальное (максимально возможное) отношение объема внутреннего слоя к объему внешнего слоя композиции, при котором синтез во внутреннем слое при наличии внешних теплопотерь проходит полностью.
7. В зависимости от соотношения размеров и теплофизических свойств материала слоев композиции возможны три стационарных режима плавления инертного внутреннего слоя: полного плавления, комбинированного плавления и контактного плавления.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Прокофьев В.Г., Смоляков В.К., Писклов А.В. Твердопламенное горение цилиндрических образцов со ступенчато изменяющимся диаметром // Физика горения и взрыва. – т.45. – №6. – 2009. – С.26-30.
2. Прокофьев В.Г., Смоляков В.К., Писклов А.В. Влияние теплопроводящего элемента на безгазовое горение образца цилиндрической формы в неадиабатических условиях // Физика горения и взрыва. – т.43. – №1. – 2007 – С.66-71.
3. Прокофьев В.Г., Смоляков В.К., Писклов А.В. Безгазовое горение слоевого пакета в неадиабатических условиях // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – №5. – 2006 – С. 102-108.
4. Prokofiev V.G., Pisklov A.V., Smolyakov V.K. Nonstationary Combustion Conditions of Layered Composition // Eurasian Physical Technical Journal. – 2006. – V. 3. – No. 1. – P. 51-53.
5. Писклов А.В., Прокофьев В.Г. Влияние теплопроводящего элемента на горение безгазовых составов цилиндрической формы // III Международный симпозиум «Горение и плазмохимия». – Алматы. – 2005 – С. 79-81.
6. Прокофьев В.Г., Писклов А.В., Смоляков В.К. Нестационарные режимы горения слоевых композиций // Хаос и структуры в нелинейных системах. Материалы 5-й международной научной конференции. – Астана. – 2006. – С. 183-186.
7. Писклов А.В., Прокофьев В.Г., Смоляков В.К. Горение слоевой композиции с плавящимся инертным внутренним слоем // Материалы Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики». – Томск: Изд-во Том. ун-та. – 2006. – С. 152-153.
8. Писклов А.В., Прокофьев В.Г., Смоляков В.К. Горение горизонтального слоевого пакета с плавящимся внутренним слоем // IV Международный симпозиум «Горение и плазмохимия». – Алматы. – 2007. – С. 35-37.
9. Прокофьев В.Г., Писклов А.В., Смоляков В.К., Плавление инертного слоя в процессе горения слоевой композиции. // Четвертая всероссийская школа – семинар по структурной макрокинетике для молодых ученых. – г.Черноголовка. – 2006.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мержанов А.Г., Шкиро В.М., Боровинская И.П. Пат. Франция 2088668, 1972; Пат. США 3726643, 1973; Пат. Англия 1321084, 1974; Пат. Япония 1098839, 1982
2. Мержанов А.Г., Боровинская И.П., Шкиро В.М. Явление волновой локализации автотормозящихся твердофазных реакций, диплом №287. Приор. от 05.07.67, Бюл 1984, №32; Вестн. АН СССР, 1984, №10;
3. Мержанов А.Г., Мукасьян А.С. Твердопламенное горение. – Москва: ТОРУС ПРЕСС, 2007. – 336 с.
4. Ивлева Т.П. Нестационарные режимы твердопламенного горения: автореф. дис. д. ф.-м. наук - Черноголовка, 2004. – 32 с.
5. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1965. – т. 5. – № 5. – С. 816-827.
6. Ксандопуло Г.И., Байдельдинова А.Н. Горение в системе сопряженных слоев и высокотемпературный синтез материалов // Журнал прикладной химии. – 2004. – Т. 77. – Вып. 3. – С. 370-374.
7. Мержанов А.Г., Боровинская И.П., Маслов В.М. Способ получения тугоплавких соединений. Авторское свидетельство СССР №556110 от 29.04.74.
8. Мержанов А.Г., Хайкин Б.И. Теория волн горения в гомогенных средах. – Черноголовка: Изд-во ИСМАН, 1992. – 161 с.