

ЯЧЕИСТЫЕ РЕЖИМЫ ПРИ ФИЛЬТРАЦИОННОМ ГОРЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

П.М. Кришеник^{1*}, С.В. Костин¹, Н.И. Озерковская¹, К.Г. Шкадинский^{1,2}

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук, Черноголовка, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химической физики Российской Академии Наук, Черноголовка, Россия

*petr@ism.ac.ru

Самоподдерживающийся фронтальный режим фильтрационного горения пористых составов реализуется в условиях экзотермического химического взаимодействия состава с газовым реагентом, поступающим в активную зону реакции путем фильтрации. В процессах горения порошка металлов используются газы (азот, кислород, водород) для образования конденсированных продуктов реакции (нитридов, оксидов, гидридов). При таком взаимодействии пористых тел с газами диффузионный массоперенос в газовой фазе отсутствует. Содержание газа в пористом теле при обычных давлениях недостаточно для реализации высокой полноты химического превращения. Поэтому процессы горения пористых сред существенно зависят не только от характера химического превращения конденсированной фазы и теплопереноса, но и фильтрации газа в зону реакции [1]. Из экспериментальных и теоретических исследований горения пористых сред в режиме естественной фильтрации газа [2-5] следовало, что в условиях потери устойчивости плоского фронта, дефицита массы активного газа во внутривпоровом пространстве могут устанавливаться различные неоднородные режимы распространения фронта, в том числе ячеистые.

В представленной работе численно и экспериментально исследуется нелинейная динамика формирования и распространение ячеистых режимов горения цилиндрически симметричных образцов. Исследуются процессы потери устойчивости плоского фронта, формирования и распространение самоподдерживающихся неоднородных волновых структур.

С помощью нестационарной математической модели численно исследуется горение недеформируемой пористой матрицы цилиндрически симметричной формы, в которую активный газовый реагент поступает извне через боковую проницаемую поверхность за счет перепада внешнего давления и внутривпорового давления в зоне реакции. Теплообмен через боковую поверхность обусловлен массообменом с внешней газовой средой, имеющей постоянную температуру. Проницаемость среды варьируется

в широком диапазоне параметров. Инициирование горения осуществляется периодически-возмущенным высокотемпературным источником тепла в центре цилиндра. Теплообмен пористого слоя с непроницаемой подложкой задает некоторый уровень теплопотерь (параметр задачи). Верхняя поверхность цилиндра предполагалась теплоизолированной и непроницаемой. Через нижнюю газонепроницаемую поверхность осуществляется теплообмен по закону Ньютона. Процесс горения инициируется в центре цилиндра высокотемпературным импульсом тепла. После зажигания формируется квазистационарный цилиндрически симметричный фильтрационный фронт, который «забывает» флуктуации инициирования, его структура и скорость горения медленно меняются в зависимости от расстояния до открытой поверхности. Характерное время формирования фронта зависит от возмущения, в устойчивом режиме горения возмущение сглаживается и горение «забывает» процесс зажигания.

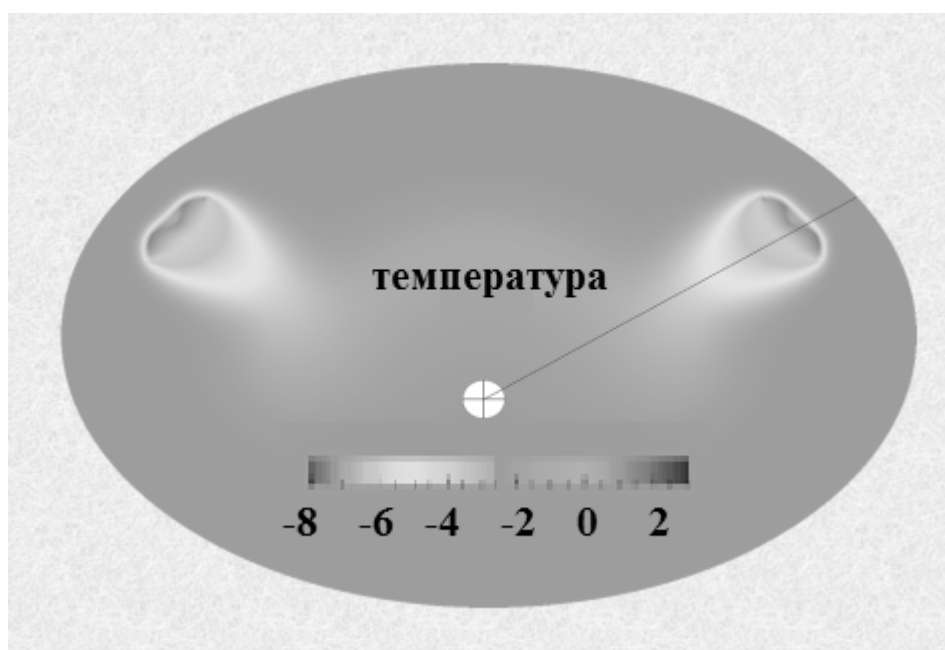


Рис.1. Пространственное распределение температуры при горении цилиндрического образца в ячеистом режиме.

После инициирования фронтального процесса из-за большой кривизны фронта фильтрация газа обеспечивает интенсивное химическое тепловыделение в зоне реакции. Полная глубина превращения достигается из-за интенсивной фильтрации газового реагента. Такой режим реализуется после зажигания горения в центре образца и при приближении горения к открытой поверхности пористого образца. В обоих случаях фильтрация газового реагента не лимитирует процесс химического взаимодействия. В промежуточном положении возможно формирование режима

неполного превращения, когда скорость фронта горения определяется фильтрационным потоком газового реагента. Отдаляясь от центра цилиндра фронт уменьшает свою кривизну, что приводит к дефициту активного газа в реакционной зоне. Плоский однородный фронт горения теряет устойчивость, зона реакции искривляется и формируются отдельные реакционных высокотемпературные зоны. В дальнейшем эти зоны трансформируются в изолированные ячейки со своей структурой (рис. 1).

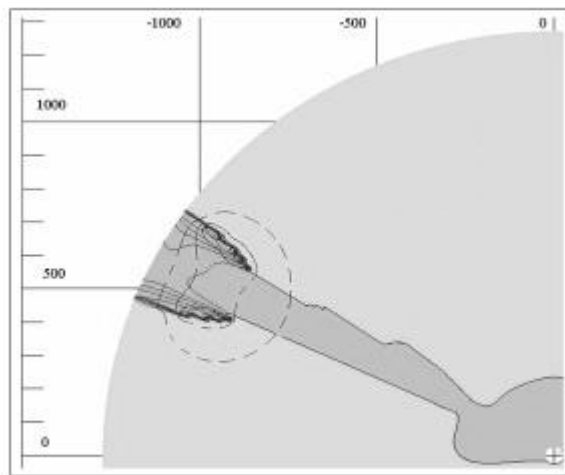


Рис. 2. Пространственное распределение продуктов горения при распространении ячеистого фронта; изолинии давления газа и температуры.

Ячейки перемещаются в направлении боковой поверхности цилиндра, через который газ поддается извне в зону реакции. Формирование отдельных «привилегированных» участков фронта горения приводит к улучшению фильтрационного транспорта газа в зону реакции ячейки. При распространении ячеистого фронта вне ячеек отсутствует химическое превращение конденсированного слоя, так как в этих областях температуры пористого слоя низкие. Дефицит газового реагента стимулирует формирование и распространение ячеистых структур в квазистационарном режиме, определяет их количество и размер. Размеры очага, колебательные характеристики ячеистой волны зависят от степени удаления зоны реакции ячейки от боковой поверхности (рис. 2).

Для экспериментального анализа горения слоя цилиндрической формы используется образец в форме дюралевого блюдца (как чашка Петри) с внутренним диаметром 70 мм, высота бортиков от доньшка равна 9 мм. На дно чашки насыпан слой порошка окиси титана TiO_2 толщиной ~ 7 мм, который используется в качестве

инертной теплоизолирующей подложки. Затем на теплоизолирующий слой насыпается порошок титана ПТМ (размер частиц менее $\sim 100\text{ мкм}$) слоем толщиной 2 мм , вес слоя титана $\sim 11,2\text{ г}$). Массовое содержание водорода в исходном порошке $0,1\%$. Высота двухслойной засыпки равна высоте бортика дюралевого «блюдца». Поверхность прикрыта кварцевым стеклом после установки в центре блюдца спирального элемента, с помощью которого инициируется процесс горения порошка. Зазор для подвода газового реагента находился на его периферии, так как стекло приподнималось над ванночкой с помощью винтиков. В процессе горения фильтрация активного газового реагента реализовывалась через щель между слоем пористого конденсированного реагента и прозрачной плоской стенкой, расположенной параллельно пористому слою.

Формирование и распространение волны фильтрационного горения пористого конденсированного вещества проводится в условиях фильтрации воздуха вдоль щели между пористой гетерогенной средой и плоской стенкой. Высокая проницаемость гетерогенной среды регулируется высотой зазора.

На рис. 3 иллюстрирован процесс горения слоя титана в дюралюминиевом блюдце. На начальном этапе после инициирования горения слоя порошка раскаленной электрической спиралью формируется однородный плоский фронт горения. Он характеризуется интенсивным взаимодействием титана с кислородом и азотом, газ фильтруется навстречу фронту. На подложке из диоксида титана сплошной однородный фронт горения, распространяющийся в режиме встречной фильтрации газа – поток воздуха извне направлен навстречу фронту. Сильное свечение продуктов горения свидетельствует о высокой интенсивности химического реагирования титана с воздушной смесью. Большая кривизна поверхностного фронта способствовала формированию однородной устойчивой волновой структуры (рис. 3а). Удаляясь от центра цилиндрической формы кривизна фронта увеличивалась, что привело к нехватке активного газа в зоне реакции. Начиналось разрушение однородного фронта с дальнейшим формированием трех высокотемпературных ячеистых структур (рис. 3б). Ячеистый фронт распространялся в колебательном режиме. При приближении ячеек к источнику газа размеры зоны реакции ячеек увеличивались (рис. 3в), частота колебаний ячеек росла, скорость распространения фронта уменьшалась. При незначительном удалении ячеек от боковой поверхности образца, зона реакции резко увеличивалась и могла содержать несколько высокотемпературных очагов. При горении слоя титана на слое диоксида титана, когда теплотери в подложку незначительные, наблюдается обратное горение в ячеистом режиме.

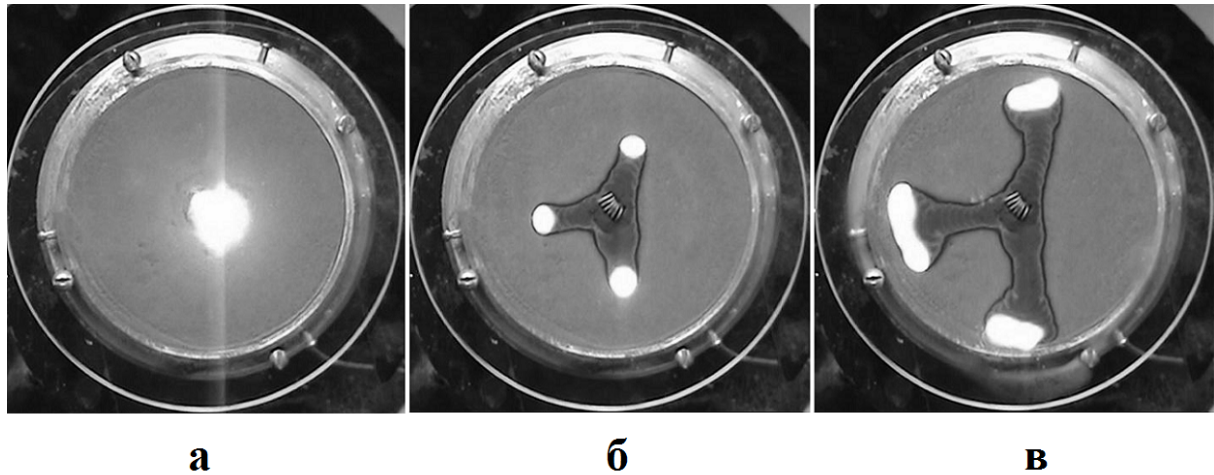


Рис.3. Горение слоя порошка титана в дюралевом блюдец. Время от начала горения в слоя титана под кварцевым стеклом: 14 сек (а), 38 сек (б), 87 сек (в).

Выводы.

Экспериментально и теоретически показано, что в условиях неустойчивости фильтрационного фронта горения пористых образцов цилиндрической формы, когда горение инициируется в центре образца, возможна перестройка устойчивого плоского фронта в ячеистый режим горения. Увеличение фильтрации газа при приближении горения к источнику газа, приводит к перестройке ячеистого фронта в неоднородный режим горения. С уменьшением дефицита газа частота колебаний и скорость распространения ячеистого фронта падают. С уменьшением внешних теплопотерь реализуется обратное горение слоя порошка в ячеистом режиме.

Литература.

- [1] А.П.Алдушин, Б.С.Сеплярский, К.Г. Шкадинский , ФГВ, 16(1), (1980) 36-41.
- [2] Н.И.Озерковская, А.Н.Фирсов, К.Г.Шкадинский, ФГВ, 5, (2010) 28-36.
- [3] С.В.Костин, П.М.Кришеник, Н.И.Озерковская, А.Н.Фирсов, К.Г.Шкадинский ФГВ, 1, (2012) 1-11.
- [4] С.В.Костин, К.Г.Шкадинский, Докл.РАН. 2 (2010) 182-185.
- [5] С.В.Костин, П.М.Кришеник, К.Г.Шкадинский , Хим. физика, 5, (2015) 58-65.