

# КОНКУРЕНЦИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО-И МАССООБМЕНА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ СИСТЕМЫ ЧЕРЕЗ ПРЕГРАДУ

П.М. Кришеник, С.В. Костин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук, Черноголовка, Россия  
[petr@ism.ac.ru](mailto:petr@ism.ac.ru)

В [1-2] показано, что при потере устойчивости плоского фронта горения возможно формирование неоднородных волновых режимов. Неустойчивость плоского фронта отражается на основных закономерностях прохождения горения в многослойных системах, в том числе прохождения через преграду.

В работе проведено экспериментальное исследование перехода горения слоя порошка титана через преграду сложной конфигурации с учетом возможной потери устойчивости плоского фронта. Особенностью исследуемого процесса является наличие конкурирующих процессов тепло и массопереноса, которые определяют характер переходного процесса горения. Изучено влияние газодинамических факторов, структуры волнообразного фронта горения слоя порошка титана и формы инертной преграды на нестационарную динамику переходного процесса горения. Проводится анализ влияния конвективного транспорта горючего компонента в зону реакции и теплопереноса на переходные процессы. Показана возможность оптимизации горения слоевых систем за счёт аккумуляции тепла на границе контакта слоёв. Установлено, что анализ процессов горения в этих условиях позволяет получить методы управления зажиганием и переходными процессами горения пористых слоёв. Инициирование горения за преградой зависит от совокупности факторов: аккумуляции тепла у основания клиновидной преграды имеющей форму тупого угла и достаточного подвода воздушной смеси к этой области.

В качестве модельной системы рассматривалось горение слоя порошка титана с внедрённой поперечной преградой. Горение реализовывалось в воздушной атмосфере при нормальных давлениях. Наличие примеси водорода в исходном порошке титана и примерно одного процента аргона в воздухе позволило рассмотреть лимитирующее влияние скорости газообмена на исследуемый процесс перехода волны горения через фигурную преграду.

При горении горизонтального слоя порошка титана на открытой поверхности, формирование восходящих над высокотемпературной зоной конвективных газовых

потоков стимулирует приповерхностное течение воздуха. Эти течения препятствуют подводу активных газообразных реагентов (кислорода и азота) в зону реакции. Реализуется одно из условий потери устойчивости плоского фронта горения пористых сред – ограниченный подвод газообразных реагентов. В этом случае появляется возможность формирования бифронтальной волновой структуры, когда сразу за фронтом горения наблюдается восходящий прозрачный бесцветный парогазовый поток с образованием слабо окрашенного пламени, под которым прекращается горение слоя порошка. Следом за этой зоной наблюдается вторичный фронт с последующей за ним зоной догорания. Установлено, что формирование двух отдельных зон реакций связано с аккумуляцией атмосферного аргона и выделением водорода из порошка титана, сгорающего в виде прозрачного слабо окрашенного (из-за наличия примесей) пламени над раскалённой поверхностью полупродукта горения порошка.

Первый фронт является встречным набегающему воздушному потоку, а второй фронт – спутный. При встречной фильтрации газа глубина превращения титана в зоне реакции определяется интенсивностью переноса активного газа в зону реакции и скоростью химической реакции. Между ними над поверхностью слоя наблюдался факел с образованием паров воды как результат взаимодействия выделившегося из порошка титана водорода с кислородом воздуха.

Горение во встречном режиме, наличие восходящего парогазового потока над высокотемпературной зоной реакции и продуктов горения приводит к неполноте превращения конденсированной фазы. Нехватка активного газа в зоне реакции и теплотери способствуют потере устойчивости плоского фронта [1-2]. При искривлении плоского фронта ускоренному сгоранию вогнутого участка, получающему большее количество тепла от продуктов горения, препятствует снижение скорости подвода окислителя из-за восходящего потока примесных газов. Напротив, выпуклый выступ ведущего фронта горения имеет лучшие условия для поступления газообразного окислителя, но этому сопутствует и увеличение рассеивания тепла из зоны горения.

Отмеченная особенность протекания тепло-газообмена в зоне экзотермической реакции, формирование “устойчивого” волнообразного фронта в воспламенителе, очевидно, влияет на переход горения через инертную преграду.

При анализа перехода горения через преграду в виде никелевой ленты в форме клина, направленного навстречу фронту показано, что вершина клина из-за

рассеивания тепла, несмотря на лучшие условия газообмена, может оказаться не благоприятной для инициирования зажигания за преградой (для высоко активированной экзотермической реакции) (рис.1).

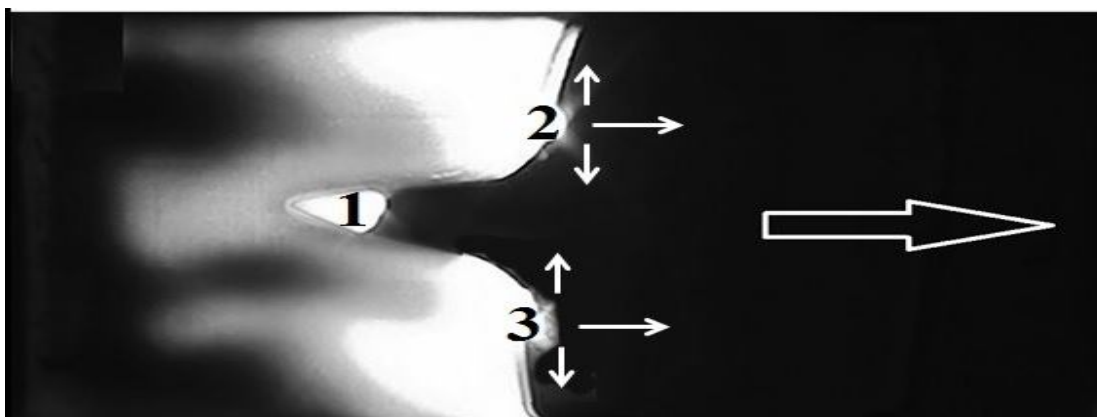


Рис.1. Зажигание и переходной процесс горения. Тонкие стрелки - направление дальнейшего движения распространения горения слоя порошка титана за преградой, толстая стрелка направление общего распространения фронта горения. Тонкие стрелки направление расширения границ очагов.

Установлено, что развитие переходного режима гетерогенного горения зависит от параметров разнонаправленного действия при изменении кривизны преграды или её формы. Как следствие горение за преградой по краям основания клина опережает горение по центру – местоположения острия клина. Горение за преградой распространяется от высокотемпературных очагов вдоль инертной преграды в поджигаемом слое. Зажигание слоя и переходной процесс горения за остриём клинообразной преграды запаздывает из-за блокирования подвода воздуха восходящим потоком парогазовой смеси над боковыми участками с опережающим горением.

При анализе перехода фронта горения порошка титана через фигурную преграду в виде клина направленного по направлению горения показано, что горение внутри клина не достигает его острия, что объясняется рассеиванием тепла. Этот результат качественно совпадает с выводами исследования горения безгазовых систем в клине [3]. Горение слоя титана в этой области лимитируется не подводом воздушной смеси в зону реакции, а теплопотерями в инертную преграду. За преградой горение начиналось от сформировавшихся очагов у основания клина. Наблюдалось опережающее горение вдоль границы клиновидной преграды по прогретому порошку (рис.2).

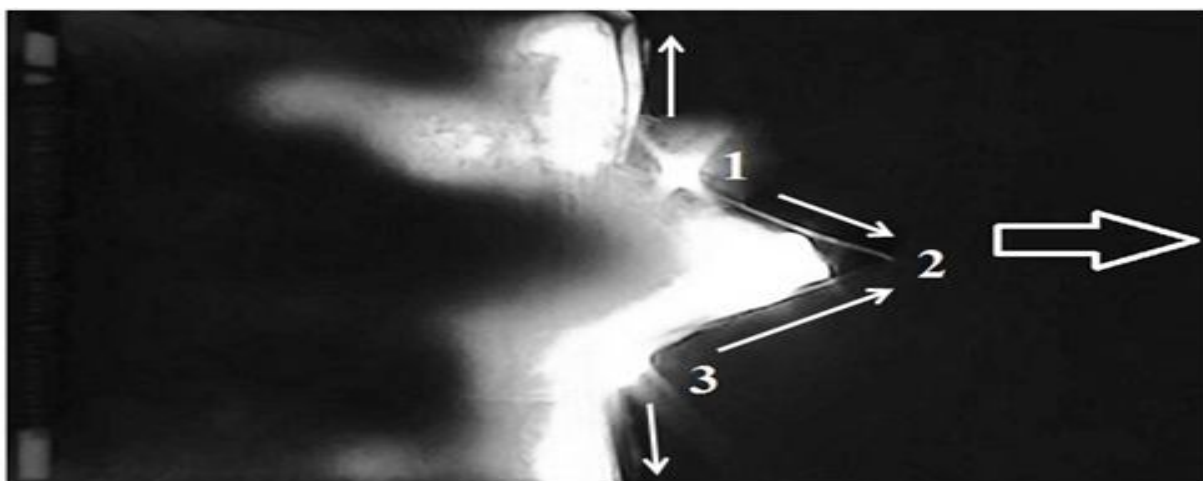


Рис.2. Зажигание у основания клинообразной преграды. Направление распространения горения от очагов вдоль стенок преграды указано тонкими стрелками.

Показано, что инициирование горения за преградой зависит от совокупности факторов: аккумуляции тепла у основания клиновидной преграды имеющей форму тупого угла и достаточного подвода воздушной смеси к этой области. Вершина клина из-за рассеивания тепла, несмотря на лучшие условия газообмена, может оказаться не благоприятной для инициирования зажигания за преградой (для высоко активированной экзотермической реакции).

Показано, что сопоставляя геометрические характеристики элементов преграды и установившейся линии фронта, можно дать прогнозирующие оценки переходного процесса гетерогенного горения слоевой системы. Из результатов опытов следует, что есть, по крайней мере, два оптимальных значения и оба отличны от плоской преграды: один для выступа и один для её впадины, размеры которых подлежат определению. Необходимые характеристики получены из анализа видеозаписи горения слоя титана, начиная со времени установления формы и кривизны фронта. Проведен критериальный анализ оптимальных условий перехода фронта горения через фигурную преграду. Установлено, что модель преграды в виде «клина» применима для оценки устойчивости переходного режима горения. Получен феноменологический критерий для оценки характера переходного режима горения в условиях разрушения плоской структуры фронта. Анализ результатов показывает, что минимальное время зажигания и развитие переходного процесса зависят как от формы инертной преграды, так и фронта. Показано существование значений кривизны выступа и впадины линии фронта, при котором соблюдается оптимальное

соотношение значений передачи тепла кондуктивным механизмом и массообмена в переходном режиме горения.

[1] С.В. Костин, П.М. Кришеник, Н.И. Озерковскя, А.Н. Фирсов, К.Г. Шкадинский, Физика горения и взрыва, 48(1), (2012) 3-13.

[2] С.В. Костин С. В., Кришеник П. М., К.Г. Шкадинский, Физика горения и взрыва, 50(1), (2014) 50-58.

[3] B.V. Stepanov and A.S.Rogachev, Int. J. Self-Propagating High-Temperature. Synth. 1(3), (1992) 409-416.