

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ФРОНТА ГОРЕНИЯ ПОРОШКА ТИТАНА НА ИНЕРТНОЙ ПОДЛОЖКЕ ПЕРЕМЕННОГО СОСТАВА

С.В. Костин*, П.М. Кришеник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук, Черноголовка, Россия
*pert@ism.ac.ru

Для анализа ячеистых волновых структур в режиме естественной фильтрации газа в [1-2] были предложены многомерные математические модели. С помощью численного анализа горения пористых сред были исследованы нестационарные процессы структурированности фронта. В [3-4] была разработана модельная экспериментальная система для анализа неоднородных и ячеистых режимов горения при горении слоя титана в воздухе. Из экспериментальных и теоретических исследований следовало, что в условиях потери устойчивости плоского фронта, дефицита массы активного газа во внутривагетивном пространстве могут устанавливаться различные неоднородные режимы распространения фронта, в том числе ячеистые.

Процесс распространения фронта горения пористых сред в реальных условиях, как правило, происходит в условиях теплопотерь. Фундамент представлений о роли теплопотерь при горении газов и важность его учета при волновом превращении химически активных сред был сформулирован Я.Б.Зельдовичем. Потери тепла при горении безгазовых и пористых сред могут быть обусловлены излучением, конвекцией, кондуктивной теплопроводностью, они вызывают перестройку фронтальных режимов, вплоть до срыва горения, влияют на его устойчивость, являются причиной неполноты превращения [5-6].

В представленной работе исследуются ячеистые и неоднородные режимы горения слоя порошка титана на инертной подложке переменного состава. Исследована устойчивость распространения ячеистого режима горения слоя металла в сквозных и полузамкнутых горизонтально расположенных каналах. Проведен экспериментальный анализ перестройки ячеистых и неоднородных фронтальных структур при переходе фронта горения порошка титана над границей раздела разнородных подложек. Исследовано изменение динамики распространения ячеистых режимов горения в переходной зоне.

Для анализа влияния теплотерь на переходные процессы горения, формирование структуры зоны горения и пределов её распространения в горизонтальных плоских воздушных каналах в условиях естественной конвекции газовой смеси разработана экспериментальная модельная система. Моделью плоского канала является металлическая кювета (рис. 1) длиной $L = 120\text{мм}$, шириной 64мм , и с высотой бортика $H = 9\text{мм}$. На дно металлической кюветы помещается комбинированная инертная подложка, на которой находится тонкий слой порошка титана. Подложка состоит из стальной пластины длиной $L/2 = 60\text{мм}$ и толщиной $\delta = 4\text{мм}$. Эта пластина контактирует с подложкой из слоя оксида такой же длины и высоты. Сверху кювета прикрывалась полированным кварцевым стеклом длиной $l = 100\text{мм}$. При исследовании горения слоя порошка металла в сквозном канале оставляли щели в торцевых частях, а при исследовании горения слоя порошка в полузамкнутом канале оставляли щель у торца противоположному к месту зажигания слоя. После инициирования горения раскаленной спиралью фронт распространялся по поверхности засыпки навстречу источнику газа – к открытой части поверхности слоя порошка титана у противоположного торца канала. Вдоль зазора фильтровалась воздушная смесь, в качестве основных активных компонентов которой рассматривался азот, кислород и пары воды.

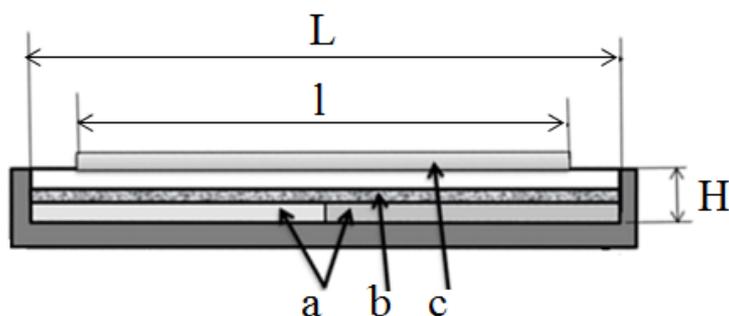


Рис.1. Модель плоского канала: а – комбинированная подложка на дне стальной кюветы, б- слой порошка титана, с – кварцевое стекло: H - высота бортика кюветы, L - длина кюветы, l - длина кварцевого стекла.

Характеристики фронта горения слоя титана, находящегося в контакте с инертной средой, существенно зависят от теплообмена между ними. Из-за значительных теплотерь из слоя титана в инертную подложку фронт горения может искривляться по высоте и становится существенно неодномерным. Из анализа

полученных результатов по горению слоя титана в потоке воздушной смеси на различных инертных подложках следует, что при толщине слоя титана более $\delta = 2\text{ мм}$ формировался непрореагировавший слой порошка на границе контакта с инертными подложками. Формирование такого слоя приводило к тому, что теплообмен с подложками начинал слабо влиять на распространение ячеистого фронта горения. В экспериментах горения в горизонтально расположенных каналах высота слоя порошка титана задавалась не более 2 мм . Согласно оценкам, коэффициенты теплопроводности стали λ_{st} и диоксида титана λ_{ox} отличаются более чем в 10 раз, а отношение тепловых активностей этих материалов $\sqrt{\lambda_{st}\rho_{st}c_{st}}/(\lambda_{ox}\rho_{ox}c_{ox})$ более чем в 3,3 раза. При превышении критической толщины слоя формировался непрореагировавший слой, теплоотвод из зоны реакции и продуктов горения “экранируются” слоем несгоревшего порошка. Из анализа горения термически толстого слоя в безгазовом режиме на инертной подложке получены условия формирования такого слоя через значение параметра ε - нормированное отношение тепловых активностей инертного и горючего веществ [7]:

$$\varepsilon = \sqrt{[E(T_a - T_0)/2RT_a^2](\lambda_{Ti}\rho_{Ti}c_{Ti})/(\lambda_i\rho_i c_i)}$$

, где i индекс инертного материала (сталь или диоксид титана), Ti индекс порошка титана, здесь E - энергия активации химического превращения, T_a - адиабатическая температура горения слоя, T_0 - начальная температура. При $\varepsilon > 1$ фронт горения искривляется, что может привести к формированию непрогоревшего слоя. При $\varepsilon \leq 1$ фронт горения до срыва горения остается плоским. При $\varepsilon \rightarrow \infty$ температура на границе горючего вещества и инертного слоя стремиться к T_0 .

При горении пористых сред в фильтрационном режиме формирование непрореагировавшего слоя связано не только с теплопотерями в подложку, но и с процессами фильтрации газа в зону реакции внутрь слоя порошка. Учитывая фильтрационные затруднения, в [8] представлены результаты теоретического анализа перехода послойного горения слоя порошка в поверхностный режим. В таких системах существует критическая толщина слоя δ_f^* , при превышении которой формируется поверхностный режим горения: $\delta_f^* \sim k_f P_0^2 / V$, где k_f - пористость смеси, P_0 - внешнее давление газа, V - скорость распространения фронта.

Инертные газовые компоненты и примесные газы, в основном аргон и водород, аккумулируется в окрестности реакционной зоны, препятствуя фильтрации воздушной смеси [9-10]. На рис. 2 представлено горение слоя титана в сквозном канале в ячеистом режиме, который сформировался при потере устойчивости фронта в условиях дефицита активного газа в зоне реакции. Первую половину площади кюветы занимала подложка из стали, а вторую половину – подложка из диоксида титана. Горение слоя порошка титана инициировалось на стальной подложке.

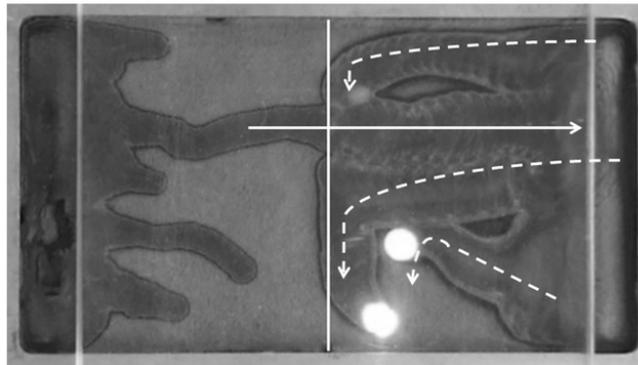


Рис.2. Ячеистый режим горения слоя порошка титана при переходе со стальной на оксидную подложку. Вертикальная линия - граница раздела подложек, пунктирные линии со стрелкой - направление движения ячеек.

Теплопотери и торможение фильтрационного газопереноса активных компонентов воздушной смеси в глубь слоя приводили к потере устойчивости плоского фронта и формированию ячеистых структур. При горении слоя порошка на стальной части комбинированной подложки, уже на этапе зажигания происходило формирование высокотемпературных очагов горения. В условиях дефицита активного газа в зоне реакции и теплопотерь “выживала” единственная ячеистая структура. Направление движения ячейки указано сплошной линией со стрелкой. При распространении ячейки над металлической частью комбинированной подложки, значительный теплоотвод из нижних слоев титана и фильтрационные затруднения переноса газа вглубь слоя приводили к тому, что титан сгорал не на всю толщину слоя. В непрореагировавшем прогревом порошке металла выделившийся водород частично растворялся [11], концентрация его в газовом зазоре и порах уменьшалась, что обеспечивало приток активного газа в зону реакции. Средняя скорость распространения ячеистого фронта составляла 1.1мм/с , частота колебаний ячейки 0.92с^{-1} . С приближением ячейки к границе контакта разнородных частей

комбинированной подложки потери тепла из-зоны реакции уменьшаются. Наблюдается устойчивый переход ячейки горения со стальной подложки на оксидную, при этом размер зоны реакции ячейки, распространяющейся над диоксидной подложкой увеличился. Несмотря на уменьшение теплопотерь в подложку, средняя скорость распространения ячеистого фронта уменьшилась до 0.44мм/с . Колебательный характер распространения ячеистого фронта сохранялся, частота пульсаций ячеистой волны на диоксидной подложке снижалась до 0.23с^{-1} . После достижения открытого края слоя порошка титана наблюдалось возвратное горение, направление движения ячеек обозначено пунктирными линиями со стрелкой. Однако повторного пересечения границы подложек в обратную сторону не наблюдалось из-за относительно высоких теплопотерь в стальную подложку. Либо происходило потухание, либо догорание части слоя, лежащего на диоксидной подложке в виде блуждающей ячейки по непрореагировавшей области порошка титана.

Аналогичный результат наблюдался при распространении горения со стальной части комбинированной подложки на оксидную часть в полузамкнутых каналах.

При иницировании горения на подложке из диоксида титана в сквозном или полузамкнутом канале горения формировался ячеистый режим горения (рис. 3). При приближении ячеистой волны к границе контакта наблюдалась перестройка структуры ячеистого фронта, но переход горения порошка титана на металлическую подложку не реализовался. В этом случае происходило потухание ячейки на границе подложек (рис. 3а), либо разворот и продолжение горения слоя титана на оксидной подложке в виде блуждающей ячейки (рис. 3б).

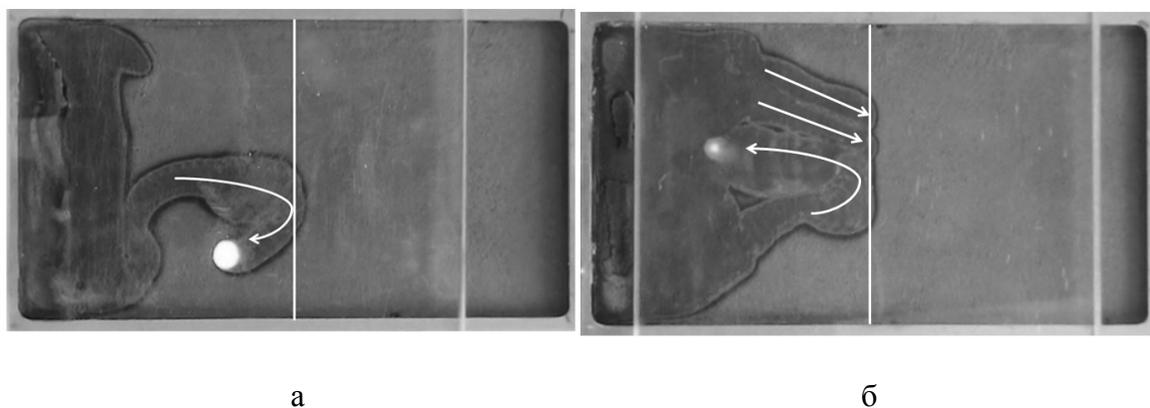


Рис.3. Ячеистый режим горения слоя порошка титана при переходе с подложки с диоксида титана на стальную подложку. канал (а) полузамкнутый, (б) сквозной.

Вертикальная линия - граница раздела подложек, линия со стрелкой направление движения ячейки.

Выводы.

Рост теплотерь и ограничение фильтрации реакционно-способного газа - факторы приводящие к потери устойчивости горения, формированию неоднородного и ячеистого режима горения.

Уменьшение теплотерь приводит к падению скорости распространения ячеистого горения при одновременном росте интенсивности химического взаимодействия порошка титана с воздушной смесью. При распространении ячеистого фронта горения слоя титана на комбинированной подложке возможен срыв волны горения при подходе фронта к границе подложки с большей тепловой активностью, а также разворот и продолжение горения в ячеистом режиме по непрореагировавшей части порошка. Переход ячеистого фронта слоя порошка титана над границей подложек приводит к перестройке структуры ячеистого фронта, изменению толщины реагирующего слоя, скорости фронта, автоколебательных характеристик распространения ячеистых структур.

Существует критическая толщина слоя порошка титана, когда участие в реакции газообразных компонентов разной активности, теплотери в инертную подложку, фильтрационный газообмена определяют не только полноту реакции, но и химический состав образующегося продукта.

Литература

- [1] А.Н.Фирсов, Н.И.Озерковская, К.Г. Шкадинский, ФГВ, 46(4), (2010) 3-12.
- [2] Н.И.Озерковская, А.Н.Фирсов, К.Г. Шкадинский, ФГВ, 46(5), (2010) 28-36
- [3] С.В.Костин, К.Г.Шкадинский, ДАН РАН, 55(11), (2010) 182-185.
- [4] С.В.Костин, П.М.Кришеник, Н.И.Озерковская, А.Н.Фирсов, К.Г. Шкадинский, ФГВ, 48(1), (2012) 1-9.
- [5] А.П.Алдушин, Б.С.Сеплярский, К.Г. Шкадинский, ФГВ, 16(1), (1980) 36-41.
- [6] С.В.Костин, П.М.Кришеник, К.Г.Шкадинский, ФГВ, 50(1), (2014) 3-12.
- [7] С.С.Рыбанин, С.Л.Соболев ФГВ, 25(5), (1989) 16-25.
- [8] А.В.Грачев, Т.П.Ивлева, ФГВ, 35(2), (1999) 16-22.
- [9] К.Г.Шкадинский, Н.И.Озерковская, П.М.Кришеник, ФГВ, 43(3), (2007) 35-41.
- [10] П.М.Кришеник, С.А.Рогачев, К.Г.Шкадинский, Химическая физика, 33(3), (2014) 52-61.

- [11] S.L.Kharatian, E.V.Aghababyan, A.G.Merzhanov, *Archiv. Combust.*, 5(1), (1985) 3-33.