

# **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](mailto:pert@ism.ac.ru)

Для анализа ячеистых волновых структур в режиме естественной фильтрации газа были предложены многомерные математические модели [1–2]. С помощью численного анализа горения пористых сред были исследованы нестационарные процессы структурированности фронта. Разработана модельная экспериментальная система для анализа неоднородных и ячеистых режимов горения при горении слоя титана в воздухе [3–4]. Результаты экспериментальных и теоретических исследований показали, что в условиях потери устойчивости плоского фронта, дефицита массы активного газа во внутривыводном 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 длиной  $L = 120\text{мм}$ , шириной  $64\text{мм}$  и высотой бортика  $H = 9\text{мм}$  (рис. 1). 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.

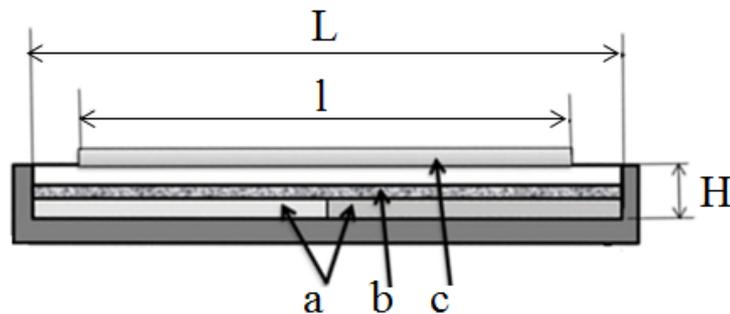


Рисунок 1. Модель плоского канала: а – комбинированная подложка на дне стальной кюветы, б – слой порошка титана, с – кварцевое стекло:  $H$  – высота бортика кюветы,  $L$  – длина кюветы,  $l$  – длина кварцевого стекла.

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 не одномерным. 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  $2\text{ мм}$ . Согласно оценкам, коэффициенты теплопроводности стали  $\lambda_{st}$  и диоксида титана  $\lambda_{ox}$  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  $\varepsilon$  – 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 стремится 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  $\delta_f^*$ , 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, аккумулируются в окрестности реакционной зоны, препятствуя фильтрации воздушной смеси [9–10]. На рисунке 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.

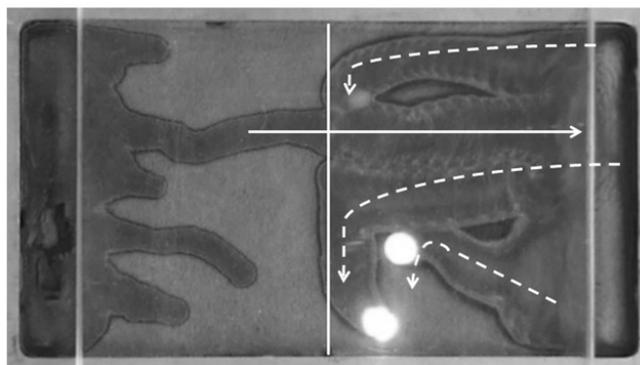


Рисунок 2. Ячеистый режим горения слоя порошка титана при переходе со стальной на оксидную подложку. Вертикальная линия – граница раздела подложек, пунктирные линии со стрелкой – направление движения ячеек.

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  $1.1 \text{ мм/с}$ , частота колебаний ячейки  $0.92 \text{ с}^{-1}$ . 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  $0.44\text{ мм/с}$ . Колебательный характер распространения ячеистого фронта сохранялся, частота пульсаций ячеистой волны на диоксидной подложке снижалась до  $0.23\text{ с}^{-1}$ . 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.

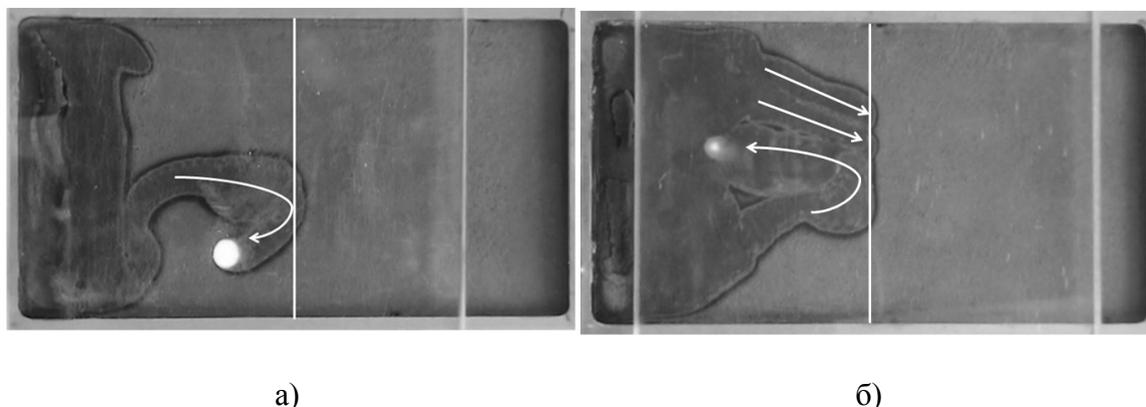


Рисунок 3. Ячеистый режим горения слоя порошка титана при переходе с подложки из диоксида титана на стальную подложку: а) полузамкнутый канал, б) сквозной канал. Вертикальная линия – граница раздела подложек, линия со стрелкой – направление движения ячейки.

При инициировании горения на подложке из диоксида титана в сквозном или полузамкнутом канале 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).

## **Выводы.**

Рост теплотерь и ограничение фильтрации реакционно-способного газа – факторы, приводящие к потере устойчивости горения, формированию неоднородного и ячеистого режимов 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 порошка 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 горения 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, теплотерь в инертную подложку, фильтрационного 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, 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.