

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 544.452 : 544.427

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПОТЕРЬ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЯЧЕИСТЫХ ВОЛН ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ СЛОЯ ПОРОШКА ТИТАНА

© 2022 г. П. М. Кришеник^{1*}, С. В. Костин¹, С. А. Рогачев¹

¹Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова
Российской академии наук, Черноголовка, Россия

*E-mail: petr@ism.ac.ru

Поступила в редакцию 02.06.2021;
после доработки 03.09.2021;
принята в печать 20.09.2021

В представленной работе экспериментально исследовалось неустойчивое распространение горения слоя порошка титана в горизонтальных и наклонных каналах в условиях естественной фильтрации газа. Проведен анализ критических условий срыва и перестройки режимов горения при скачкообразном изменении теплопотерь при горении слоя на инертной подложке переменного состава. Изучено влияние конвективного отвода примесных и инертных газов на процессы прохода фронта горения над границей разнородных подложек. Дана трактовка полученных результатов в рамках модели теплофильтрационной устойчивости горения пористых сред.

Ключевые слова: переходные режимы, горение титана, ячеистые волны, устойчивость горения, фильтрационный фронт.

DOI: 10.31857/S0207401X22030086

ВВЕДЕНИЕ

Исследование неоднородных пространственных структур, формирующихся при фильтрационном горении реакционноспособных пористых сред, имеет фундаментальное теоретическое и прикладное значение. При анализе горения целлюлозы в потоке газа [1] были обнаружены фронтальные структуры пальцеобразной конфигурации. Для теоретического обоснования этого явления в работе [2] была предложена двумерная теплодиффузионная модель горения свободной поверхности конденсированной фазы, контактирующей со встречно перемещающимся газом. В работах [3, 4] развивалась гипотеза о гидродинамической природе формирования пальцеобразных структур при горении двухфазных сред. Предполагалось, что в результате горения существенно изменялись проницаемость и теплофизические параметры. Формирование и распространение очагов режимов при потере устойчивости плоского фронта горения октогена было исследовано в [5]. В работе [6] изучалось влияние теплового взрыва очагов в прогретом слое при переходе к очагово-пульсирующему режиму горения в гомогенных энергетических материалах. Получен безразмерный критерий перехода к пульсирующему режиму.

Для анализа инициирования и распространения ячеистого фронта при горении пористых сред в режиме естественной фильтрации газа в работах

[7, 8] были предложены многомерные математические модели горения в предположении постоянной проницаемости пористого образца. В рамках теплофильтрационной модели получены условия формирования и распространения ячеистого горения гетерогенных сред, разработан визуально доступный способ экспериментального исследования распространения ячеистых структур при горении слоя порошка титана. Экспериментально подтверждены выводы теоретического исследования, показавшего, что в условиях нехватки газового реагента в зоне реакции при потере устойчивости плоского фронта горения формируются ячеистые структуры, распространяющиеся в колебательном режиме. Установлено, что ячеистые режимы горения пористых сред формируются, когда давление газа в процессе горения изменяется незначительно, т.е. в квазиизобарических условиях переноса газа. В работе [9] для анализа горения таких систем была предложена математическая модель горения пористых сред при фильтрации многокомпонентного газа в зону гетерогенной реакции. Изучено влияние инертного газа на структуру фронта и устойчивость горения. В работах [10, 11] экспериментально изучено влияние инертных и примесных газов на формирование и распространение неоднородных и ячеистых волн горения слоя порошка титана

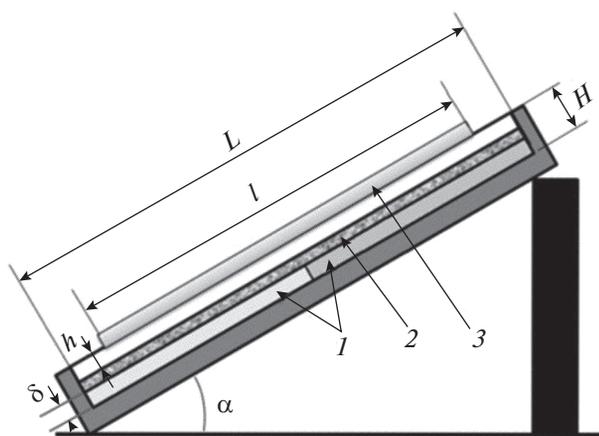


Рис. 1. Модель плоского канала: 1 – комбинированная подложка на дне стальной кюветы, 2 – слой порошка титана, 3 – кварцевое стекло; H – высота бортика кюветы, L – длина кюветы, l – длина кварцевого стекла, h – высота воздушного зазора, δ – толщина подложек.

при естественной фильтрации воздуха в зону реакции.

Горение гетерогенных систем в реальных условиях, как правило, происходит в условиях теплопотерь. Потери тепла могут быть обусловлены излучением, конвекцией, кондуктивной теплопроводностью; они могут вызывать перестройку структуры фронта или срыв горения, являются причиной неполноты превращения при горении пористых сред [12]. Численный анализ зависимости структуры фильтрационного ячеистого фронта от теплопотерь представлен в работах [13, 14]. Влияние гравитационных сил на горение порошка металла в наклонном сквозном канале изучалось в работе [15], где было показано, что свободно-конвективные потоки газа влияют на устойчивость плоского фронта горения, формирование и распространение ячеистых волн.

В данной работе исследовано горение слоя порошка титана при скачкообразном изменении теплоотовода из зоны реакции при проходе волны над границей инертных подложек с разными теплофизическими свойствами. Проведен анализ устойчивости распространения ячеистого режима горения слоя порошка титана на смежных подложках в полужамкнутых горизонтально расположенных и наклонных каналах при фильтрации воздушной смеси в зону горения. Исследовано влияние гравитационных сил на переход фронта горения над границей разнородных подложек.

Работа имеет как научный (исследование неоднородных и ячеистых волновых структур горения слоя порошка титана и условий их существования), так и практический интерес (изучение условий увеличения полноты реагирования и по-

лучения продуктов однородного или переменного состава).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование влияния теплопотерь на процессы фильтрационного горения, формирование структуры зоны горения, пределов ее распространения проведено на примере горения слоя порошка титана, который помещался в прямоугольную металлическую кювету длиной $L = 120$ мм, шириной 64 мм и высотой бортика $H = 9$ мм (рис. 1). На дно металлической кюветы помещалась комбинированная инертная подложка, на которой находился тонкий слой порошка титана. Часть подложки состояла из стальной пластины длиной $L/2 = 60$ мм и толщиной $\delta = 4$ мм, которая контактировала с другой частью подложки из слоя оксида титана такой же длины и высоты. Сверху кювета прикрывалась полированным кварцевым стеклом длиной $l = 100$ мм. Фильтрация воздушной смеси, поступающей извне, происходила вдоль щели между слоем титана и прозрачным кварцевым стеклом, расположенным параллельно слою порошка титана.

При изучении влияния внешних теплопотерь и гравитационных сил на процессы горения кювета располагалась под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту (рис. 1). Полученные результаты сравнивались с результатами горения слоев порошка титана в горизонтально расположенных кюветах ($\alpha = 0^\circ$). Длина кварцевого стекла определяла длину плоского сквозного канала. Для свободного газообмена с окружающей воздушной средой в торцах канала оставляли щели шириной 10 мм. Температура окружающей среды изменялась в пределах $(22 \pm 5)^\circ\text{C}$, абсолютная влажность воздуха составляла $\sim(5 \pm 15)$ г/м³. Горение инициировалось у открытой части канала раскаленной спиралью с керамическим сердечником. После инициирования горения фронт распространялся по поверхности засыпки. Высота канала и интенсивность химического поглощения газа в гетерогенной реакции определяли скорость его подвода в зону реакции. В работах [7, 8, 10] доказано, что в такой системе скорость потока газа в канале пропорциональна градиенту его давления и квадрату величины зазора и описывается законом Дарси или его модификацией [16]. В рассматриваемом случае в процессе горения фильтровалась воздушная смесь, содержащая активные компоненты (азот, кислород и пары воды). При комнатной температуре поверхность титана защищена тонким слоем оксида титана. При температуре $450\text{--}500^\circ\text{C}$ эта пленка начинает растворяться в металле и титан начинает активно взаимодействовать с воздушной смесью. Заметное поглощение азота начинается уже при температурах $500\text{--}550^\circ\text{C}$.

При температуре выше 600°C скорость реакции резко увеличивается, после чего титан уже активно реагирует с кислородом. Температура в 820°C соответствует области перехода кинетической зависимости окисления титана кислородом от параболического закона к линейному, что соответствует усилению процесса окисления при температуре ~800°C [17].

При горении титана в воздушной среде необходимо также учитывать, что пары воды, содержащиеся в воздухе, являются поставщиком водорода в зону реакции. Титан реагирует с парами воды при разных температурах (в диапазоне нескольких сотен градусов в зависимости от условий): $Me + H_2O = Me_nO_m + [H]_{Me} + H_2$. При этом образуется более рыхлая пленка, что увеличивает скорость реакции. Растворимость водорода в жидком титане больше, чем в твердой фазе, но с понижением температуры она резко падает, и водород выделяется из раствора.

Воздух в зону реакции будет непрерывно поступать только при поглощении водорода конденсированной фазой. В зоне реакции азот и кислород воздушной смеси вытесняют водород из верхней части слоя порошка титана. Водород из зоны реакции и водород, образовавшийся при взаимодействии водяных паров с титаном, проникает в глубину слоя порошка, в поры и частицы недогоревшего титана, где отсутствуют продукты взаимодействия титана с азотом и кислородом. Водород растворяется в порошке титана до тех пор, пока его концентрация не достигнет равновесного значения для данных величин температуры и давления в газовой фазе [18]. В результате обеспечиваются приток воздушной смеси в зону реакции и горение титана в фильтрационном режиме. При горении слоя порошка титана изменяются соотношения компонент газовой смеси в зоне реакции на поверхности и в глубине пористого слоя.

Конкретные условия тепломассопереноса в данном эксперименте влияли на следующие характеристики процесса горения титана на воздухе: скорость, температуру и устойчивость горения, состав продуктов, полноту превращения. В условиях нехватки активного газа в зоне реакции конечные продукты горения имели слоистое строение. Как правило, в верхней части слоя титана продуктами горения были оксиды титана, а в глубине слоя — нитриды титана.

При горении безгазовых систем теплоотвод в подложку приводили к искривлению реакционной зоны, фронт становился существенно неоднородным. Глубина превращения конденсированной компоненты на границе контакта с подложкой падала, появлялся непрореагировавший слой исходного вещества [19].

При горении пористых сред в фильтрационном режиме формирование непрореагировавшего слоя связано как с теплоотводом в подложку, так и процессами фильтрации активного газа в зону реакции. Накопление примесных и инертных газов в продуктах горения и в зоне реакции затрудняет перенос газа в глубь слоя. В таких системах существует критическая величина толщины слоя порошка δ , при превышении которой в процессе волнового превращения пористый слой не выгорает на всю глубину. Она зависит от перепада давления на границе контакта слоя с подложкой и внешней средой, т.е. от градиента давления газа по толщине слоя: $\delta_f \sim k_f (P_0 - P_i)^2 / V$, где k_f — пористость смеси, P_0 — внешнее давление газа, P_i — давление инертных и примесных газов в зоне реакции на границе контакта слоя титана с подложкой, V — скорость распространения фронта [20]. Таким образом, существуют два конкурирующих фактора, влияющих на формирование непрореагировавшей части слоя.

При горении слоя в горизонтально расположенном канале ($\alpha = 0^\circ$) и высоте воздушного зазора $h > 4$ мм формировался устойчивый поверхностный фронт. От величины h зависела интенсивность подвода газовой смеси в зону реакции. При меньших толщинах зазора нехватка активного газа в зоне реакции в процессе горения приводила к потере устойчивости плоского фронта и распаду его на отдельные ячейки. Из анализа результатов опытов по горению титана в потоке воздушной смеси следует, что при толщине слоя более 2 мм часть порошка титана, примыкающая к подложке, не догорала.

На рис. 2 представлен ячеистый режим горения слоя порошка титана в сквозном горизонтальном канале при переходе горения со стальной на оксидную подложку. Уже на этапе зажигания нехватка активного газа приводила к распаду плоского фронта на высокотемпературные очаги. Направление движения ячеек указано сплошной линией со стрелкой. В эксперименте толщина слоя засыпки составляла 2 мм, толщина инертных подложек $\delta = 4$ мм, высота зазора $h = 3$ мм. В условиях теплопотерь и дефицита активного газа осталась единственная ячейка (часть ячеек погасла). Толщина слоя непрореагировавшего титана под ячейкой составляла примерно половину высоты исходного слоя (~1 мм). Непрореагировавшая часть пористого слоя снижала скорость теплоотвода из зоны реакции в подложку. Средняя скорость ячеек на металлической подложке $V = 1.1$ мм/с, а частота их колебаний $\nu = 0.92$ с⁻¹. Для рассматриваемой системы наблюдался проход ячеистой волны над границей раздела стальной и оксидной подложек.

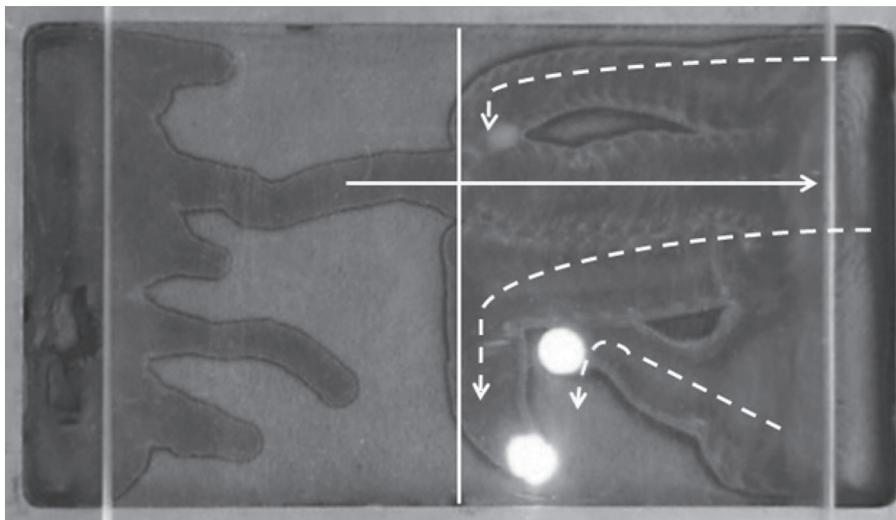


Рис. 2. Ячеистый режим горения слоя порошка титана при переходе со стальной подложки на оксидную в горизонтальной кювете ($\alpha = 0^\circ$). Вертикальная белая сплошная линия – граница раздела подложек, линии со стрелками – направление движения ячеек. Толщина слоя порошка – 2 мм, воздушный зазор $h = 3$ мм, толщина подложек $\delta = 4$ мм.

Фронт горения слоя порошка на диоксидной подложке сохранял ячеистую структуру. Скорость распространения волны на подложке из оксида титана уменьшалась примерно в 2 раза и составляла $V \approx 0.44$ мм/с, размер ячейки значительно увеличивался. Снижение скорости фронта связано с ростом интенсивности взаимодействия титана с воздушной смесью с уменьшением теплотеря. Концентрация инертного газа, в основном аргона, в окрестности зоны горения увеличивалась, что затрудняло фильтрационный перенос газа внутрь слоя. Рентгеноструктурный анализ продуктов горения показал, что на диоксидной подложке в верхней части горячего слоя образовывался оксинитрид титана, в нижней – нитрид титана. Колебательный характер распространения фронта сохранялся, частота пульсаций ячеек снижалась до $\nu = 0.23$ с $^{-1}$. После достижения открытого края слоя титана наблюдалось возвратное горение, направление движения ячеек обозначено штриховыми линиями со стрелками. Однако повторного пересечения границы подложек в обратную сторону не наблюдалось. Происходило потухание либо догорание части слоя, лежащего на диоксидной подложке, в виде блуждающей ячейки.

На металлической подложке продукт горения также имел слоистую структуру. Верхний спекшийся пористый слой остывшего продукта состоял из оксидов, а слой под ним – из оксинитридов и нитридов титана. Из-за возросших теплотеря горение характеризовалось недогоранием части слоя, которая контактирует с подложкой.

Когда ячеистая волна горения в экспериментах вначале инициировалась на оксидной подложке, проход горения титана над стальной под-

ложкой не происходил (рис. 3). В этом случае наблюдались разворот и продолжение горения слоя титана на оксидной подложке.

При увеличении высоты зазора до 4 мм распространялся устойчивый поверхностный фронт. Проход волны над границей контакта подложек происходил без изменения ее характеристик. Средняя скорость сплошного фронта достигала значения $V \approx 4.5$ мм/с, что на порядок выше скорости ячеистой волны. Конечные продукты горения в этом режиме также имели слоистую структуру, но титан прогорал на глубину не более 0.3 мм. Верхний спекшийся пористый слой остывшего продукта состоял преимущественно из твердого ненасыщенного раствора кислорода в α -титане с вкраплениями оксинитрида и нитрида титана. Ниже располагался слой пористого нитрида титана, еще ниже – слой непрореагировавшего порошка титана. Слоистая структура продукта связана со стадийным характером взаимодействия компонентов воздушной смеси с металлическим порошком титана и наличием обратимых реакций, связанных с адсорбцией и десорбцией газообразных примесей, препятствующих фильтрации активных газовых реагентов в зону реакции.

ГОРЕНИЕ СЛОЯ ТИТАНА В НАКЛОННОМ КАНАЛЕ НА КОМБИНИРОВАННОЙ ПОДЛОЖКЕ

Для исследования переходных режимов горения слоя порошка металла с учетом гравитационных сил использовалась наклонная кювета ($\alpha = 30^\circ$). В эксперименте использовался слой порошка титана толщиной 3 мм. В некоторых опытах в каче-

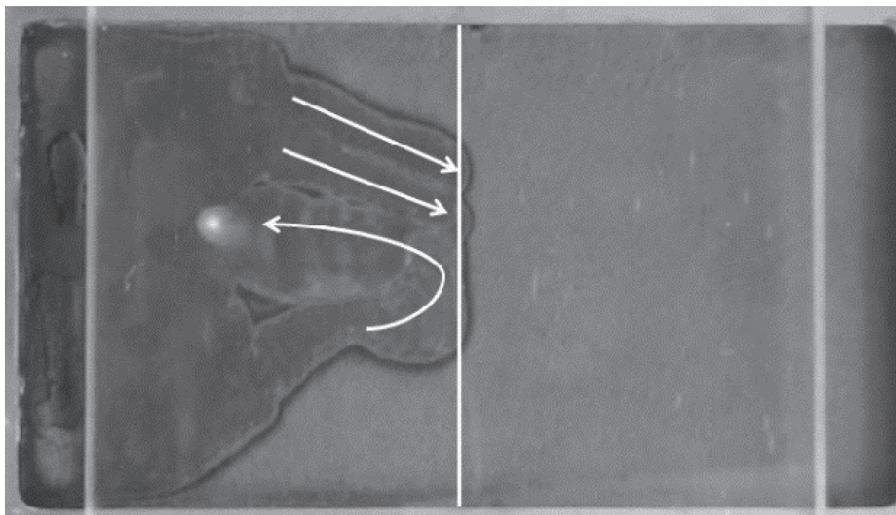


Рис. 3. Ячеистый режим горения слоя порошка титана при отсутствии перехода горения титана с подложки из оксида титана на стальную. Белая вертикальная линия – граница раздела подложек, штриховые линии со стрелками – направление движения ячеек. Толщина слоя порошка – 2 мм, воздушный зазор $h = 3$ мм, толщина подложек $\delta = 4$ мм.

стве датчиков движения газа в процессе горения использовались хлопчатобумажные нити длиной ≈ 10 мм, помещенные на поверхность слоя. Движение нити и продуктов ее горения (дыма) указывали направление и приблизительную скорость потока газа в зазоре. При распространении горения слоя титана снизу вверх в сквозном канале на комбинированной подложке порошок загорелся у нижнего открытого торца. На рис. 4, 5 представлены фотоколлажи зон горения наклонной поверхности слоя порошка титана в различные моменты времени. Стрелки указывают позиции зон горения в различные моменты времени. При воздушном зазоре высотой $h = 4$ мм на стальной подложке формировался сплошной неоднородный фронт (рис. 4а). Направление газовых потоков в щели на этом этапе определялось по направлению движения нитей, расположенных на поверхности слоя порошка, и по направлению дыма, образующегося при сгорании нитей. Фильтрационный поток воздуха извне был направлен вдоль щели вслед движущемуся фронту горения, т.е. реализовался спутный режим фильтрации. Прогретые инертный и примесные газы “выносились” в область перед фронтом горения – верхнюю часть канала. Установившийся фронт состоял из очагов, соединенных между собой участками с менее интенсивным свечением. Средняя скорость распространения фронта по оси кюветы равнялась $V \approx 0.53$ мм/с.

После прохода волны горения над границей разнородных подложек происходила перестройка структуры волны. Формировался углообразный форма сплошной фронт с вершиной, направленной вниз (рис. 4а). Формирование фронта с боль-

шой кривизной создавало благоприятные условия переноса газового реагента в выпуклую часть фронта. Это приводило к повышению температуры в зоне реакции, которая в этом случае протекала с большей степенью и глубиной окисления слоя порошка как раз в вершине дуги. На соседнем, относительно “холодном” участке реакция прекратилась из-за теплопотерь в подложку и кинетического торможения по мере окисления порошка титана. Как и при горении слоя титана в горизонтальной кювете, наблюдалось снижение скорости распространения фронта на диоксидной подложке до $V \approx 0.3$ мм/с. Такое поведение скорости связано с ростом концентрации инертного газа в окрестности и в зоне горения из-за возросшего потребления газообразного окислителя. При этом увеличилась полнота превращения при снижении теплопотерь в подложку. Прореагировавший слой на диоксидной подложке состоял из оксидов и оксинитридов титана. Порошок титана в этой области реагировал на всю глубину слоя.

Уменьшение высоты зазора до $h = 3$ мм привело к падению скорости как фильтрационного потока газа вдоль щели в процессе горения, так и скорости течения инертных и примесных газов из зоны реакции и продуктов, что зафиксировано в виде движения кусочков нитей в потоке газа. Это отражалось на режимах горения слоя титана на комбинированной подложке из стали и диоксида титана. В первой половине воздушного канала на стальной подложке формировался ячеистый режим горения, осевая скорость которого составляла $V \approx 0.45$ мм/с (рис. 4б). Продукт горения имел многослойную структуру: внизу – недогоревший порошок титана, выше – слой нитрида титана,

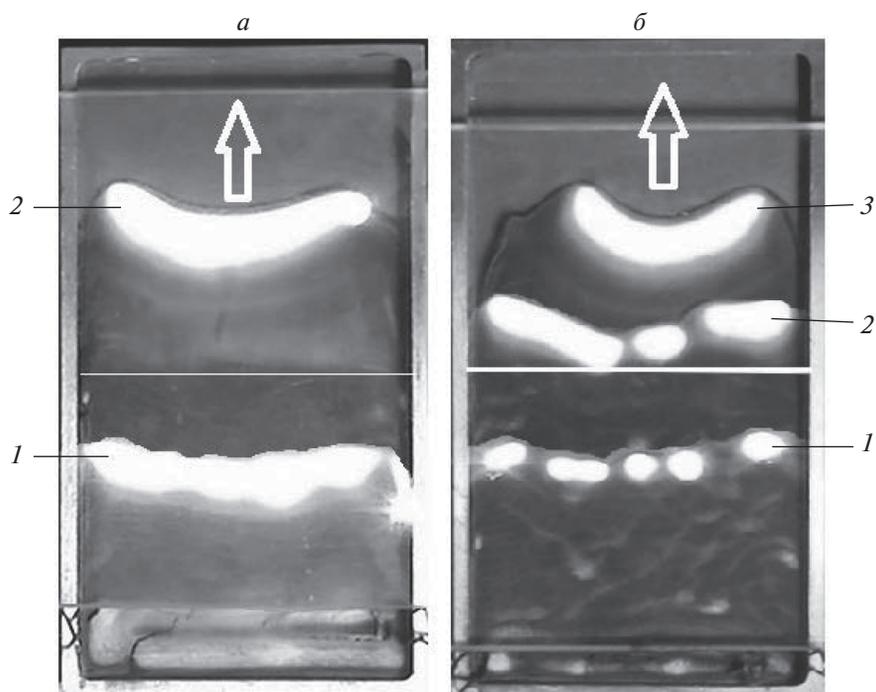


Рис. 4. Фотоколлаж зон горения слоя порошка титана при переходе фронта со стальной подложки на оксидную в наклонном воздушном канале; угол $\alpha = 30^\circ$, толщина слоя титана – 3 мм, толщина инертных подложек $\delta = 4$ мм. Стрелки по центру слоев – направление горения, стрелки слева и справа – позиции зоны горения в моменты времени от начала горения снизу вверх в плоском канале: *а* – воздушный зазор $h = 4$ мм, 1 – 66 с, 2 – 174 с; *б* – $h = 3$ мм, 1 – 85 с, 2 – 127 с, 3 – 213 с.

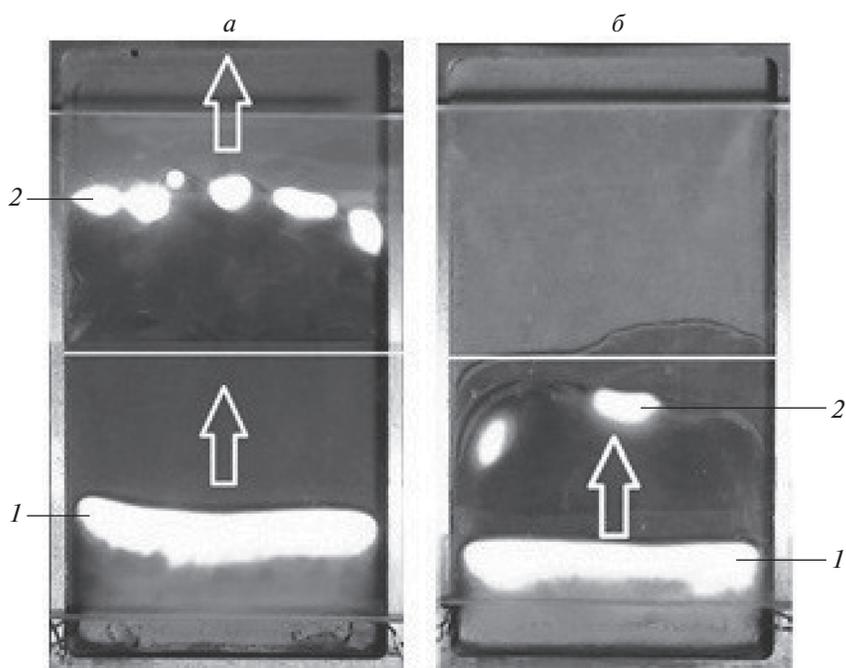


Рис. 5. Фотоколлаж зон горения при переходе горения с подложки из оксида титана на стальную подложку. Толщина слоя титана – 3 мм, толщина подложек $\delta = 4$ мм. Стрелки по центру слоев – направление горения, стрелки слева и справа – позиции зоны горения в моменты времени от начала горения снизу вверх: *а* – $h = 4$ мм, 1 – 48 с, 2 – 219 с; *б* – $h = 3$ мм, 1 – 45 с, 2 – 235 с.

еще выше – слой оксинитрида титана, и, наконец, верхний слой, покрытый серыми и желтыми частицами оксидами титана с разной глубиной превращения: TiO_2 и Ti_3O_2 .

После прохода горения над границей раздела подложек формировались ячеистые структуры (рис. 4б). В дальнейшем ячейки разрастались и сливались в сплошную, но неоднородную дугу. Средняя осевая скорость горения на диоксидной подложке составила $V \approx 0.27$ мм/с. В продуктах горения заметно преобладали оксиды титана разной степени окисления, что является следствием длительного участия кислорода воздуха в экзотермической реакции при горении на диоксидной подложке (по сравнению со стальной). Это ожидаемо приводило к уменьшению содержания нитридов титана в продуктах горения. Можно сделать вывод, что зависимость естественно-конвективного течения газа в наклонных каналах от положения фронта горения порошка металла и изменение теплопотерь после прохода фронта над границей контакта разнородных подложек приводят к перестройке структуры зоны реакции и изменению состава продуктов горения.

При зажигании горения слоя титана на диоксидной подложке ($h = 4$ мм) в нижней половине воздушного канала формировался сплошной устойчивый фронт горения без признаков неоднородности (рис. 5а). Средняя осевая скорость прохождения фронта горения составляла $V \approx 0.35$ мм/с. После перехода горения на слой порошка титана на стальной подложке фронт “разваливался” на ячейки. Перед открытым концом воздушного канала на расстоянии ≈ 0.1 см ячейки увеличивались и сливались в сплошной неоднородный фронт. Средняя осевая скорость распространения ячеек вдоль канала после перехода на стальную подложку составляла $V \approx 0.4$ мм/с.

На диоксидной подложке при высоте зазора $h = 4$ мм в нижней половине воздушного канала слой порошка сгорал на всю глубину с образованием в основном оксидов титана, чему способствовали благоприятные для этого условия реакции: активная подача воздуха путем конвекции вверх по наклонному каналу и относительно невысокие теплопотери в подложку из диоксида титана. На стальной подложке продукт горения имел разноцветную слоистую структуру: спекшийся серо-фиолетовый “сэндвич” из оксидов, оксинитридов и нитридов титана, а под слоем продукта – несгоревший порошок титана. Практическое отсутствие в составе продукта диоксида титана соответствует представлениям, что при прерывании экзотермической реакции порошка титана с воздушной смесью можно отсечь процесс окисления порошка титана кислородом, и это не дает вытеснить азот из продукта реакции. Фактически так и происходило при увеличении теплоотвода в под-

ложку и при уменьшении подвода газовой смеси с уменьшением воздушного зазора.

Уменьшение воздушного зазора до $h = 3$ мм приводило к тому, что на диоксидной подложке в нижней половине воздушного канала формировался не сплошной однородный фронт горения, а выраженный неоднородный с последующим его дроблением на ячейки (рис. 5б). Горение прекращалось над границей контакта разнородных подложек (сплошная линия на рис. 5б), чему способствовало увеличение теплоотвода в металлическую подложку. Слой порошка на оксидной подложке прогорал полностью с образованием оксидов титана разной степени окисления и оксинитридов в нижней части слоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что внешние теплопотери и фильтрационный перенос газа при горении слоя порошка титана определяют устойчивость переходного процесса, полноту превращения и химический состав образующегося продукта. Переходный режим горения порошка титана над границей разнородных подложек в наклонных воздушных каналах может сопровождаться перестройкой структуры фронта горения со сменой сплошной формы фронта на ячеистую, и наоборот. Режим горения определяется как изменяющимися условиями фильтрации газов, так и изменением условий теплообмена.

При распространении горения слоя порошка титана в наклонном канале снизу вверх естественно-конвективное течение газа приводит к уменьшению концентрации инертных и примесных газов в зоне реакции. Создание условий для роста конвективного отвода инертных газов из зоны реакции в наклонных каналах и уменьшение теплопотерь приводят к формированию однородных структуры фронта и состава продуктов горения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zik O., Olami Z., Mozes E. // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. № 18. P. 3868.
2. Kagan L., Sivashinsky G. // Combust. Theory and Modelling. 2008. V. 12. № 2. P. 269.
3. Алдушин А.П., Браверман Б.Ш. // Хим. физика. 2010. Т. 29. № 10. С. 47.
4. Алдушин А.П., Ивлева Т.П. // ДАН. 2013. Т. 451. № 2. С. 176.
5. Маршаков В.Н., Крупкин В.Г., Рашковский С.А. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 11. С. 23; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20110114>
6. Крупкин В.Г., Мохин Г.Н. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 1. С. 62; <https://doi.org/10.1134/S0207401X19010096>

7. *Костин С.В., Шкадинский К.Г.* // ДАН. 2010. Т. 435. № 2. С. 182.
8. *Костин С.В., Кришеник П.М., Озерковская Н.И., Фирсов А.Н., Шкадинский К. Г.* // Физика горения и взрыва. 2012. Т. 486. № 1. С. 3.
9. *Кришеник П.М., Рогачев С.А., Шкадинский К.Г.* // Хим. физика. 2014. Т. 33. № 3. С. 52; <https://doi.org/10.7868/S0207401X1403008X>
10. *Костин С.В., Кришеник П.М., Шкадинский К.Г.* // Физика горения и взрыва. 2014. Т. 50. № 1. С. 49.
11. *Kostin S.V., Krishenik P.M.* // Intern. J. Self-Prop. High-Temp. 2017. V. 26. № 2. P. 106; <https://doi.org/10.3103/S106138621702008X>
12. *Алдушин А.П.* Распространение тепловых волн в гетерогенных средах / Под. ред. Матроса Ю.Ш. Новосибирск: Наука, 1988. С. 52.
13. *Шкадинский К.Г., Фирсов А.Н., Озерковская Н.И.* // Хим. физика. 2012. Т. 31. № 1. С. 48.
14. *Кришеник П.М., Костин С.В., Озерковская Н.И., Шкадинский К.Г.* // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 2. С. 45; <https://doi.org/10.1134/S0207401X19020092>
15. *Кришеник П.М., Костин С.В.* // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 10. С. 60; <https://doi.org/10.1134/S0207401X18100060>
16. *Niedl D.A., Bejan A.* Convection in Porous Media. N.Y.: Springer-Verlag, 1992.
17. *Бровко А.П., Бекман И.Н.* // Изв. АН СССР. Металлы. 1982. № 1. С. 1.
18. *Kharatian S.L., Aghababayan E.V., Merzhanov A.G.* // Archiv. Combust. 1985. V. 5. № 1. P. 3.
19. *Рыбанин С.С., Соболев С.Л.* // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 35. № 5. С. 8.
20. *Грачев В.В., Ивлева Т.П.* // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35. № 2. С. 16.