

УДК 544.452:544.427

УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРЕНИЯ СМЕСЕЙ ТИТАНА С САЖЕЙ К ЛОКАЛЬНОМУ ИЗБЫТКУ КОМПОНЕНТА

С. В. Костин, П. М. Кришеник

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мерджанова РАН,
142432 Черноголовка, petr@ism.ac.ru

Представлены экспериментальные исследования устойчивости горения к локальному избытку компонента в дисперсной смеси порошка титана и углерода. Рассмотрено влияние растекания расплава легкоплавкого или жидкого продукта реакции на устойчивость перехода горения через сплошную и перфорированную преграду из порошка углерода. Исследовано направление движения расплава по отношению к направлению распространения фронта. Показано, что устойчивость перехода горения через преграду определяется тепловым взаимодействием между волной горения и преградой и непосредственно не связана с конвективным переносом тепла расплавом.

Ключевые слова: переходные режимы, устойчивость горения, движение расплава, горение порошков, срыв горения.

DOI 10.15372/FGV2022.9225

ВВЕДЕНИЕ

Классическая теория распространения пламени в гетерогенных средах исследует режимы горения в предположении их структурной гомогенности. Как правило, реальные порошки имеют явные поверхности раздела и не являются упорядоченными по структуре системами. Они могут иметь выраженную внутреннюю неоднородность, обусловленную различием размеров частиц, их формы, а также неоднородностью распределения компонентов в смеси. Экспериментальное исследование экзотермического превращения гетерогенных систем, применяемых в технологиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза показало [1, 2], что масштабная неоднородность исходного гетерогенного состава приводит к тому, что скорость поступательного движения фронта испытывает колебания. Небольшие участки фронта продвигаются «скачками», между которыми наблюдаются периоды полной остановки. Это может привести к срыву горения, неполноте превращения, формированию неоднородного продукта горения.

В [3] предложена математическая модель, где в одномерном приближении проанализировано влияние неоднородностей внутренней структуры среды на закономерности горения гетерогенных конденсированных систем, взаи-

модействующих через слой продукта. На примере параболического закона взаимодействия реагентов показано, что структура фронта горения зависит от спектра масштабов неоднородностей. Для неравномерной функции распределения, т. е. для смесей, в которых можно выделить два существенно различных характерных размера, исследована структура фронта.

Анализ влияния неоднородности структуры среды, обусловленной различием размеров частиц, их формы, неравномерным перемешиванием, на горение конденсированной смеси показал, что плохое смешение реагентов приводит к появлению зон догорания, что на практике ведет к неполноте реагирования [3–8].

Горение гетерогенных сред, как правило, сопровождается фазовыми превращениями — плавление реагентов и эвтектик. Растекание капель легкоплавкого компонента по существенно более мелким частицам другого реагента приводит к более высокому уровню перемешивания и увеличению скорости горения. Проникновение расплавленного металла в области, занятые тугоплавким мелкодисперсным компонентом, происходит с конечной скоростью, что препятствует полноте их смешения. Таким образом, с одной стороны, отмечается явление растекания расплава легкоплавкого реагента по более мелким частицам тугоплавкого, стимулирующее протекание реакции, с другой стороны, этот процесс ограни-

чен во времени и по глубине проникновения. Неизотермическое растекание жидкости по поверхности — процесс многопараметрический. При терморастекании жидкости, наряду с термокапиллярным и термоосмотическим эффектами, происходит взаимодействие жидкости с поверхностью (при наличии диффузии, образовании раствора или химического соединения). Если при взаимодействии выделяется тепло, то «появляется сила, направленная в горячую сторону» [9]. Оценка суммарного результата действия термокапиллярного и термоосмотического эффектов при наличии химического взаимодействия компонентов осложняется разнонаправленностью сил, действующих на расплав.

В представленной экспериментальной работе исследовался процесс устойчивости горения конденсированных смесей к локальному избытку компонента. Исследовалось влияние конвективного движения легкоплавкого компонента на горение бидисперсной пористой смеси. Определялось направление движения расплава в процессе горения. Исследования также направлены на выявление и определение масштабов эффектов, связанных с возмущением процесса горения локальным избытком компонента в дисперсной смеси двух реагентов.

При наличии депрессии горения в момент возмущения возможно потухание и прекращение процесса термосинтеза. Срыв горения может быть следствием теплопотерь из зоны реакции в окружающую среду, ограниченности запаса тепла в продуктах горения и частичного выгорания исходной смеси перед фронтом в «низкотемпературном» режиме под воздействием теплового потока от сгоревшей части образца. Процесс горения считается устойчивым, если после возмущения, вызванного наличием избыточного компонента, он выходит на прежний режим [10].

В связи с этим возникает вопрос: можно ли увеличить устойчивость прохождения волны горения за счет растекания расплава легкоплавкого компонента или жидкого продукта реакции по локальному избытку тугоплавкого компонента за время горения или за время депрессии?

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве модельных систем для исследования выбраны смеси титана с сажей $Ti + C$ и $Ti + 0.5C$. Простым варьированием со-

Исходная смесь	T_{ad} , К	Состав продуктов, % (мас.)	ρ , г/см ³	u , мм/с
$Ti + C$	3 290	Жидкий TiC, 83 Твердый TiC, 17	1.22	7.1 ± 0.5
$Ti + 0.5C$	2 216	Твердый TiC, 56 Жидкий Ti, 44	1.43	5 ± 0.5

отношения компонентов исходной смеси смоделированы процессы, в которых максимальная температура горения либо существенно превышала, либо примерно равнялась температуре плавления (1 980 К) исходного легкоплавкого компонента — титана. Конечный продукт реакции — карбид титана, иногда в смеси с избытком титана, — также может составлять часть жидкой фазы в волне горения. В таблице приведены некоторые расчетные значения характерных величин выбранных составов (адиабатической температуры горения T_{ad} , плотности ρ) и замеренные значения скорости горения u в условиях эксперимента. Расчет состава продуктов, их фазового состояния, температуры горения проводился с помощью программы Thermodynamic Program Thermo, ИСМАН.

Избыточное содержание одного из компонентов, нарушающего структуру смеси, моделировалось в виде его слоя, расположенного поперечно направлению распространения горения. Слой мог быть сплошным или перфорированным. Преграда могла быть в виде нескольких слоев, примыкающих друг к другу, каждый из которых содержал один из компонентов. Количество избыточного компонента в слое варьировалось.

В качестве линейного масштаба толщины преграды использовано расчетное значение характерного размера реакционной ячейки стехиометрической смеси титана с сажей, т. е. эффективного значения ее диаметра или толщины [8]. Под реакционной ячейкой понимается усредненный элемент гетерогенной структуры смеси порошков, способных к самораспространяющемуся высокотемпературному синтезу, содержащий вступающие в реакцию вещества в пропорции, равной их концентрации в смеси.

Вид формулы для расчета характерных размеров реакционной ячейки зависит от того, чья пористость — сажи или смеси — применяется в расчетах. Если исходить из монолитности частиц титана, окруженных пористой мас-

сой сажи, расчет можно проводить по формуле:

$$D_* = D \left(1 + \frac{C_c \rho_{Ti}}{C_{Ti} \rho_c (1 - \pi_c)} \right)^{1/3}. \quad (1)$$

Если в расчетах используется пористость всей смеси, применима формула

$$D_* = D \left[\left(1 + \frac{C_c \rho_{Ti}}{C_{Ti} \rho_c} \right) \frac{1}{1 - \pi} \right]^{1/3}. \quad (2)$$

Здесь D_* — характерный (эффективный) диаметр реакционной ячейки; D — диаметр частицы титана; C_c — массовое содержание сажи в смеси, %; C_{Ti} — содержание титана в смеси, %; ρ_{Ti} — плотность титана; ρ_c — плотность сажи; π_c — пористость слоя сажи, окружающего частицу титана; π — пористость смеси титана с сажей.

Определяются критическая толщина сплошной преграды или критический диаметр отверстия в перфорированной преграде определенной толщины (т. е. максимальная толщина слоя избыточного компонента или, соответственно, минимальный диаметр отверстия), когда за преградой инициируется горение. Учтена возможность флуктуации распределения сажи в слое. Толщина слоя сажи рассматривается как непрерывная функция. Допускается, что приводимое значение является осредненной величиной, и наряду с этим возможны меньшие и большие значения толщины данного слоя при данном количестве избыточного компонента. Осредненное значение является верхней оценкой предельной толщины слоя, при котором горение неустойчиво. Совокупность полученных результатов при варьировании навески сажи сужает границы разброса значений предельной толщины слоя, увеличивает точность значения искомой величины.

Для приготовления смесей применялся титан марки ПТК (размер частиц $90 \div 125$ мкм) и сажа марки П804Т. Исследуемая смесь засыпалась в кварцевый стаканчик с внутренним диаметром 23 мм, высотой 50 мм. Смеси поджимались шлифованным пуансоном. Для смеси $Ti + C$ задавалась пористость $\pi = 0.65$, для $Ti + 0.5C$ при том же усилии прессования пористость составляла $\pi = 0.63$. Общая высота засыпки не превышала полутора диаметров. Верхнюю и нижнюю части смеси на определенной высоте разделял сплошной или перфорированный слой сажи ($\pi_c = 0.84$) или графитизированная углеродная ткань толщиной 600 мкм

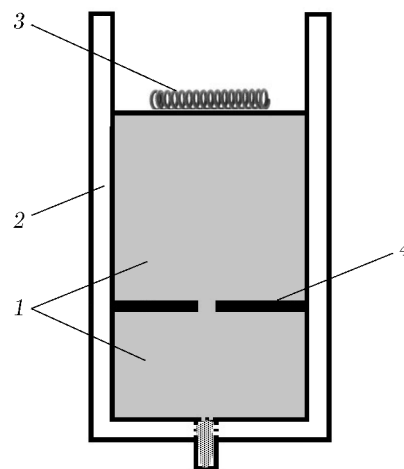


Рис. 1. Схема образца:

1 — горючая смесь, 2 — кварцевый стаканчик, 3 — иницирующая спираль, 4 — перфорированная преграда

($\pi_c \approx 0.7$) марки Т-2. С использованием формул (1), (2) проведена оценка размера реакционной ячейки D_* для систем $Ti + C$ и $Ti + 0.5C$. Для первой системы диаметр реакционной ячейки $D_* \approx 175$ мкм, для второй $D_* \approx 160$ мкм.

На рис. 1 приведена общая схема образца. Высота верхней части засыпки горючей смеси в кварцевом стаканчике задавалась равной его диаметру, а высота нижней части составляла полдиаметра. Для предотвращения образования «газовой пробки» (области повышенного давления у закрытой торцевой поверхности) в центре дна стакана имела газотводная трубка с внутренним диаметром 3 мм, прикрытая слоем ваты, газопроницаемость которой заведомо больше, чем у используемых смесей.

Образец помещался в герметичный сосуд объемом 3 л, вакуумировался и выдерживался в вакууме 30 мин. Затем в сосуд напускался аргон. Опыты проводились при давлении аргона 7 атм. Это позволяло избежать диспергирования и деформации продукта горения. Зажигание производилось электрической спиралью, приведенной в контакт с поверхностью смеси. При такой постановке опытов не наблюдалось расслоения и выброса продуктов горения. После опытов фиксировалось расширение продуктов реакции по сравнению с исходным образцом: для смеси $Ti + C$ оно составляло ≈ 10 %, для $Ti + 0.5C$ — менее 10 %. Структура пор по длине образца практически не менялась.

УСТОЙЧИВОСТЬ ПЕРЕХОДА ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ ЧЕРЕЗ СПЛОШНОЙ СЛОЙ САЖИ

В нашем случае частица титана диаметром D окружена мелкими частицами сажи. При горении рассматриваемой системы возникает ряд вопросов: в какую сторону и как далеко растекается расплав титана при распространении фронта? выйдет ли он за пределы ячейки и как далеко? повлияет ли растекание расплава на устойчивость горения?

Гипотетически в случае преимущественного движения расплава титана спутно фронту горения, особенно при его содержании в смеси сверх стехиометрии, можно было бы ожидать увеличения устойчивости горения к локальному избытку сажи за счет конвективного переноса тепла и массы реакционноспособным расплавом. Однако вопрос о направлении движения преобладающей части расплава, скорости фильтрации и глубине проникновения в реакционноспособную пористую среду при наличии градиента температуры в ней остается открытым. По данным [9] направление преимущественного растекания жидкости по подложке при наличии температурного градиента зависит от природы контактируемых сред.

В данной работе определялись направление и возможные масштабы проникновения расплава титана в слой преграды в условиях эксперимента. Путем варьирования навески сажи определялась критическая толщина сплошного поперечного слоя преграды, сверх которой горение прекращалось.

В опытах со смесями $Ti + 0.5C$ минимальная удельная масса внедренного слоя «избыточной сажи», приходящаяся на единицу площади, составляла 0.012 г/см^2 . При этом толщина слоя сажи (375 мкм) была примерно равна удвоенному характерному размеру реакционной ячейки D_* для смеси $Ti + 0.5C$. При такой толщине преграды фиксировалось прекращение горения образца по месту внедрения слоя сажи.

Горение смеси $Ti + 0.5C$ с внедренным сплошным поперечным слоем углеродной ткани толщиной $\approx 0.6 \text{ мм}$ при пористости $\pi \approx 0.7$ прекращалось, не доходя до ткани. Часть смеси между продуктом горения и тканью не спекалась. Ее количество составляло $0.012 \div 0.017 \text{ г/см}^2$, что соответствовало толщине недогоревшего слоя смеси перед преградой, равной $80 \div 120 \text{ мкм}$. Собранный недогоревший порошок оставался реакционноспо-

собным: вспыхивал при инициировании раскаленной электрической спиралью. Таким образом, устойчивость фронта горения перед преградой определяется тепловым взаимодействием между волной горения и преградой, не связанным непосредственно с конвективным переносом тепла расплавом.

Экспериментально было установлено, что смесь $Ti + 0.5C$ зажигается сквозь углеродную ткань стехиометрической смесью $Ti + C$, имеющей более высокую температуру горения. После извлечения сгоревшего образца из кварцевого стаканчика продукт горения смеси $Ti + C$ легко отделялся от углеродной ткани. Торцевая поверхность продукта повторяла рельеф поверхности ткани. При осмотре под микроскопом МБС-9 на поверхности ткани со стороны продукта горения $Ti + C$ обнаруживались остатки сажи и подплавленные частицы титана, занимавшие незначительную часть поверхности ткани. Следов глубокой пропитки не отмечено. В то же время углеродная ткань прочно спаивалась с поверхностью нижней части образца — продуктом горения $Ti + 0.5C$ — и отрывалась с усилием, с частичным ее разрушением. При осмотре торцевой поверхности продукта горения $Ti + 0.5C$, примыкавшей к ткани, обнаруживались многочисленные нити углеродной ткани, пропитанные и спаянные с продуктом горения сплошь по всей площади. Некоторые нити имели серебристо-серый цвет продукта реакции. На поверхности, оторванной от продукта горения ткани, имелись частицы расплава в виде клякс и нитей серебристого цвета, но сквозной пропитки ткани не отмечено. Таким образом, зафиксировано движение расплава в осевом направлении образца в сторону высокотемпературной зоны, т. е. противоположно движению фронта горения (распространявшегося сверху вниз по вертикальному образцу).

При переходе волны горения смеси $Ti + C$ в смесь $Ti + 0.5C$ через слой сажи с удельной массой 0.012 г/см^2 образец не спекался, т. е. сквозной пропитки слоя сажи не наблюдалось даже при толщине слоя преграды, равной удвоенному характерному размеру реакционной ячейки ($D_* \approx 375 \text{ мкм}$). Количество собранной после опыта свободной, не прореагировавшей и не спекшейся сажи в зазоре между частями образца убавлялось примерно наполовину, что коррелирует с результатами опытов с графитизированной тканью.

При прохождении волны горения по смеси $Ti + C$ через поперечный слой избытка сажи спекания обеих частей образца как в критических, так и околокритических условиях не наблюдалось. Максимальная величина удельной массы сажи преграды, преодолевавшейся волной горения, составляла $\approx 0.024 \text{ г/см}^2$, что соответствует толщине $\approx 4D_*$. Следовательно, переходный процесс горения определялся кондуктивным переносом тепла через преграду.

Таким образом, горение смеси $Ti + C$, температура горения которой существенно выше температуры плавления легкоплавкого компонента, является более устойчивым, чем смеси $Ti + 0.5C$. В последнем случае (при применении $Ti + 0.5C$) даже относительно небольшая толщина преграды $\approx 2D_*$ оказалась непреодолимой для распространения волны синтеза. Небольшая разница между значениями температур горения и плавления компонента в смеси $Ti + 0.5C$, а также падение температуры по толщине преграды приводят к прекращению реакции за преградой, что можно объяснить увеличением масштаба гетерогенности и уменьшением коэффициентов реакционной диффузии в связи с отсутствием плавления частиц титана за преградой. Увеличение теплового потока через слой сажи при использовании более калорийной стехиометрической смеси $Ti + C$ инициировало распространение волны горения за преградой в смеси $Ti + 0.5C$.

«ДИФРАКЦИЯ» ВОЛН ГОРЕНИЯ

«Дифракция» волн горения при прохождении перфорированного поперечного слоя сажи (рис. 2) удельной массы 0.024 г/см^2 или графитовой ткани удельной массы 0.036 г/см^2 исследовалась на смеси $Ti + 0.5C$ как менее



Рис. 2. Перфорированная преграда — углеродная ткань

устойчивой к локальному избытку тугоплавкого компонента. Количество локально внедренной сажи взято заведомо больше критического значения, соответствующего условию прохождения волны горения через сплошную преграду. Ситуация может кардинально измениться, если в слое сажи появляется отверстие (перфорация). Диаметр перфорации в виде кругового отверстия на продольной оси образца менялся от опыта к опыту с шагом 1 мм. Это позволило с точностью до 1 мм определить критический размер отверстия, при котором фронт горения преодолевал преграду данной массы и пористости. Экспериментально установлено, что критический для прохождения волны горения диаметр отверстия в слое сажи для смеси $Ti + 0.5C$ составил 2 мм.

Исходя из макрокинетического механизма распространения волны горения по конденсированной смеси, можно выделить ряд факторов, способных повлиять на ее устойчивость при прохождении перфорации в преграде, сопровождающемся изменением площади фронта экзотермической реакции и его топологии.

Априори можно предположить, что устойчивость волны горения зависит от радиуса кривизны фронта, если он сопоставим с размером ширины зоны прогрева волны горения [10]. Размер волны горения определяется как зоной реакции, так и шириной зоны прогрева. В гетерогенных смесях титана с сажей выявлены широкие зоны реакции, что неоднократно подтверждалось неполнотой реагирования смеси титана с сажей, степень которой зависела от размера частиц титана, пористости смеси и качества перемешивания. Чем больший избыток энтальпии присущ установившемуся фронту горения (т. е. запас тепла в зоне прогрева), тем более длительным и депрессивным ожидается переходный процесс горения [11]. Чем меньше соотношение тепловых активностей продукта горения и исходной смеси, тем менее устойчиво горение в окрестности границы контакта слоев [12].

Как показали опыты на смесях титана с сажей при варьировании соотношения долей компонентов, чем меньше разница между температурой горения и температурой плавления легкоплавкого компонента — титана, тем меньше устойчивость волны горения. Если самый легкоплавкий компонент плавится вблизи максимальной температуры горения, то всякое возмущение, вызывающее отток тепла и паде-

ние температуры в зоне реакции, может привести к срыву горения. Прекращение плавления и растекания со смешением реакционноспособных компонентов влечет увеличение степени гетерогенности в зоне горения смеси, уменьшает поверхность реагирования и, соответственно, уменьшает скорость тепловыделения, что в условиях теплопотерь может привести к прекращению горения.

Фактором стабилизации горения является тепловой поток, проходящий сквозь преграду от раскаленных продуктов реакции верхней части образца. Продукт горения за преградой имел более однородную структуру в случае тонких поперечных слоев сажи. В противном случае сразу за преградой обнаруживался дискообразный спек, отслаивающийся от остальной части продукта цилиндрической формы. Горение за преградой наблюдалось с четко выраженной пульсацией яркостной температуры и скорости горения.

Кривизна фронта горения за преградой на начальном этапе предопределена характерным размером перфорации (диаметром отверстия). Фронт, плоский на входе в отверстие, за преградой принимал вид, близкий к форме полусферы, максимальная кривизна которого зависела от диаметра отверстия. Это подтверждалось при осмотре спеченных продуктов реакции частично прореагировавших образцов в околоскритической области параметров. Рост кривизны (растяжение) фронта за преградой сопровождается падением температуры горения, что может привести к срыву горения [13, 14].

ПЕРЕХОД ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ ЧЕРЕЗ СЛОЙ РЕАКЦИОННОСПОСОБНОЙ СМЕСИ С ОБЕДНЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КОМПОНЕНТА

Исследования проводились на двух смесях: $Ti + C$ и $Ti + 0.5C$. Попеременно одна смесь рассматривалась как основная, а другая внедрялась в нее в виде слоя. В отличие от прежних теоретических и экспериментальных исследований переходных процессов горения в малогазовых составах, в данной работе рассматривается переход фронта горения через узкий слой внедренного состава. Ширина внедренного слоя реакционноспособной смеси варьировалась, минимальное значение составляло около пяти характерных размеров реакционной ячей-

ки: ≈ 1 мм. Анализ полученных экспериментальных результатов подтвердил возможность применения разработанного ранее трехэтапного рассмотрения переходного процесса в рамках тепловой теории: подход волны горения к границе раздела составов, зажигание, выход волны горения на стационарный режим [12]. В случае узкого слоя смеси последний этап рассмотрения требует коррекции.

На первом этапе переходного процесса, т. е. перед границей контакта с инородной смесью, депрессия горения может быть вызвана увеличением оттока тепла из зоны реакции в сторону очередного слоя системы, если его тепловая активность $\sqrt{\lambda c \rho}$ выше, чем у горящей части системы (здесь λ , c , ρ — соответственно теплопроводность, теплоемкость и плотность смеси). Значение критического соотношения тепловых активностей контактируемых смесей зависит от температурной чувствительности реакции $k = (T_{ad} - T_0) \frac{\partial \ln u}{\partial T_0}$, где T_{ad} — адиабатическая температура горения, T_0 — начальная температура, u — скорость фронта. У сильно активированных малогазовых «трудно зажигаемых» смесей (в том числе титана с сажей) значение k , как правило, весьма высокое (вблизи предела устойчивости стационарного горения [15]). Это может привести к срыву горения при незначительном увеличении тепловой активности поджигаемого слоя по сравнению с предыдущим. Увеличение или снижение количества титана в его смеси с сажей соответственно увеличивает или снижает тепловую активность слоя $\sqrt{\lambda c \rho}$. Поэтому локальное увеличение содержания порошка титана в смеси — фактор, который влияет на устойчивость распространения фронта горения по слоевой системе.

Зажигание очередного слоя смеси может реализоваться тепловым потоком от приближающегося фронта горения либо тепловым потоком от продукта реакции после завершения горения предшествующей части слоевой системы. В первом случае переход волны горения происходит относительно плавно, а во втором сопровождается видимой остановкой распространения светящейся раскаленной зоны. Дальнейшее распространение горения возможно после прогрева несгоревшей части реакционноспособного состава. Теплопотери и ограниченность запаса тепла в продуктах экзотермической реакции могут привести к прекраще-

нию горения. Увеличение содержания компонента сверх стехиометрии, приводящее к снижению калорийности и скорости реакции, снижает воспламеняемость смеси.

Экспериментальные результаты полностью согласуются с изложенными теоретическими представлениями. При переходе фронта горения из $Ti + C$ в смесь $Ti + 0.5C$, имеющую более высокую тепловую активность, скрытую теплоту плавления и низкую калорийность, наблюдалась депрессия горения $\approx 1.5 \div 2$ с. При переходе волны горения из смеси $Ti + 0.5C$ в смесь $Ti + C$ депрессия отсутствует. При этом толщина слоев в опытах составляла $10 \div 20$ мм.

Однако при величине промежуточного слоя с локальным избытком или недостатком титана в смеси около 1 мм остановок фронта горения не зафиксировано в обоих вариантах проведения опытов. Теплообмен через границы узкого слоя нивелирует различие калорийностей и теплофизических параметров контактирующих слоев системы при условии, что толщина слоя внедренной смеси сравнима с длиной волны горения.

В случае горения смеси $Ti + 0.5C$ депрессия перед внедренным тонким (1 мм) слоем $Ti + C$ отсутствует: тепловая активность слоя и затраты тепла на плавление титана меньше, а калорийность выше основной части смеси. За слоем $Ti + 0.5C$ на фоне собственных колебаний движения фронта горения депрессия не зафиксирована: тепловое взаимодействие через границы контакта тонкого слоя с более теплоемкой и проводящей смесью может трансформировать волну горения слоя, замедляя ее движение и увеличивая время прогрева смеси за слоем тепловым потоком от фронта горения. Рассеиваются «излишки» тепла из перегретой области при горении высококалорийной смеси $Ti + C$, тем самым снижаются температура и скорость горения, увеличивается время прогрева следующего слоя $Ti + 0.5C$. Тонкость слоя $Ti + 0.5C$ с относительно высокой тепловой активностью и низкой калорийностью не приводит к значительному рассеиванию тепла, а лучшая воспламеняемость более калорийной стехиометрической смеси $Ti + 0.5C$ упреждает срыв горения слоевой системы.

Экспериментальное исследование устойчивости горения смеси порошков титана с сажой к локальному избытку компонента обнаружило преимущественное течение расплавленного компонента (титана) из зоны прогрева

в высокотемпературную зону реакции. Таким образом, результирующее воздействие термокапиллярных сил, имеющих место при экзотермической реакции, направлено к зоне продуктов. Следовательно, оценка устойчивости переходных процессов горения таких составных систем может проводиться в рамках классической тепловой теории.

В [16] с помощью нестационарной математической модели исследовано влияние конвективного переноса расплава на распространение безгазового фронта. Предполагалось, что конвективное движение расплава вызвано только действием термокапиллярных сил и его направление совпадает с направлением движения фронта. Неполнота рассмотрения сил, действующих на расплав, не дает понимания полной картины явления [9]. Есть необходимость учесть силы «смещения», возникающие при экзотермических реакциях, влияющих на движение расплава и формирование продукта реакции.

В [17] проведено исследование процессов структуро- и фазообразования тройных систем при горении смесей порошков на основе $Ti + Si + C$. Тройные фазы формировались в области границы контакта слоевых систем типа сэндвич, спрессованных из порошковых смесей $Ti + ySi$ и $Ti + xC$. Инициирование горения порошковых смесей $Ti + ySi$ реализовывалось со стороны более высокоэнергетического состава $Ti + xC$. Анализ профилей концентрации продуктов горения показал, что легкоплавкий реагент Si проникал в слой TiC_x на глубину до 1 мм, т. е. конвективный поток легкоплавящегося реагента Si был направлен навстречу фронту.

Полученный результат о направлении конвективного потока при фронтальном превращении гетерогенных сред коррелирует с выводами наших исследований.

Предложенный метод анализа состояния продукта и полупродуктов переходного процесса горения позволил непосредственно зафиксировать направление движения расплава по пористой системе. Срыв горения перед препятствием свидетельствует о доминирующей роли кондуктивного теплопереноса, а фиксация расплава, поступившего в преграду, свидетельствует о преобладании встречного конвективного тепло- и массопереноса в условиях эксперимента.

Результаты проведенного исследования

имеют как научный, так и практический интерес при разработке технологии создания неразъемных соединений с формированием сварного соединения между материалами, образующимися при протекании самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

ВЫВОДЫ

1. Устойчивость фронта горения смеси титана с сажей перед преградой определяется тепловым взаимодействием с ней, не связанным с непосредственным контактом расплава компонента или продукта реакции с поперечной преградой и, следовательно, не связанным, по крайней мере напрямую, с конвективным переносом тепла фильтрующимся расплавом.

2. При прохождении волны горения $Ti + 0.5C$ критическая толщина преграды из поперечного слоя избыточного тугоплавкого компонента составляет не более двух характерных размеров реакционной ячейки (≈ 375 мкм). Устойчивость фронта горения смеси $Ti + C$ выше и критическая толщина преграды больше, что объясняется существенным превышением ее температуры горения над температурой плавления легкоплавкого компонента.

3. Зафиксирована фильтрация расплава титана в осевом направлении в сторону, противоположную движению фронта горения.

4. Для рассмотренных составов и типов преград существует критический диаметр перфорации для дифракции волны горения. Растяжение фронта при переходе через отверстие может привести к срыву или потере устойчивости горения.

5. Подтверждена возможность анализа переходных процессов горения в слоевых «безгазовых» системах с плавящимся компонентом в рамках тепловой теории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mukasyan A. S., Rogachev A. S., Varma A. Mechanisms of reaction wave propagation during combustion synthesis of advanced materials // *Chem. Eng. Sci.* — 1999. — V. 54, N 15-16. — P. 3357–3364. — DOI: 10.1016/S0009-2509(98)00457-6.
2. Рогачев А. С., Мукасян А. С. Экспериментальная проверка дискретных моделей горения микрогетерогенных составов, образующих конденсированные продукты сгорания (обзор) // *Физика горения и взрыва.* — 2015. — Т. 51, № 1. — С. 66–76.
3. Алдушин А. П., Хайкин Б. И., Шкадинский К. Г. Влияние неоднородности внутренней структуры среды на горение конденсированных смесей реагентов, взаимодействующих через слой продукта // *Физика горения и взрыва.* — 1976. — Т. 12, № 6. — С. 819–827.
4. Шкиро В. М., Боровинская И. П. Капиллярное растекание жидкого металла при горении смесей титана с углеродом // *Физика горения и взрыва.* — 1976. — Т. 12, № 6. — С. 945–948.
5. Шкиро В. М., Боровинская И. П. Исследование закономерностей горения смесей титана с углеродом // *Процессы горения в химической технологии и металлургии* / под ред. А. Г. Мержанова. — Черноголовка, 1975. — С. 253–258.
6. Кирдяшкин А. И., Максимов Ю. М., Мержанов А. Г. О влиянии капиллярного растекания на процесс горения безгазовых систем // *Физика горения и взрыва.* — 1981. — Т. 17, № 6. — С. 10–15.
7. Кирдяшкин А. И., Китлер В. Д., Саламатов В. Г., Юсупов Р. А., Максимов Ю. М. Капиллярные гидродинамические явления в процессе безгазового горения // *Физика горения и взрыва.* — 2007. — Т. 43, № 6. — С. 31–39.
8. Смоляков В. К. О «шероховатости» фронта безгазового горения // *Физика горения и взрыва.* — 2001. — Т. 37, № 3. — С. 33–44.
9. Быховский А. И. Растекание. — Киев: Наук. думка, 1983.
10. Merzhanov A. G., Khaikin B. I. Theory of combustion waves in homogeneous media // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 1988. — V. 14, N 1. — P. 1–98. — DOI: 10.1016/0360-1285(88)90006-8.
11. Strunina A. G., Barzykin V. V. Stability of transitional combustion regimes of gasless systems // *Arch. Combust.* — 1985. — V. 5, N 2. — P. 191–203.
12. Костин С. В., Струнина А. Г., Барзыкин В. В. Влияние теплофизических параметров на устойчивость волны горения при переходе через границу раздела безгазовых систем // *Физика горения и взрыва.* — 1987. — Т. 23, № 6. — С. 56–61.
13. Aldushin A. P., Matkowsky B. J. Stretch and compression of solid flames // *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.* — 1995. — V. 4, N 1. — P. 5–23.
14. Кришеник П. М., Костин С. В., Рогачев С. А. Исследование аккумуляции тепловой энергии при переходе волны горения через клиновидную преграду // *Физика горения и взрыва.* — 2021. — Т. 57, № 2. — С. 60–67. — DOI: 10.15372/FGV20210206
15. Шкадинский К. Г., Хайкин Б. И., Мержанов А. Г. Распространение пульсирующего фронта экзотермической реакции в конденсированной фазе // *Физика горения и взрыва.* — 1971. — Т. 7, № 1. — С. 19–28.

-
16. Прокофьев В. Г., Смоляков В. К. Термокапиллярная конвекция в волне безгазового горения // Физика горения и взрыва. — 2019. — Т. 55, № 1. — С. 100–108. — DOI: 10.15372/FGV20190110.
17. Vadchenko S. G., Boyarchenko O. D., Sytchev A. E., Sachkova N. V. SHS joining in the Ti–Si–C-system: structure of transition layer // Int. J Self-Propag. High-Temp. Synth. — 2013. — V. 22, N 1. — P. 46–51. — DOI: 10.3103/S1061386213010135.

Поступила в редакцию 21.09.2022.

После доработки 02.12.2022.

Принята к публикации 14.12.2022.
