

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГОРЕНИЯ СМЕСЕЙ $Ti + 0.5C$ и $Ti + C$ НАСЫПНОЙ ПЛОТНОСТИ В СПУТНОМ ПОТОКЕ ИНЕРТНОГО ГАЗА

Б. С. Сеплярский, С. Г. Вадченко, С. В. Костин, Г. Б. Брауэр

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, 142432 Черноголовка  
sepl@ism.ac.ru

Впервые исследованы закономерности горения смесей  $Ti-C$  насыпной плотности в условиях продува образца инертным газом путем вакуумирования одного из торцов реакционной ячейки. Проведенные эксперименты показали, что испытуемые смеси в кварцевых стаканчиках не поджигались и не горели в отсутствие потока инертного газа (аргона). Увеличение скорости откачки газа из образца увеличивало скорость установившегося горения смеси титана с сажей, а для смеси титана с графитом наблюдалась стабилизация плоского фронта горения. Показано, что наличие небольшого перепада давления (не выше  $10^5$  Па) дает возможность управлять процессом горения, а также подтверждает основные постулаты конвективно-кондуктивной теории горения гетерогенных конденсированных систем.

Ключевые слова: гетерогенное горение, расплав титана, конвективный перенос, перепад давления, примесное газовыделение, скорость горения, структура продукта.

### ВВЕДЕНИЕ

Горение смесей порошков переходных металлов с неметаллами (C, B, Si и др.) является эффективным способом получения различных карбидов, боридов, силицидов этих металлов [1–4]. Подавляющее большинство исследований, посвященных изучению закономерностей горения таких смесей, выполнено на пресованных образцах в бомбе постоянного давления [1], хотя при опытно-промышленном получении данных соединений в режиме горения обычно используют смеси насыпной плотности [5].

В данной работе впервые проведено исследование закономерностей горения порошкообразных смесей ( $Ti + C$ ) и ( $Ti + 0.5C$ ) насыпной плотности, помещенных в кварцевый стаканчик, в условиях продува образца инертным газом. Выбор такого способа управления процессом горения для данной системы не случаен, так как в работе [6] показано, что распространение зоны реакции в системе  $Ti + C$  происходит за счет как конвективного, так и кондуктивного переноса тепла. Соответствующая конвективно-кондуктивная теория горения «безгазовых» систем (ККТГ) была предложена в работе [7].

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В рамках ККТГ процесс распространения зоны реакции можно представить следующим образом [7]. Жидкий металл (например, титан) в результате совместного действия капиллярных сил и перепада давления примесных газов впитывается в ту часть исходной шихты (темная область на рис. 1), которая занята мелкодисперсным компонентом (для определенности считаем, что это сажа), что приводит к многократному увеличению поверхности контакта титана и сажи и, соответственно, к резкому увеличению скорости реакции. При взаимодействии титана с сажей выделяется большое количество тепла и образуются конденсированные продукты, которые не обладают текучестью при температуре горения. В результате

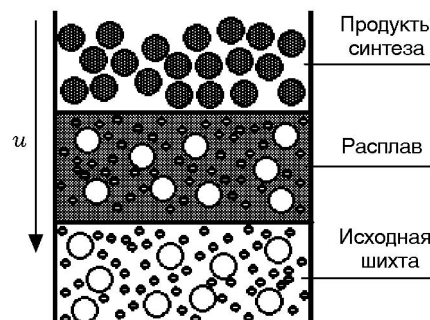


Рис. 1. Модель процесса горения

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 06-03-32950).

повышения температуры происходит плавление частиц титана (светлые кружки на рис. 1). Под действием капиллярных сил и перепада давления примесных газов расплав перетекает в соседний слой, и процесс повторяется. В рамках данной модели средняя скорость движения расплава  $v_m$  и есть видимая скорость распространения волны горения  $u_{c,ob}$ . В соответствии с [7] скорость проникновения расплава в исходную шихту  $v_m$  подчиняется закону фильтрации Дарси, т. е.

$$v_m \approx k_m \frac{\Delta p}{\Delta}, \quad (1)$$

где  $k_m$  — коэффициент фильтрации расплава,  $\Delta$  — толщина слоя расплава,  $\Delta p = p_f - p_b$  — разность давлений перед ( $p_f$ ) и за ( $p_b$ ) слоем расплава. Перепад давления в области проникновения расплава в исходную шихту состоит из двух составляющих: капиллярного давления  $\Delta p_s$ , вызванного силами поверхностного натяжения, и разности давлений примесных газов перед ( $p_{f,g}$ ) и за ( $p_{b,g}$ ) слоем расплава. Следовательно,

$$\Delta p = p_f - p_b = \Delta p_s - (p_{f,g} - p_{b,g}). \quad (2)$$

Как видно из (2), на скорость проникновения расплава в исходную шихту можно влиять изменением давления газа как перед слоем расплава, так и за ним. Второй случай реализован в работе [8]. В данной работе впервые управление процессом горения осуществлялось за счет уменьшения  $p_{f,g}$ , что должно приводить к увеличению скорости горения. В экспериментах уменьшение давления  $p_{f,g}$  достигалось с помощью подсоединения стаканчика со смесью к вакуумному насосу.

Исследовалось горение порошкообразных смесей титана и углерода (сажа или графит) с массовым содержанием компонентов 88.9 % Ti и 11.1 % C, что соответствует уравнению реакции  $Ti + 0.5C$ , а также 80.0 % Ti и 20.0 % C, что соответствует уравнению реакции  $Ti + C$ . Размеры частиц исходных компонентов были следующими: титан — 63 ÷ 71 мкм, сажа — не более 0.15 мкм или графит синтетический с номинальным размером частиц 1 ÷ 2 мкм. Исходные компоненты смешивались в фарфоровой ступке методом сухого перетирания. Количество примесного газа в исходной шихте изменялось в результате термовакуумной обработки исходной смеси. Для этого из исходной

смеси методом одностороннего холодного прессования в стальной пресс-форме изготавливали цилиндрические образцы диаметром 10 мм и высотой 13 ÷ 15 мм. Образцы помещали в пробирку, из которой откачивался воздух до давления 1.33 Па. После этого пробирку выдерживали в печи при заданной температуре и непрерывной откачке выделяющегося газа вакуумным насосом. Затем печь выключалась и пробирка с образцами охлаждалась до комнатной температуры. После охлаждения вакуумный насос отключался и в колбу напускался воздух. Для смеси Ti + 0.5C (сажа) термовакуумную обработку проводили при  $T = 650$  °C в течение 1 ч, для смеси Ti + C (сажа) — при  $T = 750$  °C в течение 0.5 ч.

Для изучения процесса горения была создана экспериментальная установка, схема которой показана на рис. 2. Исследуемые смеси засыпали в прозрачные кварцевые стаканчики с отверстием в доньшке, вертикально установленные на подложку из минеральной ваты и стальной сетки (см. рис. 2). К доньшке была припаяна кварцевая трубка, что позволяло подсоединить стаканчик через систему кранов и трубок к насосу, обеспечивающему при включении проток газа через образец. Как правило, внутренний диаметр стаканчика равнялся 13.5 ÷ 14 мм, высота — 50 мм. Стаканчик вместе с исследуемой смесью помещался внутрь реакционной камеры с прозрачными окнами, которая перед сжиганием продувалась аргоном, поступающим из баллона. Из

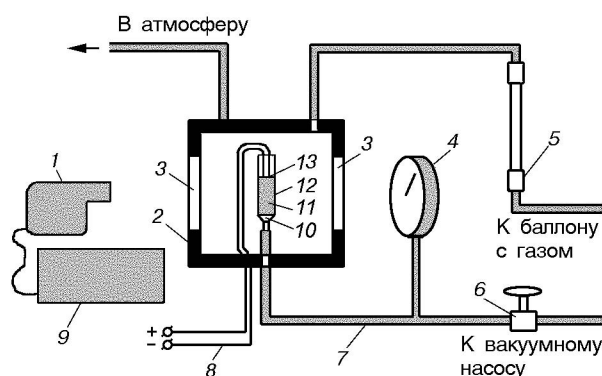


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 — цифровая видеокамера, 2 — реакционная камера, 3 — окошко, 4 — вакуумметр, 5 — расходомер, 6 — кран, 7 — соединительные трубки, 8 — электропитание воспламенителя, 9 — компьютер, 10 — фильтр, 11 — исследуемый состав, 12 — кварцевый стаканчик, 13 — спираль

быточный газ, непрерывно подаваемый в реакционную камеру во время опыта, удалялся в окружающую среду через трубку, что позволяло поддерживать внутри реакционной камеры давление, близкое к атмосферному. Иницирование горения осуществлялось с верхнего торца засыпки с помощью электрического импульса, подаваемого на спираль. Обычно вакуумный насос включался перед иницированием горения. Через смотровые окна процесс распространения волны горения и показания вакуумметра записывались с помощью цифровой видеокамеры Sony DCR-НС94Е непосредственно в память компьютера. Покадровая обработка полученных изображений позволила определить динамику изменения наблюдаемой скорости горения  $u_{c,ob}$  во времени. Эта же установка использовалась для определения газопроницаемости исходной смеси.

С позиций кондуктивной теории горения [1] предполагаемое воздействие (перепад давлений  $10^5$  Па) можно считать незначительным. В заключительной части статьи приведен расчет, показывающий, что дополнительное повышение температуры горения, обусловленное спутным потоком газа, не превышает  $10^\circ\text{C}$  и не должно приводить к заметному изменению скорости горения согласно формулам «классической» теории [1].

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

До начала экспериментов были определены пористости и плотности исследуемых смесей после продува через них газа при максимально возможном в данных условиях перепаде давления. Другими важными параметрами были расход газа через образец до начала процесса горения и газопроницаемость исходной смеси, которые определялись на установке, изображенной на рис. 2. Расход газа, проходящий через засыпку, измеряли расходомером при подключении его специальной трубкой непосредственно к пробирке со смесью. Меняя с помощью крана расход газа через образец, находили зависимость расхода газа от перепада давлений на засыпке. Газопроницаемость исходной смеси  $k$  рассчитывали по формуле [9]

$$k = \frac{2p_1\mu QL}{S(p_1^2 - p_2^2)}, \quad (3)$$

где  $Q$  — объемный расход газа при атмосферном давлении  $p_1$ ,  $L$  — высота засыпки,  $S$  —

Таблица 1

Состав смеси	П	$k, 10^{-12} \text{ м}^2$
Ti + 0.5C (сажа)	0.72	2.3
Ti + 0.5C (сажа) после ТВО	0.62	1.7
Ti + 0.5C (графит)	0.72	1.9
Ti + C (сажа)	0.72	0.56
Ti + C (сажа) после ТВО	0.675	0.64

площадь поперечного сечения кварцевого стаканчика,  $p_2$  — давление газа у нижнего торца образца,  $\mu$  — вязкость фильтрующегося газа (воздуха). Результаты определения пористости и газопроницаемости смесей Ti + 0.5C (сажа) и Ti + C (сажа) приведены в табл. 1 (здесь П — пористость, ТВО — термовакуумная обработка).

Как следует из данных табл. 1, исследуемые смеси обладают высокой газопроницаемостью, причем значение  $k$  слабо зависит от вида мелкодисперсного компонента (сажа или графит). Увеличение содержания сажи в исходной смеси при переходе от состава Ti + 0.5C (сажа) к составу Ti + C (сажа) приводит к уменьшению газопроницаемости в  $3 \div 4$  раза.

Для демонстрации реальности управления скоростью течения расплава, образующегося при горении исходных смесей, с помощью небольшого перепада давлений, не превышающего  $10^5$  Па, проводились следующие эксперименты. До включения вакуумного насоса на поверхность порошкообразной смеси, помещенной в пробирку, заливался слой изопропилового спирта высотой  $60 \div 100$  % от высоты смеси. Спирт медленно проникал в поры смеси со скоростью  $1 \pm 0.2$  мм/с. Та часть состава, которая пропиталась спиртом, меняла цвет, что позволяло следить за динамикой пропитки с помощью видеосъемки. При переключении крана 6 (см. рис. 2) образец подсоединялся к включенному вакуумному насосу и скорость течения спирта увеличивалась в несколько раз. Результаты обработки видеосъемки положения фронта пропитки  $X_{imp}$  в различные моменты времени  $t$  при различном расходе воздуха  $Q$  показаны на рис. 3. Излом на кривых  $X_{imp}(t)$  соответствовал моменту подключения вакуумного насоса. Как видно из рис. 3, большему начальному значению расхода воздуха (скорости

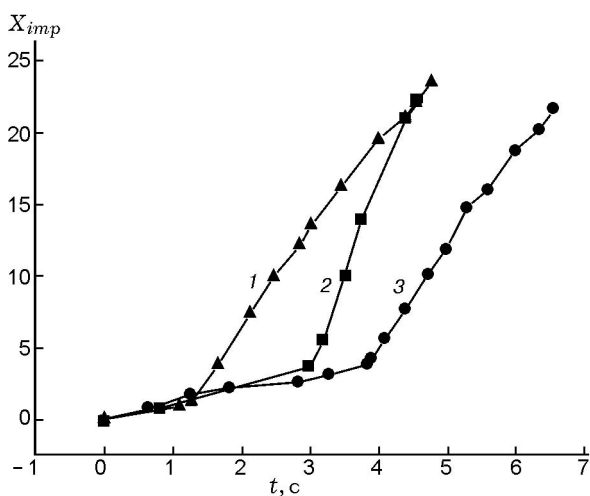


Рис. 3. Зависимости от времени координат фронта пропитки смесей титана с сажей или с графитом изопропиловым спиртом:

высота слоя порошкообразной смеси 25 мм, пористость 0.72, диаметр пробирки 13.5 мм; 1 —  $Q = 2.3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ , скорость жидкости  $v_l = 5.2 \text{ мм/с}$ , смесь с графитом; 2 —  $Q = 3.5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $v_l = 11 \text{ мм/с}$ , смесь с сажей; 3 —  $Q = 2.3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $v_l = 5.4 \text{ мм/с}$ , смесь с сажей

фильтрации) соответствует большее значение скорости течения спирта (кривые 2 и 3). При задании равных начальных расходов газа (кривые 1 и 3) скорости фильтрации спирта для смесей Ti + 0.5C (сажа) и Ti + 0.5C (графит) оказались фактически равными.

Проведенные эксперименты наглядно продемонстрировали возможность существенно ускорять течение жидкости сквозь смеси, типичные для СВС-процессов, за счет искусственно создаваемого перепада давления вдоль засыпки. Так как вязкость изопропилового спирта ( $\mu = 2.58 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ) близка к вязкости расплава титана, то и в экспериментах по сжиганию смесей Ti + 0.5C (сажа) и Ti + 0.5C (графит) следует ожидать высокой чувствительности скорости горения к такому же небольшому перепаду давлений, как и в опытах с пропиткой.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ГОРЕНИЮ ПОРОШКООБРАЗНЫХ СМЕСЕЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ниже приведены результаты экспериментов по горению смесей порошков Ti + C (сажа или графит) в потоке аргона. Для улучшения воспламенения исходной шихты на ее

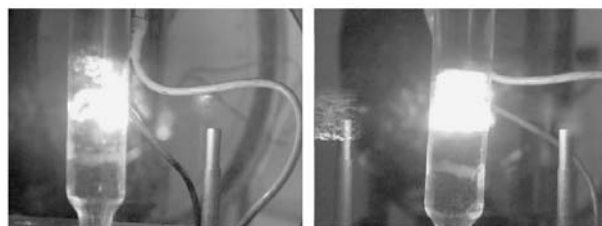


Рис. 4. Фотографии горящего образца при различном расходе газа:

смесь Ti + 0.5C (графит), высота засыпки 25 мм,  $Q = 1.7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$  (левый снимок),  $2.2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$  (правый снимок)

поверхность насыпался слой порошка Ti + 2W массой 0.2 г. Воспламенение этого слоя осуществлялось тепловым импульсом от вольфрамовой спирали. Для того чтобы избежать усадки шихты в процессе горения и получить стабильные результаты, перед каждым опытом проводилась продувка засыпки потоком газа при максимально возможном перепаде давлений (полностью открыт кран 6, рис. 2). Обычно после такой продувки исходная высота засыпки уменьшалась примерно в полтора раза. Как показали проведенные исследования, фильтрация газа через пористую засыпку оказывает существенное влияние на скорость горения исходных смесей и характер распространения фронта (см. фотографии горящих образцов при различном потоке газа на рис. 4). Так, смеси состава 88.9 % Ti + 11.1 % C, не прошедшие термовакуумную обработку, при отсутствии спутного потока инертного газа (т. е. без подключения вакуумного насоса) в условиях наших экспериментов не поджигались и не горели. Более того, если в процессе горения прекращался проток газа через засыпку (из-за отключения вакуумного насоса), то горение смеси Ti + 0.5C (графит) также прекращалось.

На рис. 5 показана типичная зависимость координаты фронта горения (кривая 1) от времени для системы Ti + 0.5C (графит) при продувке газа. Видно, что скорость фронта горения непостоянна, она увеличивается при приближении горения к нижнему торцу образца. Мы обратили внимание на тот факт, что существенное увеличение скорости горения наблюдается в тех экспериментах, где усадка исходной засыпки значительна. Причем момент увеличения скорости горения совпадает с началом интенсивной усадки. Поэтому при определении

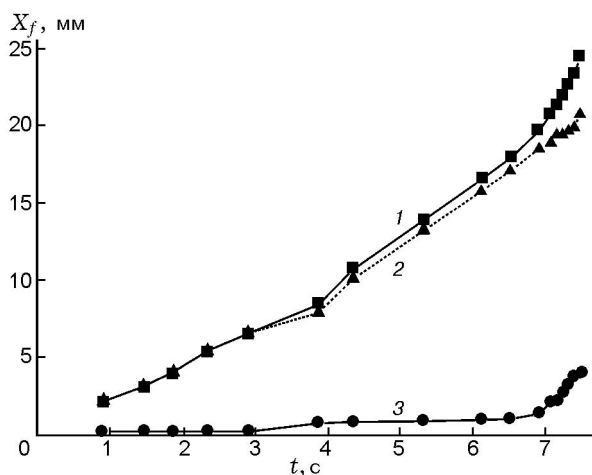


Рис. 5. Зависимости координаты фронта горения (кривая 1), верхней поверхности засыпки (кривая 3) и их разности (кривая 2) от времени

Таблица 2

Состав смеси	$Q$ , $10^{-5}$ м <sup>3</sup> /с	$u_{c,ob}; u_{def}$ (средняя), мм/с	Усадка в процессе горения, %
Ti + 0.5C (графит)	0	Нет зажигания	—
	1.7	≈2.3	≈5
	2.2	2.5; 9.5 (3.5)	≈16
Ti + 0.5C (сажа)	0	Нет зажигания	—
	0.97	5.7	0
	1.25	7.4	6
	2.5 ÷ 2.8	9.2 ÷ 10.2; 17 ÷ 18.6 (12)	≈20
Ti + 0.5C (сажа) после ТВО	0	6.85	0
	2.2	12; 21 (16)	≈37
Ti + C (сажа) после ТВО	0	20	≈6
	0.72	32	≈14
Ti + C (сажа)	0	6.6	≈0
	0.69	11	≈0

скорости фронта по данным видеосъемки поступали следующим образом. В опытах, где в процессе горения исходная смесь не испытывала значительной усадки и, соответственно, мало изменялась скорость горения, определялось одно значение скорости фронта. В опытах, где горение сопровождалось значительной усадкой образцов, определялись два значения скорости фронта (табл. 2):  $u_{c,ob}$  — для этапа горения до начала интенсивной усадки и  $u_{def}$  — для стадии горения, сопровождающейся усадкой. Для последнего случая в таблице также приведено среднее значение скорости горения смесей (в скобках). Тот факт, что момент увеличения скорости горения совпадает с началом интенсивной усадки, свидетельствует о том, что усадка образца происходит во фронте горения.

Результаты обработки зависимостей  $X_f(t)$  (высота засыпки порошковой смеси перед сжиганием 25 мм, внутренний диаметр кварцевых трубок 13.5 мм) для различных смесей приведены в табл. 2. Как следует из данных таблицы, значительная усадка шихты в процессе горения наблюдается при больших расходах газа (от  $2.2 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с). Следует отметить, что в табл. 2 в качестве определяющего параметра приведено значение расхода газа через исходную шихту, подготовленную к сжиганию при определенном положении крана (6 на рис. 2). После измерения расхода газа положение крана не менялось и оставалось постоянным при сжигании шихты. Из данных табл. 2, следует, что при одинаковых расходах газа смеси Ti + C (сажа), прошедшие ТВО, горят почти в три раза быстрее, чем те же смеси без ТВО.

При отсутствии потока газа через образец смеси Ti + 0.5C без ТВО не горели, а прошедшие ТВО горели. При больших расходах газа скорости горения смесей Ti + 0.5C (сажа), не прошедших ТВО, равны или даже выше скоростей горения таких же смесей, прошедших ТВО, но горящих без спутной фильтрации газа. Это свидетельствует о высокой эффективности предложенного метода воздействия на процесс горения.

Более сильное влияние ТВО на скорость горения смесей Ti + C с большим содержанием сажи позволяет сделать вывод о том, что давление примесного газа перед фронтом реакции (слоем расплава), замедляющее скорость горения, в основном определяется десорбцией примесных газов и паров, находящихся на поверх-

ности частиц сажи. Этот вывод полностью совпадает с оценками роли адсорбированных газов, сделанными в работе [7].

Чем выше исходная скорость фильтрации, тем лучше происходит удаление примесного газа из зоны прогрева и тем больше скорость горения. Таким образом, удаление примесного газа перед слоем расплава с помощью искусственно созданного перепада давления вдоль засыпки можно рассматривать как простой и эффективный способ управления процессом горения, а также очистки полученных продуктов синтеза от примесных газов. Этот результат является еще одним аргументом в пользу конвективно-кондуктивного механизма распространения фронта горения для системы Ti—C.

На рис. 6 приведена фотография продольных разрезов конденсированных продуктов горения смеси Ti + 0.5C (сажа), не прошедшей (слева) и прошедшей (справа) предварительную термообработку. Перед опытом высота образцов равнялась 25 мм. После опыта высота образца, не прошедшего ТВО, практически не изменилась, а усадка по высоте для образца,



Рис. 6. Фотография продольных разрезов конденсированных продуктов горения смеси Ti + 0.5C (сажа):

высота слоя исходной смеси 25 мм, пористость 0.72, диаметр пробирки 13.5 мм,  $Q = 0.97 \times 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$  (левый образец) и  $2.2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$  (правый образец)

прошедшего ТВО, составила  $\approx 37\%$ , что указывает на значительный гидравлический эффект воздействия газового потока при больших расходах газа. Детальный осмотр под стереоскопическим микроскопом МБС-9 образца, прошедшего ТВО, показал, что в его нижней части пористость уменьшается.

Рентгенофазовый анализ продуктов горения смеси Ti + 0.5C (сажа) в условиях продува инертным газом показал, что продукт состоит из смеси двух фаз — карбида титана  $\text{TiC}_m$  ( $m = 5/6 \div 1$ ) и титана.

В заключение приведем оценки, показывающие, что возникающий за счет вакуумирования перепад давления и соответствующий ему поток газа настолько незначительны, что с точки зрения кондуктивной теории [10] это не должно приводить к заметному увеличению скорости распространения фронта горения. Покажем это прямыми расчетами. В соответствии с [10] скорость фронта конвективного охлаждения конденсированных продуктов реакции  $u_{cool}$  потоком втекающего газа  $G_0$  равна

$$u_{cool} = c_g G_0 / c_s \rho_s, \quad (4)$$

где  $c_g$  — удельная теплоемкость втекающего газа,  $c_s$ ,  $\rho_s$  — удельная теплоемкость и плотность конденсированных продуктов реакции. Для смеси Ti + C  $c_{s\text{TiC}} = 900 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $c_{g\text{Ar}} = 521 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $\rho_{s(\text{Ti} + \text{C})} = 1 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $G_0 = 2.5 \cdot 10^{-2} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Подставляя численные значения всех входящих в формулу (4) величин, получим

$$u_{cool} = c_g G_0 / c_s \rho_s = 1.45 \cdot 10^{-5} \text{ м}/\text{с}. \quad (5)$$

Следовательно, скорость фронта охлаждения конденсированных продуктов реакции потоком втекающего газа примерно на три порядка меньше расчетной скорости фронта горения  $u_c$  (см. данные по  $u_{c,ob}$ , приведенные в табл. 2). Из-за такой большой разницы  $u_c$  и  $u_{cool}$  конвективный перенос тепла фильтрующимся газом практически не изменяет температуру горения  $T_c$  исследуемой системы. Продемонстрируем это непосредственным расчетом  $T_c$  с помощью формул, известных из теории фильтрационного горения [10]:

$$\begin{aligned} T_c &= T_{in} + \frac{q}{c_s(1 - c_g G_0 / u_c c_s \rho_s)} = \\ &= T_{in} + \frac{q}{c_s(1 - u_{cool} / u_c)} \approx \end{aligned}$$

$$\approx T_{in} + \frac{q}{c_s} \left( 1 + \frac{u_{cool}}{u_c} \right), \quad (6)$$

где  $q$  — тепловой эффект реакции,  $T_{in}$  — начальная температура смеси. В соответствии с (6) прирост температуры пропорционален  $u_{cool}/u_c$  и в условиях нашего эксперимента составляет всего несколько градусов. Если учесть, что эти расчеты проведены для расхода газа, близкого к максимальному (в условиях наших экспериментов), то можно сделать вывод, что повышение температуры не является причиной такого значительного роста скорости горения. Так как температура горения практически не меняется при увеличении расхода газа, то зависимость скорости горения от удельного массового расхода газа можно представить в следующем виде [8]:

$$u_c = u_{c0} + u_h = u_{c0} + c_g G_0 / c_{s0} \rho_s, \quad (7)$$

где  $u_{c0}$  — скорость горения исходной смеси без продува газом ( $G_0 = 0$ ),  $u_h$  — скорость переноса тепла,  $c_{s0}$  — теплоемкость исходной шихты.

Таким образом, в соответствии с (7) прирост скорости горения в условиях наших экспериментов не должен превышать 0.01 мм/с, что совершенно не соответствует экспериментальным данным по зависимостям скорости горения от расхода газа, приведенным в табл. 2. Следовательно, наблюдаемое в эксперименте увеличение скорости горения не является следствием конвективного переноса тепла фильтрующимся газом.

## ВЫВОДЫ

- На основе представлений конвективно-кондуктивной теории горения гетерогенных конденсированных систем для управления процессом синтеза в смесях Ti+0.5C и Ti+C предложено применять метод вакуумирования образца.

- Создана экспериментальная установка, позволяющая реализовать этот принцип управления процессом горения.

- Определена зависимость коэффициента газопроницаемости от содержания титана и углерода в исходной смеси.

- Изучена динамика процесса пропитки исходных смесей изопропиловым спиртом при вакуумировании. Продемонстрирована возможность существенно ускорять течение жидкости сквозь смеси Ti+0.5C и Ti+C, типичные для СВС-процессов.

- Исследованы закономерности горения смесей на основе порошков титана и углерода в условиях искусственно созданного перепада давлений вдоль засыпки. Показано, что за счет отвода примесных газов в зоне прогрева фронта реакции возможно значительное увеличение скорости горения (в 1.5 ÷ 2 раза).

- Установлено, что предварительная термовакуумная обработка исходных смесей увеличивает скорость горения для образцов насыпной плотности и уменьшает влияние отвода примесных газов перед фронтом на процесс горения, как это и следует из конвективно-кондуктивной теории.

Итак, проведенные эксперименты позволяют сделать вывод, что наличие небольшого перепада давлений (не превышающего  $10^5$  Па) дает возможность управлять процессом горения и структурой полученных продуктов, а также подтверждают основные выводы конвективно-кондуктивной теории горения гетерогенных конденсированных систем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов А. Г. Твердопламенное горение. Черноголовка: ИСМАН, 2000.
2. Мержанов А. Г., Боровинская И. П. Самораспространяющийся синтез тугоплавких неорганических соединений // Докл. АН СССР. 1972. Т. 204, № 2. С. 366–369.
3. Шкиро В. М., Боровинская И. П. Исследование закономерностей горения смесей титана с углеродом // Процессы горения в химической технологии и металлургии. Черноголовка, 1975. С. 253–258.
4. Munir Z. A., Anselmi-Tamburini U. Self-propagating exothermic reactions: the synthesis of high-temperature materials by combustion // Mater. Sci. Reports. 1989. V. 3, N 7–8. P. 277–365.
5. Прокудина В. К., Ратников В. И., Маслов В. М., Боровинская И. П., Мержанов А. Г., Дубовицкий Ф. И. Технология карбида титана // Процессы горения в химической технологии и металлургии. Черноголовка, 1975. С. 136–141.
6. Сеплярский Б. С., Вадченко С. Г. Роль конвективного теплопереноса в процессах «безгазового» горения (на примере горения системы Ti + C) // Докл. АН. 2004. Т. 399, № 1. С. 72–76.
7. Сеплярский Б. С. Природа аномальной зависимости скорости горения безгазовых систем от диаметра // Докл. АН. 2004. Т. 396, № 5. С. 640–643.
8. Мержанов А. Г., Мукасян А. С., Постников С. В. Гидравлический эффект в процессах

- безгазового горения // Докл. АН. 1995. Т. 343, № 3. С. 340–342.
9. **Беляев А. Ф., Боболев В. К., Коротков А. И., Сулимов А. А., Чуйко С. В.** Переход горения конденсированных веществ во взрыв. М.: Наука, 1973.
10. **Алдушин А. П., Сеплярский Б. С.** Распространение волны экзотермической реакции в пористой среде при продуве газа // Докл. АН СССР. 1978. Т. 241, № 1. С. 72–75.

*Поступила в редакцию 2/IX 2007 г.,  
в окончательном варианте — 17/IV 2008 г.*

---