

ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ СЛОЕВОЙ СИСТЕМЫ $Ti-(Ti + 0.5C)$ В СПУТНОМ ПОТОКЕ АЗОТА

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

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

Впервые проведено исследование закономерностей фильтрационного горения слоевой пористой засыпки, состоящей из чередующихся слоев смеси $Ti + 0.5C$ и титанового порошка при вынужденной спутной фильтрации азота. Протекание газа через образец обеспечивалось вакуумным насосом, подсоединенным к нижнему торцу засыпки. Наличие спутного потока газа кардинально меняет характер распространения фронта горения, структуру и состав получаемых продуктов. Слои, состоящие из карбонитрида и нитрида титана, составляют единое целое. Проведенные эксперименты закладывают научные основы для получения новых слоистых и композиционных керамических материалов в режиме динамического фильтрационного горения.

Ключевые слова: газопроницаемость, фильтрация, конвективно-кондуктивный механизм, многослойный образец.

Горение порошков переходных металлов и их смесей с неметаллами (углерод, бор) в азоте является эффективным способом получения как нитридов этих металлов, так и тройных соединений, таких, например, как карбонитриды [1–9]. Подавляющее большинство исследований, посвященных изучению закономерностей горения таких смесей, выполнено на пресованных или насыпных образцах в бомбе постоянного давления, когда подвод газа в зону реакции возникает за счет поглощения газа при его взаимодействии с металлом (саморегулируемая фильтрация) [1–8]. Однако при такой организации процесса сжигания даже небольшие добавки инертного газа приводят к резкому замедлению горения и недогоранию исходного металла или его смеси с неметаллом из-за наличия теплопотерь [3, 10, 11]. Другим фактором, оказывающим сильное влияние на скорость горения и степень превращения исходной смеси, является примесное газовыделение, всегда сопровождающее горение реальных систем [3, 8]. Так, при горении порошка титана, помещенного в кварцевые стаканчики, в газообразном азоте (давление азота $0.05 \div 0.4$ МПа) наблюдалось послынное горение [8]. Однако фронт реакции проникал только на определенную глубину засыпки в зависимости от количества газообразных приме-

сей, диаметра стаканчика и длины засыпки [8]. В этой работе получена зависимость глубины проникновения фронта горения от давления газа в окружающей среде, высоты образца, количества примесного газа и вязкости фильтрующегося газа.

В данной работе впервые проведено исследование закономерностей фильтрационного горения слоевой пористой засыпки, состоящей из чередующихся слоев смеси $Ti + 0.5C$ и титанового порошка, разбавленного нитридом титана, при вынужденной спутной (направление движения газа сквозь засыпку совпадает с направлением движения фронта горения) фильтрации азота. В этом случае инертный газ не накапливается внутри образца, что позволяет реализовать горение как при высоком содержании инертного газа в смеси, так и при значительном выделении примесных газов [12, 13]. Особенность данного исследования состоит в том, что перепад давления вдоль образца, который и обеспечивает вынужденный поток газа через смесь порошков, создан с помощью вакуумирования нижнего торца исходной засыпки. Другая особенность данной работы заключается в том, что исходная засыпка состоит из разнородных слоев. Причем одни слои горят только за счет азота, подводимого из внешней среды, а другие могут гореть как за счет взаимодействия компонентов, находящихся в исходной смеси, так и за счет подводимого из внешней среды азота. Это позволило впервые последо-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 05-08-65461, 06-03-32950).

вательно проследить, как происходит переход волны горения из систем, горящих по фильтрационному механизму, в системы, горящие по так называемому «безгазовому» механизму, а также проследить закономерности обратного перехода. Отметим, что в соответствии с предложенным в [14] конвективно-кондуктивным механизмом горения «безгазовых» систем отвод примесных газов из зоны прогрева должен оказывать существенное влияние на скорость горения не только слоев из порошка титана, но и слоев из смеси $Ti + 0.5C$ из-за уменьшения давления примесных газов перед слоем расплава. Горячие продукты реакции $Ti + 0.5C$ сами способны реагировать с азотом в режиме горения с образованием карбонитридов различного состава $TiC_{0.5}N_y$, что может приводить к одновременному распространению в рассматриваемой системе нескольких фронтов горения.

Исследовалось горение в потоке азота порошка титана и порошкообразных смесей титана и углерода (сажа) при массовом соотношении компонентов 88.9 % Ti и 11.1 % C , что соответствует уравнению реакции $Ti + 0.5C \rightarrow TiC_{0.5}$. Размер исходных частиц титана $63 \div 71$ мкм, сажи — не более 0.15 мкм. Смесь $Ti + 0.5C$ готовили в фарфоровой ступке методом сухого смешения. В ряде опытов в порошок титана добавляли инертный порошок, конечный продукт реакции — $TiN_{0.95}$. В качестве газообразного реагента применялся азот марки ОСЧ и технический.

Для изучения горения была создана экспериментальная установка, схема которой показана на рис. 1. Исследуемая смесь засыпалась в вертикально установленные прозрачные кварцевые стаканчики с отверстием в доньшке (на подложку из минеральной ваты, которая, в свою очередь, устанавливалась на стальной сетке, рис. 2). Соосно с отверстием к доньшке была припаяна кварцевая трубка, подсоединяющая стаканчик к форвакуумному насосу, обеспечивающему протекание газа через образец. Как правило, внутренний диаметр стаканчика равнялся $13.5 \div 14$ мм, высота — 50 мм. Стаканчик со смесью помещался внутри реакционной камеры с прозрачными окнами, которая перед сжиганием продувалась азотом, подаваемым из баллона. Избыточный азот, непрерывно подаваемый в реакционную камеру во время опыта, удалялся в окружающую среду через трубку. Такая организация экспериментов позволяла поддерживать внутри реак-

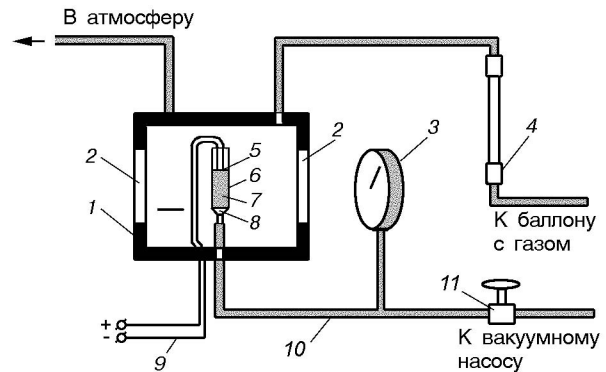


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — реакционная камера, 2 — окошко, 3 — вакуумметр, 4 — расходомер, 5 — спираль, 6 — кварцевый стаканчик, 7 — исследуемый состав, 8 — фильтр, 9 — электрическое питание воспламенителя, 10 — соединительные трубки, 11 — кран

ционной камеры давление, близкое к атмосферному.

Инициирование горения осуществлялось с верхнего торца засыпки электрическим импульсом, подаваемым на спираль. Вакуумный насос обычно включали перед инициированием. Через смотровые окна процесс распространения волны горения и показания вакуумметра записывались с помощью цифровой видеокамеры Sony DCR-NC94E непосредственно в память компьютера. Покадровая обработка полученных изображений позволила определить динамику изменения наблюдаемой скорости горения u_{cob} во времени. Эта же установка использовалась для определения газопроницаемости исходной смеси. Зная объемный расход газа Q при атмосферном давлении (по показаниям расходомера), высоту засыпки L , площадь поперечного сечения кварцевого стаканчика S , давление газа у нижнего торца образца p_2 (по показаниям вакуумметра), вязкость фильтрующегося газа μ , можно по соотношению, приведенному в [15], рассчитать газопроницаемость исходной смеси:

$$k = \frac{2p_1\mu QL}{S(p_1^2 - p_2^2)}. \quad (1)$$

Формула (1) применима для определения газопроницаемости однородных засыпок. Если засыпка состоит из нескольких разнородных слоев, каждый из которых имеет свою газопроницаемость и длину, то для такой засыпки эффективный коэффициент газопроницаемости k_{eff} рассчитывается по формуле

$$k_{eff} = \frac{\Delta l}{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{k_i}} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{k_i}}, \quad (2)$$

где $\Delta l = \sum_{i=1}^n l_i$ — общая длина засыпки, состоящей из n слоев, l_i — длина i -го слоя, k_i — его газопроницаемость. В соответствии с (2) для вычисления k_{eff} достаточно знать газопроницаемость и длину каждого слоя засыпки. После определения k_{eff} для конкретной слоевой засыпки расход можно вычислить по формуле (1), в которую вместо k подставляется значение k_{eff} .

Измерения газопроницаемости слоя из смеси Ti + 0.5C пористостью 0.72 дали следующий результат: $k = 2.3 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$. Для порошка титана пористостью 0.78 газопроницаемость была равна $7.85 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$.

На рис. 2 приведена фотография кварцевого стаканчика с реакционной смесью внутри и узлом воспламенения и подсоединенным резиновым шлангом: белый слой — подложка из минеральной ваты

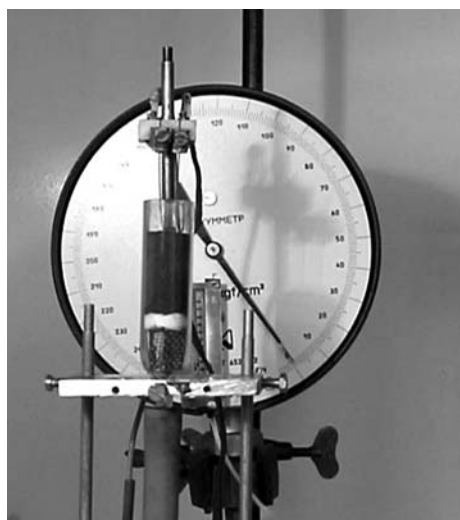


Рис. 2. Фотография кварцевого стаканчика с реакционной смесью внутри, узлом воспламенения и подсоединенным резиновым шлангом: белый слой — подложка из минеральной ваты

мым влиять на скорость фильтрации азота, а также на скорость течения расплава при взаимодействии титана и сажи и, соответственно, увеличивать скорость горения, а также изменять структуру получаемых продуктов.

В проведенных экспериментах объемная скорость фильтрации газа по образцу варьировала в диапазоне $0 \div 3.6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ при диаметре засыпки 14 мм. Давление газа на выходе из концевой части образца фиксировалось вакуумметром в течение всего процесса горения. Для того чтобы избежать усадки несгоревшей части шихты в процессе горения и получить стабильные результаты, перед каждым опытом проводилась продувка засыпки потоком газа при максимально возможном перепаде давлений (полностью открыт кран 11, см. рис. 1). Обычно после такой продувки исходная высота засыпки уменьшалась примерно в полтора раза. Перед сжиганием «поджатых» таким образом образцов (с помощью крана 11) устанавливался необходимый расход газа через засыпку. Его значение определялось расходомером и использовалось нами в качестве определяющего параметра процесса, так как положение крана в дальнейшем не менялось. Именно это значение расхода указано в подписях к рисункам.

В опытах использовались однослойные, двухслойные и четырехслойные засыпки, причем верхний слой всегда состоял из смеси Ti + 0.5C.

Главной особенностью горения слоя Ti + 0.5C при продуве азотом в одно- и многослойных образцах является одновременное распространение двух фронтов горения (рис. 3). В

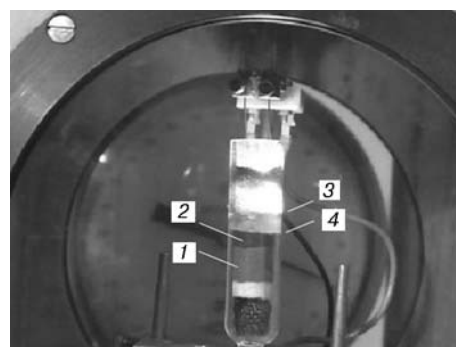


Рис. 3. Фотография горения двухслойной системы:

начальный расход азота $1.7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; 1 — слой Ti, 2 — слой Ti + 0.5C, 3 — фронт зоны азотирования, 4 — фронт карбидизации

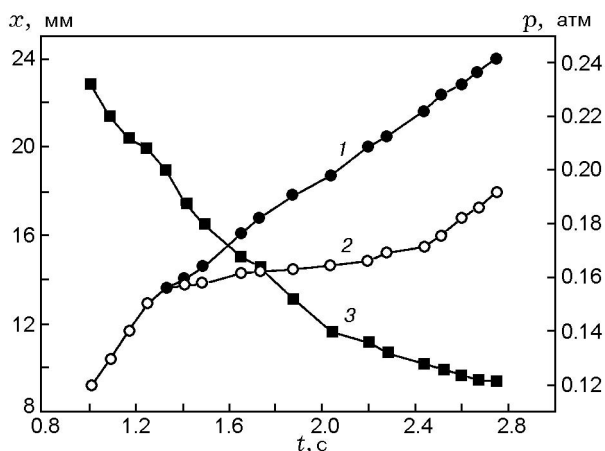


Рис. 4. Изменение во времени положения фронта карбидизации (кривая 1) и фронта азотирования (кривая 2) при горении однослойной засыпки состава Ti + 0.5C. Изменение давления газа перед вакуумным насосом (кривая 3):

высота слоя 25 мм, усадка $\approx 24\%$, начальный расход азота $3.5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$

первом, относительно слабо светящемся фронте, как показали специальные эксперименты, происходит взаимодействие титана и сажи, а во втором, более ярком фронте начинается взаимодействие горячего $\text{TiC}_{0.5}$ с азотом. Тот факт, что за фронтом азотирования продукты светятся очень ярко и это свечение продолжается довольно длительное время (в условиях наших экспериментов уменьшение светимости начиналось позже, чем фронт азотирования доходил до нижнего торца засыпки), позволяет сделать вывод о том, что во фронте азотирования не достигается полная глубина превращения по азоту и взаимодействие конденсированных полупродуктов с азотом продолжается во всей области выше фронта азотирования. Следовательно, процесс доазотирования носит объемный характер, что свидетельствует о сложной кинетике взаимодействия титана или $\text{TiC}_{0.5}$ с азотом в волне горения. При больших расходах газа ($Q \geq 1.7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$) горение развивается следующим образом. После иницирования по засыпке движется одна яркая зона реакции. Затем на некотором расстоянии от верхнего торца засыпки происходит отрыв и быстрое распространение первого фронта горения, за которым, все более отставая, движется вторая более яркая волна горения (см. рис. 3, 4). Расщепление волны горения на два фронта впервые было обнаружено при горении

порошка тантала в азоте в условиях двусторонней саморегулируемой фильтрации газа [16] и при численном моделировании процессов фильтрационного горения [17].

В наших экспериментах раздвоение фронтов горения впервые наблюдалось при горении однослойной засыпки из смеси порошков Ti + 0.5C. Для ответа на вопрос о том, какая реакция происходит в первом, а какая во втором фронте, было проведено исследование процесса горения в двухслойной засыпке (рис. 5). Эксперименты показали, что как только первый фронт достигает слоя титана, он останавливается, но титан не воспламеняется. Только после того, как к границе раздела подходит второй фронт, слой порошка титана воспламеняется и по нему движется яркий фронт горения титана с азотом. Следовательно, в первом фронте происходит взаимодействие титана и сажи, а во втором, более ярком, начинается взаимодействие горячего $\text{TiC}_{0.5}$ с азотом. Тот факт, что порошок титана не воспламеняется при контакте с первым фронтом, позволил нам сделать вывод о том, что азот не проникает сквозь фронт азотирования.

На рис. 4 показано изменение во времени положения первого фронта (карбидизации) и второго фронта (азотирования) при горении однослойной засыпки. После «расщепле-

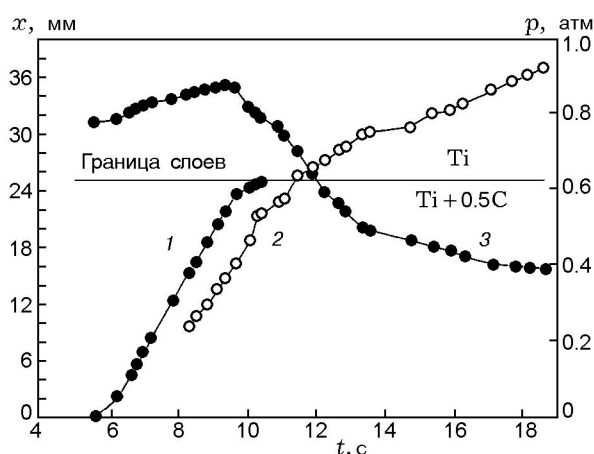


Рис. 5. Изменение во времени положения фронта карбидизации (кривая 1) и фронта азотирования (кривая 2) при горении двухслойной засыпки. Изменение давления газа перед вакуумным насосом (кривая 3):

начальный расход азота $1.7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$, расстояние между фронтами горения первого слоя $\approx 3 \div 7 \text{ мм}$, исходная высота образца 37 мм

ния» фронта скорость второго, яркого фронта снижается. Скорость первого фронта остается постоянной, ее среднее значение $\cong 8.4$ мм/с. При приближении к открытой поверхности в конце образца скорость второго фронта нарастает. Скорее всего, увеличение скорости связано с ростом газопроницаемости продуктов за счет образования крупных пор. Давление газа перед вакуумным насосом непрерывно уменьшается (кривая 3 на рис. 4), что может быть связано с ухудшением проницаемости слоя расплава во фронте взаимодействия титана и сажи.

Если смесь $Ti + 0.5C$ сжигали при отключенном вакуумном насосе, то после инициирования наблюдался только один фронт реакции. Второй фронт появлялся за счет взаимодействия $TiC_{0.5}$ с азотом через некоторое время после прохождения первого. Он находился на некотором расстоянии от поверхности засыпки. Внешне процесс горения тоже выглядел иначе, чем при включенном вакуумном насосе: яркость фронтов горения была гораздо меньше, а расстояние между фронтами гораздо больше и достигало 15 мм. Скорость распространения фронтов была значительно меньше, чем в первом случае. Причинами такого изменения является примесное газовыделение, которое препятствует как подводу азота в глубь засыпки, так и поступательному движению расплава при взаимодействии Ti с сажей [8, 14].

На рис. 5 показано изменение во времени положения первого фронта (карбидизации) и второго фронта (азотирования) при горении двухслойной засыпки. После «расщепления» единого фронта горения скорость второго, яркого, фронта (зоны реакции с поглощением азота) снижается. Скорость первого фронта остается постоянной, ее среднее значение 6 мм/с. Слой порошка титана, следующий за слоем $Ti + 0.5C$, загорался только при подходе к нему второго фронта горения (см. рис. 5). Это свидетельствует о том, что второй фронт — фронт зоны реакции с поглощением азота, а первый — реакции титана с сажей, причем азот не проникает сквозь фронт азотирования. На основании данных, приведенных на рис. 4, 5, можно сделать вывод, что увеличение начального расхода газа приводит к заметному изменению скорости горения. Этот результат находится в согласии с конвективно-кондуктивной теорией горения «безгазовых» систем [14] и не находит объяснения в рамках классической теории рас-

пространения волны реакции в СВС-системах, основанной на кондуктивном механизме передачи тепла.

Усадка исходной засыпки при горении системы $Ti + 0.5C$ в потоке азота зависит от начального расхода газа и составляет от 8 % при $Q = 0 \div 1.7 \cdot 10^{-5}$ м³/с для одно- и двухслойных систем с высотой засыпки 25 мм до 20 % при $Q = 3.6 \cdot 10^{-5}$ м³/с для двухслойной системы с высотой засыпки 25 мм. Высота слоя порошка Ti в этих опытах составляла 13 мм. Усадка при горении такого слоя титана (в двухслойных системах) составляла 8 и 23 % при начальной скорости фильтрации $1.7 \cdot 10^{-5}$ м³/с и $3.6 \cdot 10^{-5}$ м³/с соответственно. Усадка продукта горения приводит к его уплотнению и уменьшению пористости, однако в продуктах горения обнаруживается осевой канал-каверна неправильной формы.

Если в опытах использовался азот технической чистоты, то при низкой начальной скорости фильтрации в случае горения смеси $Ti + 0.5C$ (в двухслойной засыпке) образуется продукт с явными признаками примеси. Зона продукта с примесями имеет вид перевернутого конуса. Нитрид титана, образующийся при горении нижнего слоя, имеет цвет, характерный для чистого нитрида титана, и, следовательно, не содержит значительных следов примеси. Поэтому верхний слой из смеси $Ti + 0.5C$ может выполнять роль своеобразного химического фильтра, связывающего примеси, содержащиеся в газообразном азоте, продуваемом через двухслойную систему.

Рис. 6 иллюстрирует изменение во времени положения первого фронта горения и изменение давления газа перед вакуумным насосом для четырехслойной засыпки. Примечательно, что при горении первого слоя $Ti + 0.5C$ давление у нижнего торца нарастает (не считая момента инициирования). При переходе фронта горения во второй слой (порошок титана) давление газа перед вакуумным насосом падает, что можно связать с увеличением скорости поглощения азота в ходе реакции азотирования титана и уменьшением скорости газовыделения. Длительная депрессия распространения фронта горения перед последним слоем титана (отсутствовавшая ранее перед его предыдущим слоем) вызвана активным поглощением азота в предыдущих слоях. Давление газа, несмотря на депрессию фронта, продолжает падать. Через ≈ 3 с после достижения фронтом азоти-

рования нижнего торца образца давление газа перед вакуумным насосом начинает расти до значения, близкого к первоначальному, и даже превышать его вследствие увеличения газопроницаемости продуктов реакции.

Как показали проведенные исследования, при сжигании в азоте засыпки, состоящей из четырех чередующихся слоев $Ti + 0.5C$ и Ti , наличие искусственно созданного спутного потока газа кардинально меняет характер распространения фронта горения, структуру и состав получаемых продуктов. Если в отсутствие вынужденного потока газа нижний слой засыпки, состоящий из порошка титана, не догорал и представлял собой просто спекшийся порошок титана серого цвета (см. рис. 7, слева), то при перепаде давления фронт горения доходил до конца засыпки (см. рис. 7, справа). Распространение его происходило следующим образом. После инициирования по засыпке двигался единый фронт горения. Затем он раздваивался. Впереди двигался слабо светящийся фронт взаимодействия титана и сажи, а за ним ярко светящийся фронт азотирования. Дойдя до конца первого слоя $Ti + 0.5C$, первый фронт останавливался, а фронт азотирования резко ускорялся (по-видимому, из-за увеличения проницаемости образца). После достижения второго слоя, состоящего из порошка титана, распространение фронта азотирования продолжалось. Дойдя до границы третьего слоя, состоящего из смеси порошков титана и сажи, фронт горения инициировал взаимодействие твердых реагентов и по слою быстро пробежал относительно слабо светящийся фронт взаимодействия титана и сажи. Дальнейшее горение образца было аналогично догоранию первого и горению второго слоя. Видеосъемка этапа остывания образца показала неоднородность этого процесса. В тех местах засыпки, где находился порошок титана, остывание длилось гораздо дольше, чем в слоях из смеси порошков $Ti + 0.5C$. Эти результаты свидетельствуют о стадийном характере горения титана в азоте. Оно состоит из стадии распространения с низкой глубиной превращения во фронте и объемной стадии догорания. После сгорания исходной порошковой смеси получаются достаточно прочные цилиндрические образцы диаметром, равным диаметру стаканчика, длина образцов зависит от начального расхода газа. Слои, состоящие из карбонитрида и нитрида титана, составляют единое целое. Поскольку слои различаются по цвету, то и об-

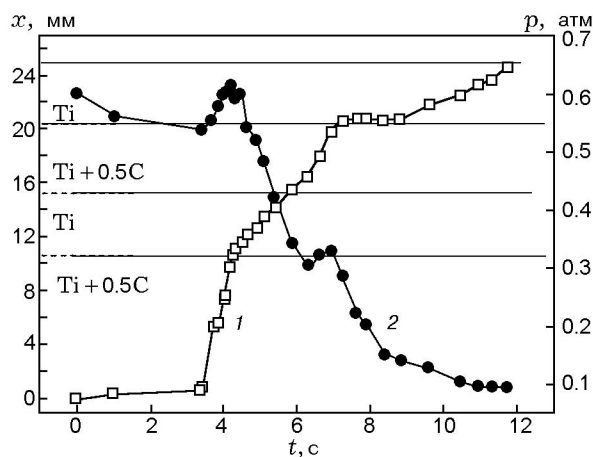


Рис. 6. Изменение во времени положения первого фронта горения для четырехслойной засыпки $(Ti + 0.5C)/Ti/(Ti + 0.5C)/Ti$ (кривая 1). Изменение давления газа перед вакуумным насосом (кривая 2):

начальный расход азота $3.3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$, исходная высота слоя 25 мм

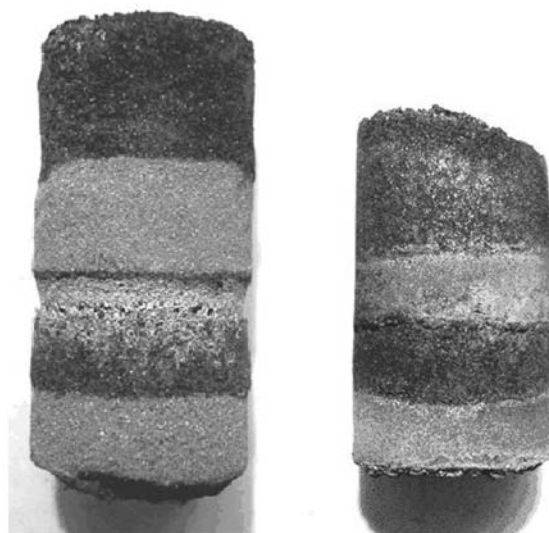


Рис. 7. Внешний вид продуктов горения четырехслойных систем $(Ti + 0.5C)/Ti/(Ti + 0.5C)/Ti$ в среде азота:

слева — в отсутствие принудительной фильтрации (исходная высота слоя 32 мм), справа — при начальном расходе азота $3.3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ (исходная высота слоя 25 мм); усадка системы после горения на фотографии справа 20 %

разец имеет чередующуюся окраску и чередующиеся по длине образца физико-химические свойства (см. рис. 7, справа).

В отсутствие откачки газа из концевой части образца сгорание многослойных образцов происходило с заметно меньшей скоростью и яркостью. Азот в этом случае может поступать в систему лишь за счет естественной фильтрации и диффузии. Наблюдалось существенное недогорание порошка титана с азотом, при этом нижний слой порошка титана лишь слегка спекался в верхней части, а фронт горения так и не достигал конечной части образца. В момент зажигания третьего слоя ($Ti + 0.5C$) фиксировалась яркая вспышка, а по предыдущему слою порошка титана проходил «обратный фронт». В месте контакта второго и третьего слоев образовалась круговая канавка (см. рис. 7, слева), связанная, по-видимому, с плавлением полупродуктов взаимодействия титана и азота. Несмотря на эту «отраженную» волну догорания, глубина превращения титана в нитрид остается весьма низкой. Конечный продукт не имеет характерного для нитрида титана золотистого окраса.

Рентгенофазовый анализ показал, что при горении в азоте однослойной засыпки $Ti + 0.5C$ в условиях искусственно созданного перепада давления (за счет вакуумного насоса) получается карбонитрид титана состава TiC_xN_y ($x \approx 0.5$, $y = var$). При отсутствии принудительной фильтрации в продуктах горения обнаруживается небольшое количество ($\approx 1\%$) непрореагировавшего титана, а содержание азота в конечном продукте ниже, чем при горении в условиях принудительной фильтрации. Из анализа соотношения высот интенсивностей дифракционных пиков на дифрактограммах продуктов горения следует, что при увеличении начальной скорости принудительной фильтрации газообразного азота содержание азота в фазе TiC_xN_y увеличивается. Рентгенофазовый анализ показал, что при горении слоя порошка титана образуются нитрид титана TiN и раствор азота в титане $Ti[N]$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Впервые проведено исследование закономерностей динамического фильтрационного горения пористой засыпки, состоящей из чередующихся слоев смеси $Ti + 0.5C$ и титанового порошка, при вынужденной спутной фильтрации азота.

- Для создания вынужденного потока газа через смесь порошков впервые предложено использовать вакуумирование нижнего торца исходной засыпки.

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

- При горении слоя из смеси порошков $Ti + 0.5C$ в одно- и многослойных образцах при продуве азотом наблюдалось одновременное распространение двух фронтов горения.

- В первом, относительно слабо светящемся фронте происходило взаимодействие титана и сажи, а во втором, более ярком фронте развивалось взаимодействие горячего $TiC_{0.5}$ с азотом.

- Во фронте азотирования не достигалась полная глубина превращения по азоту, и взаимодействие конденсированных полупродуктов с азотом продолжалось во всей области выше фронта азотирования.

- С помощью видеосъемки исследовано изменение положения фронта карбидизации и фронта азотирования при горении одно-, двух- и четырехслойной засыпок, а также изменение давления газа перед вакуумным насосом.

- При сжигании слоевых систем наличие искусственно созданного спутного потока азота кардинально меняло характер распространения фронта горения, структуру и состав получаемых продуктов.

- Рентгенофазовый анализ продуктов горения показал, что при увеличении начальной скорости принудительной фильтрации газообразного азота содержание азота в фазе TiC_xN_y увеличивается.

Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать вывод о том, что наличие небольшого перепада давлений активного газа (не выше 10^5 Па) дает возможность эффективно управлять процессом горения засыпки, состоящей из чередующихся разнородных слоев, структурой и составом полученных продуктов, а также подтверждают основные выводы конвективно-кондуктивной теории горения гетерогенных конденсированных систем и теории фильтрационного горения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов А. Г., Боровинская И. П., Володин Ю. Е. Горение пористых образцов металлов в газообразном азоте и синтез нитридов: Отчет ИХФ АН СССР. М., 1971.

2. Мержанов А. Г., Боровинская И. П., Володин Ю. Е. О механизме горения пористых металлических образцов в азоте // Докл. АН СССР. 1972. Т. 206, № 4. С. 905–908.
3. Мукасьян А. С., Шугаев В. А., Кирьяков Н. В. Влияние газообразных флюидных фаз на горение металлов в азоте // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 1. С. 9–13.
4. Боровинская И. П., Питюлин А. Н. Горение гафния в азоте // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 1. С. 137–140.
5. Авакян А. Б., Баграмян А. Р., Боровинская И. П., Григорян С. Л., Мержанов А. Г. Синтез карбонитридов переходных металлов // Процессы горения в химической технологии и металлургии. Черноголовка, 1975. С. 98–113.
6. Мукасьян А. С., Мартыненко В. М., Мержанов А. Г., Боровинская И. П., Блинов М. Ю. О механизме и закономерностях горения кремния в азоте // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 5. С. 43–49.
7. Degreve J., Puszynski J., Hlavachek V. Synthesis of nitrides and hydrides by filtration combustion // Mater. Process by SHS/ K. A. Gabriel et al. (Eds). MTL-SP-87-3. Watertown, MA, 1987. P. 247–278.
8. Костин С. В., Барзыкин В. В. Предел фильтрационно-диффузионного горения порошка титана в азоте при наличии дегазации // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 3. С. 58–63.
9. Мержанов А. Г. Твердопламенное горение. Черноголовка: ИСМАН, 2000.
10. Филоненко А. К. Нестационарные явления при горении гетерогенных систем, образующих тугоплавкие продукты // Процессы горения в химической технологии и металлургии. Черноголовка, 1975. С. 258–273.
11. Алдушин А. П., Сеплярский Б. С. Теория фильтрационного горения пористых металлических порошков. Черноголовка, 1977. (Препр. / АН СССР; ОИХФ.)
12. 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.
13. Алдушин А. П., Сеплярский Б. С. Инверсия структуры волны в пористой среде при продуве газа // Докл. АН СССР. 1979. Т. 249, № 3. С. 585–588.
14. Сеплярский Б. С. Природа аномальной зависимости скорости горения безгазовых систем от диаметра // Докл. АН. 2004. Т. 396, № 5. С. 640–643.
15. Беляев А. Ф., Боболев В. К., Коротков А. Н. и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М.: Наука, 1973.
16. Питюлин А. Н., Щербаков В. А., Боровинская И. П., Мержанов А. Г. О закономерностях и механизме послонного фильтрационного горения металлов // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 4. С. 9–17.
17. Алдушин А. П., Сеплярский Б. С., Шкадинский К. Г. К теории фильтрационного горения // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 1. С. 36–45.

*Поступила в редакцию 2/IX 2007 г.,
в окончательном варианте — 20/III 2008 г.*
