

## ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ПОЛЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ

С. Г. Вадченко, Н. Т. Балихина, В. Л. Кванин

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, 142432 Черноголовка  
vadchenko@mail.ru

Исследовано влияние плотности и диаметра коаксиального отверстия в цилиндрических образцах на основе Ti+V на скорость горения, относительное удлинение и макроструктуру образующихся продуктов. Предложен механизм разрушения образцов вследствие избыточного давления примесных газов. Показано, что на параметрической диаграмме «плотность — относительная толщина стенки образца» существуют области различных режимов горения и различной макроструктуры продуктов.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, система Ti+V, режимы горения полых цилиндрических тел.

При самораспространяющемся высокотемпературном синтезе (СВС) материалов [1], совмещенном с получением заготовок или изделий, важно достижение высоких скоростей горения. За счет короткого времени реакции распределение температуры по сечению образца получаемого продукта достаточно равномерное, что позволяет проводить дальнейшие технологические операции, например компактирование или экструзию [2, 3]. Одним из возможных способов ускорения реакции является ее инициирование в нескольких точках образца, но этот прием не всегда можно осуществить на практике. Исследование горения шихтовых заготовок для получения крупногабаритных изделий методом силового СВС-компактирования показало, что время сгорания заготовок с отверстиями для выхода образующихся газообразных продуктов уменьшается по сравнению со сплошными образцами.

Физической моделью для изучения возможности управления скоростью распространения пламени в шихтовой заготовке может служить элементарная ячейка в форме полового цилиндра или трубки, спрессованной из исследуемой шихты. Систематического исследования горения полых цилиндров, за исключением получения труб методом СВС с центрифугированием [4], не проводилось.

Важными для практического применения и удобными для изучения влияния газовой выделения на процесс горения являются системы на основе Ti+V. Первые представления о механизме горения таких смесей сформулированы в работе [5], в которой исследовано влияние на процесс марки и размера частиц исходных ре-

агентов, плотности образца, начальной температуры, соотношения реагентов и степени разбавления. В [5] также впервые учтено влияние газовой выделения на скорость горения образца.

Цель данной работы — исследование влияния коаксиальных отверстий в цилиндрических образцах на распространение горения и на макроструктуру образующихся продуктов в системах на основе Ti+V при использовании различных технологических и структурообразующих добавок.

### ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для приготовления смесей, состав которых приведен в таблице, использовали порошок титана марки ПТМ чистотой 99,5 % с размерами частиц менее 43 мкм, аморфный бор чистотой 94 %, сажа марки П804Т, медный порошок чистотой 99,8 % с размерами частиц менее 50 мкм. Из исходной шихты прессовали цилиндрические образцы различной плотности диаметром  $D = 7$  мм, сплошные и в виде трубок с внутренним диаметром  $d = 1,8; 3$  и 4 мм. Длина образцов варьировалась в диапазоне 15 ÷ 30 мм. Образцы помещали в реактор (рис. 1), снабженный кварцевым окном для наблюдения и видеозаписи горения, термодатчиками для регистрации температуры и входами для инертного газа. Эксперименты проводили в потоке аргона, обтекающем образец с нижнего торца. Горение образца инициировалось также с нижнего торца.

Процесс горения фиксировался видеокамерой, затем при кадровой развертке процесса

№ п/п	Состав шихты, %	$T_{ad}$ , К	$L$	$v$ , см <sup>3</sup> /г	$\Delta p/k$ , см <sup>3</sup> /с	Сохранение формы образца
1	Ti+2В — 50 Cu — 50	2890	0,52	42	8,5 ÷ 60	+
2	Ti+В — 60 Ti — 40	2033	0,49	77	28 ÷ 90	+
					90 ÷ 150	+/-
3	Ti+2В — 85 4В+С — 15	2700	0,22	71	22 ÷ 50	+
					50 ÷ 120	-
4	Ti+2В — 82 4В+С — 15 добавка — 3	2650	0,12	106	34 ÷ 70	+
					70 ÷ 120	-

Примечание.  $T_{ad}$  — адиабатическая температура горения,  $L$  — количество жидкой фазы на моль продукта,  $v$  — объем выделяющихся газов на единицу массы шихты,  $\Delta p$  — избыток давления газа в образце,  $k$  — коэффициент, +/- — сохранение/изменение формы образца.

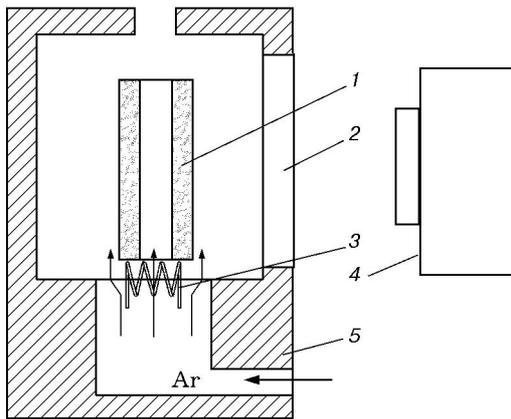


Рис. 1. Схема проведения эксперимента:

1 — образец, 2 — кварцевое окно, 3 — иницирующая спираль, 4 — видеокамера, 5 — реактор

определяли наблюдаемую скорость горения  $U$ . Так как в ходе горения образец дополнительно нагревался горячими газами от сгоревшей части образца (за счет естественной конвекции и потока аргона), на начальном участке образца процесс шел с ускорением. Поэтому скорость горения определяли на конечной (стационарной) стадии процесса. Для сплошных образцов стационарная скорость устанавливалась после сгорания участка длиной 3 ÷ 4 мм. На образцах с отверстиями этот отрезок увеличивался и достигал  $\approx 10$  мм. По разности исходной ( $h_0$ ) и конечной ( $h_f$ ) длин образца рассчитывали его относительное удлинение в ходе горения:  $\varepsilon = (h_f - h_0)/h_0$ . Для расчета истинной скорости горения в [5] была предложена формула  $U_{calc} = (1 + \varepsilon)U$ . При этом пред-

полагалось, что длина образца изменяется в зоне прогрева (перед фронтом горения), а векторы скоростей горения и расширения противоположны друг другу. Истинная скорость в этом случае представляет собой скорость превращения исходной шихты в конечный продукт и связана с массовой скоростью выражением  $U_{calc} = (1/\rho_0 s)dm/dt$ , где  $m$  — масса исходной шихты,  $\rho_0$  — плотность,  $s$  — площадь сечения образца. В нашем случае, когда направления векторов скорости горения и расширения образца совпадают, а расширение предположительно идет в зоне прогрева, наблюдаемая скорость равна истинной, однако это — истинная скорость горения расширенной шихты плотностью  $\rho = \rho_0/(1 + \varepsilon)$ . В случае сжатия образца истинная скорость горения может быть вычислена по формуле  $U_{calc} = (1 + \varepsilon)U$ .

Для определения количества выделяющихся из образцов газов опыты проводили в сосуде известного объема, и по разности давлений газовой фазы до и после горения оценивали объем выделившихся газов. Полученные данные весьма приближенные, так как выделяющийся газ быстро охлаждался и фактически в эксперименте определяли объем несконденсированной газовой фазы при комнатной температуре. Однако сравнение данных по газовой выделению в исследованных системах полезно для установления влияния примесных газов на скорость и механизм горения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследованные составы условно можно разделить на два типа: составы 1, 2 с относи-

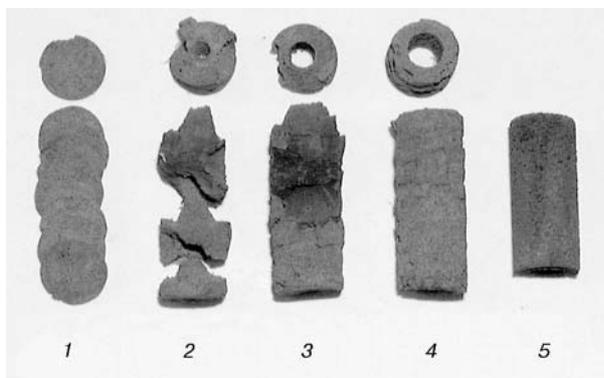


Рис. 2. Фотографии продуктов, образующихся при горении:

1-4 — состав 3,  $d = 0 \div 4$  мм; 5 — состав 1, сплошной образец

тельно большим содержанием жидкой фазы в продуктах и малым газовыделением в процессе горения, составы 3, 4 с относительно малым содержанием жидкой фазы и большим газовыделением (см. таблицу).

Процесс горения и макроструктура образующихся продуктов для составов 1, 2 и 3, 4, как правило, существенно различны. Образцы из составов 1, 2 (как сплошные, так и трубки) горят послойно, а продукты образуют прочные спеки. Для состава 2 на сплошных образцах и образцах с малыми диаметрами отверстий образуются сетки трещин. Сплошные образцы из составов 3, 4 горят в автоколебательном режиме, а полученные продукты расслаиваются на тонкие лепешки. При наличии отверстия в образцах из составов 3, 4 горение идет послойно, но при малых отверстиях и малых исходных плотностях шихты образцы в ходе горения разрушаются на крупные фрагменты. При увеличении диаметра отверстия и начальной плотности шихты образцы не разрушаются, получается прочный спек, но на образцах имеются трещины.

Типичные фотографии образующихся продуктов показаны на рис. 2. Отметим, что при горении трубчатых образцов структура излома имеет характерную конусовидную форму. «Острота» конуса уменьшается с увеличением диаметра отверстия.

Для корректного сравнения процессов горения сплошных и трубчатых образцов вначале определяли зависимости скорости горения и относительного удлинения от плотности (рис. 3, 4). Эти данные имеют также и са-

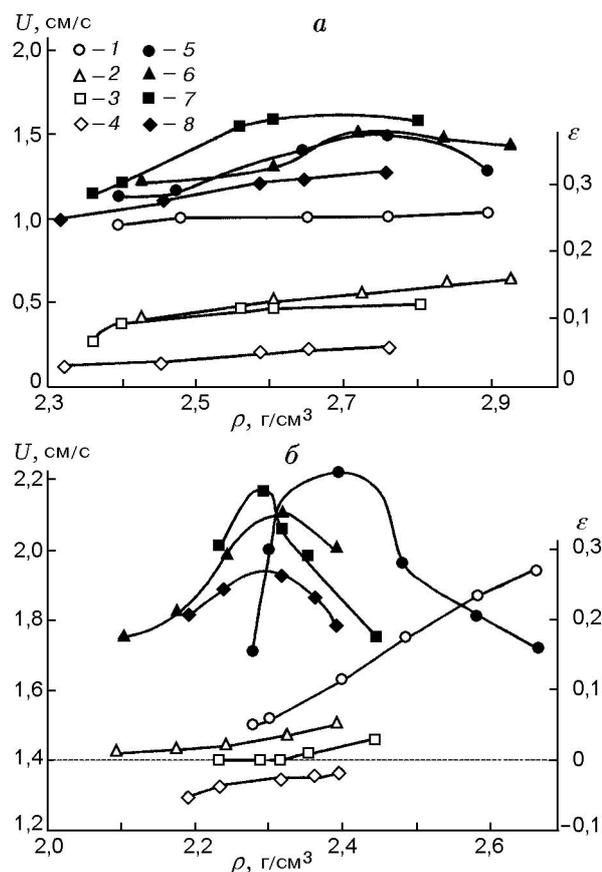


Рис. 3. Зависимости относительного удлинения (1-4) и наблюдаемой скорости горения (5-8) образцов из состава 1 (а) и состава 2 (б) от исходной плотности:

1, 5 — сплошной образец; 2, 6 —  $d = 1,8$  мм; 3, 7 —  $d = 3$  мм; 4, 8 —  $d = 4$  мм

мостоятельное значение для выяснения влияния условий газоотвода из зоны горения на скорость горения и изменение длины образцов.

При горении всех исследованных составов наблюдались следующие общие закономерности:

— относительное удлинение образцов растет с увеличением их плотности;

— относительное удлинение уменьшается при переходе от сплошных образцов к образцам с отверстиями и оно тем меньше, чем больше отношение  $d/D$ ;

— скорость горения при увеличении плотности возрастает до некоторого предела либо проходит через максимум.

Для образцов из составов 1, 2 характерно наличие критических значений плотности и диаметра отверстия, при которых происходит переход от удлинения образцов к их сжа-

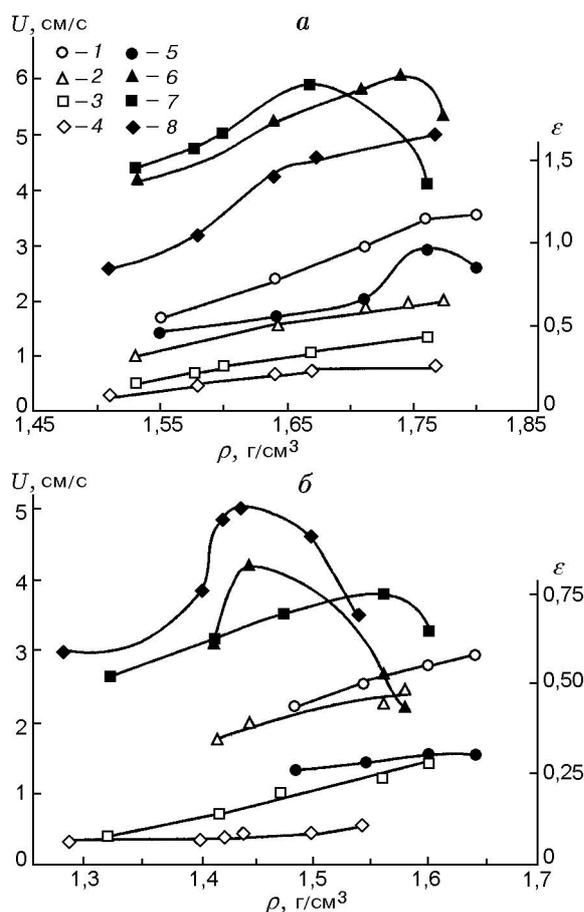


Рис. 4. Зависимости относительного удлинения (1–4) и наблюдаемой скорости горения (5–8) образцов из состава 3 (а) и состава 4 (б) от исходной плотности:

1, 5 — сплошной образец; 2, 6 —  $d = 1,8$  мм; 3, 7 —  $d = 3$  мм; 4, 8 —  $d = 4$  мм

тию. Для образцов из составов 3, 4 по аналогии можно говорить о существовании критических условий перехода от разрушения образцов к образованию плотных спеков. На рис. 5 показаны параметрические (в координатах «относительная длина пути фильтрации примесных газов — плотность образца») области существования различных режимов горения и образования продуктов в составе с большим газовыделением и малым содержанием жидкой фазы во фронте горения.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При горении исследованных составов наиболее существенны следующие процессы:

— выделение примесных газов и влаги, разрыхляющих исходную шихту во фронте го-

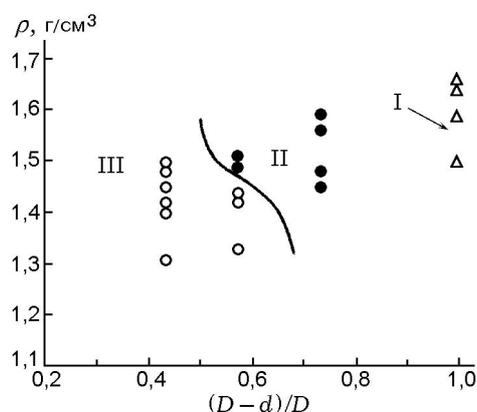


Рис. 5. Области реализации различных режимов горения образцов и структурообразования продуктов в составе 3:

I — автоколебательное горение, II, III — послойное горение с разрушением образцов на крупные фрагменты (II), с сохранением формы (III)

рения,

— плавление исходных, промежуточных или конечных продуктов и спекание частиц образующегося продукта.

Временной промежуток реализации одного из этих процессов или зона горения, в которой преобладает газовыделение с разрыхлением образца или спекание, а также прочностные характеристики продуктов реакции определяют режим горения и конечную структуру образца.

Рассмотрим влияние выделяющихся примесных газов на механизм горения и разрушения образца. Будем исходить из того, что примесные газы выделяются в зоне прогрева и истекают наружу через участок боковой поверхности образца, ширина которого сравнима с шириной зоны прогрева. Обоснованием данного предположения служит известный из экспериментов факт практической непроницаемости для газов спрессованных слоев исходной шихты (их проницаемость на 2–3 порядка меньше проницаемости сгоревшего слоя [6]). Во фронте горения или за ним существует слой продукта, обогащенный жидкой фазой, также непроницаемый для газа.

Образующиеся газы истекают через боковую поверхность образца согласно закону Дарси

$$\frac{dm}{dt} = V \rho_0^g s = \frac{K_p}{\mu} \frac{dp}{dx} \rho_0^g s \approx \frac{K_p}{\mu} \rho_0^g s g \frac{\Delta p}{l}, \quad (1)$$

где  $m$  — масса газа,  $V$  — линейная скорость истечения газа,  $\rho_0^g$  — плотность газа,  $s_g$  —

площадь сечения фильтрации газа,  $K_p$  — коэффициент проницаемости,  $\mu$  — вязкость газа,  $l = (D - d)/2$  — длина пути фильтрации газа. Газ истекает через наружную и внутреннюю стенки трубки на участке шириной  $\delta$ . Таким образом, площадь сечения, через которую истекает газ, составляет  $s_g = \pi(D + d)\delta$ .

Газ выделяется из образца со скоростью

$$\frac{dm}{dt} = u\rho sv, \quad (2)$$

где  $u$  — линейная скорость горения,  $\rho$  — плотность образца,  $v$  — объем газа, выделяющегося из единицы массы шихты,  $s = \pi/4(D^2 - d^2)$  — площадь сечения, в котором выделяется газ (площадь сечения фронта горения).

Приравнявая (1) и (2), можно определить избыточное давление газа в образце:

$$\Delta p = u(D - d)^2 \rho v \frac{\mu}{8\delta\rho_0^g K_p}. \quad (3)$$

Считая, что для каждой системы вязкость и плотность газа, а также ширина слоя  $\delta$  постоянны, запишем (3) в виде

$$\Delta p = ku(D - d)^2 \rho v. \quad (4)$$

Величина  $\Delta p$  пропорциональна объемной скорости газовыделения и характеризует напряжения, возникающие в образце. Так как расчет коэффициента  $k$  затруднен из-за отсутствия достоверных значений составляющих его констант, были вычислены значения  $\Delta p/k$  (см. таблицу). Для систем с относительно большим газовыделением и малым количеством жидкой фазы в продуктах горения существует критическое значение  $\Delta p/k$ , ниже которого образец сохраняется, а выше которого он расслаивается на тонкие диски (автоколебательный режим горения) либо разрушается на крупные фрагменты. В опытах с составами с большим содержанием жидкой фазы в продуктах образцы сохраняют форму при значительно больших расчетных значениях  $\Delta p/k$ . Это связано с тем, что предложенная модель не учитывает капиллярного растекания жидкой фазы и обусловленных этим процессов консолидации частиц реагентов или продуктов во фронте горения.

В заключение обсудим влияние на скорость горения потока аргона, направленного спутно волне горения, и естественной конвекции, обусловленной иницированием процесса с нижнего торца образца. Это влияние наиболее выражено на образцах с отверстиями и

проявляется как в увеличении скорости горения, так и в образовании конусной макроструктуры продуктов горения. Увеличение скорости процесса может быть обусловлено как дополнительным прогревом образца горячими газами, так и очаговым воспламенением образца впереди фронта горения. Последний механизм предложен в работе [7], где изучалось распространение волны горения по поверхности порошков титана в воздушной среде и было показано, что нагрев конвективным потоком горячего газа может вызвать очаговое воспламенение образца далеко перед фронтом горения. В нашей работе на тонкостенных образцах также иногда наблюдалось воспламенение верхнего торца образца раньше, чем до него доходил наблюдаемый на поверхности фронт горения. Однако для получения прямых доказательств реализации такого механизма горения необходимо проведение экспериментов с более длинными образцами.

Резюмируя полученные результаты, можно сделать вывод о возможности регулирования скорости горения образцов, их относительного удлинения и изменения макроструктуры путем создания в них аксиальных отверстий. Используемая в экспериментах модель элементарной ячейки шихтовой заготовки позволяет определить параметрические области различных режимов протекания процесса и дать предварительную оценку состояния продукта, подвергающегося дальнейшим технологическим операциям.

Авторы благодарят академика А. Г. Мержанова за внимание к работе и ценные замечания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов А. Г., Боровинская И. П. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез тугоплавких неорганических соединений // Докл. АН СССР. 1972. Т. 204, № 2. С. 366–369.
2. Горовой В. А., Кванин В. Л., Балихина Н. Т. и др. Закономерности силового СВС-компактирования крупногабаритных твердосплавных изделий // Кузнечно-штамповочное производство. 1996. № 1. С. 14–18.
3. Stolin A. M. SHS extrusion of long components // Intern. J. SHS. 1992. V. 1, N 1. P. 135–140.
4. Санин В. Н., Силяков С. Л., Юхвид В. И. Горение термитных систем при ортогональной ориентации векторов перегрузки и скорости горения // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34, № 1. С. 57–60.

5. **Merzhanov A. G.** Regularities and mechanism of pyrotechnic titanium-boron mixtures // 4th Symp. on Problems Connected with the Stability of Explosives, Molle, Sweden, May 31–June 2, 1976. P. 381–401.
6. **Щербаков В. А., Сычев А. Е., Штейнберг А. С.** Макрокинетика дегазации в процессе СВС // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 4. С. 55–61.
7. **Черненко Е. В., Пивцов А. Л.** Распространение горения по поверхности порошков титана // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 6. С. 68–74.

*Поступила в редакцию 23/VIII 2001 г.*

---