

## ГОРЕНИЕ ДВУХСЛОЙНЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ СМЕСИ Ti+2B

С.Г. Вадченко\*, О.Д. Боярченко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук, Черноголовка, Россия,  
\*vadchenko@ism.ac.ru

Кондуктивный механизм передачи тепла между частицами считается основным в волне горения экзотермических смесей порошков и лежит в основе теорий, описывающих закономерности горения «безгазовых» систем [1]. В системах с плавящимся реагентом или промежуточным продуктом важную роль в теплообмене приобретает капиллярное растекание [2, 3] и конвективный перенос расплава [4, 5]. Выделяющийся при дегазации примесей газ, может оказывать двойное влияние на скорость горения [6]. Если выделение газов происходит в зоне прогрева, его считают основной причиной торможения скорости горения из-за нарушения контактов между частицами и растрескивания образцов. Это характерно для систем с малой скоростью горения и, соответственно, с длинной зоной прогрева. Для быстрогорящих систем зона прогрева составляет ширину сравнимую с размерами частиц реагентов, и выделение газа происходит за фронтом горения. Если горящему образцу не дать возможности расширяться, то выделяющийся газ будет выталкивать расплав во фронт горения, улучшая теплообмен и увеличивая скорость горения. Непосредственное влияние конвективного переноса тепла через газовую фазу на скорость горения, как правило, не учитывали, так как теплоемкость и плотность газовой фазы значительно меньше, чем конденсированной. Исключение составляет небольшое количество работ, например [7, 8].

Смеси Ti+2B способны гореть в тонких слоях с высокой скоростью, причем скорость горения не уменьшается, а увеличивается с уменьшением толщины образца [6, 7]. Такое anomальное поведение этой системы дает возможность использования лент, полученных прокаткой этой смеси, в компактных энерговыделяющих, воспламенительных и других пиротехнических устройствах. Природа такой высокой скорости горения смеси Ti+2B до сих пор не ясна. Было обнаружено, что горение слоя смеси Ti+2B зажато между двумя плоскостями имеет максимум скорости горения (360 мм/с) при толщине 2 мм [8]. Вместе с тем, имеются данные показывающие, что с уменьшением диаметра образца скорость горения смесей Ti+2B+Cu монотонно уменьшается [9]. В этой работе также отмечены высокие значения скорости горения, наблюдаемые на образцах малого диаметра. Порошковые смеси других металлов IV и

V групп с бором, углеродом и кремнием, а также смеси металлов, образующих интерметаллиды, горящие со скоростью 100–200 мм/с не способны гореть в слоях толщиной менее 1–2 мм. В работах [4, 5, 9] anomальное поведение скорости горения от толщины слоя объясняется конвективным переносом расплава [10, 11].

В данной работе предложена экспериментальная модель для исследования влияния газовой фазы на перенос тепла в волне горения.

Порошки титана марки ПТС-1 и аморфного черного бора марки А в мольном соотношении Ti+2B смешивали в течение 1 часа. Полученную смесь прокатывали в валках в ленты толщиной 0,25–0,35 и шириной 15 мм и плотностью 2 г/см<sup>3</sup>. Ленту разрезали на отрезки длиной 50 мм и часть лент отжигали в вакууме при давлении около 10<sup>-2</sup> торр и температуре 700 С в течение 15 минут. Часть образцов была изготовлена из механически активированной смеси Ti+2B. Механическую активацию (МА) проводили в активаторе АГО-2 при ускорении движения шаров 90g и соотношении масса смеси/масса шаров 1:20. Время активации составляло 4,5 мин.

Отрезки лент склеивали между собой попарно с определенным зазором между ними через картонные прокладки (рис. 1). В первом случае ленты склеивались между собой с помощью только продольных прокладок, в результате чего образец имел сквозной канал прямоугольного сечения (тип I). Во втором случае между продольными направляющими вклеивали поперечные прокладки, играющие роль преграды для передачи тепла потоком горячего газа от сгоревшей части образца (тип II).

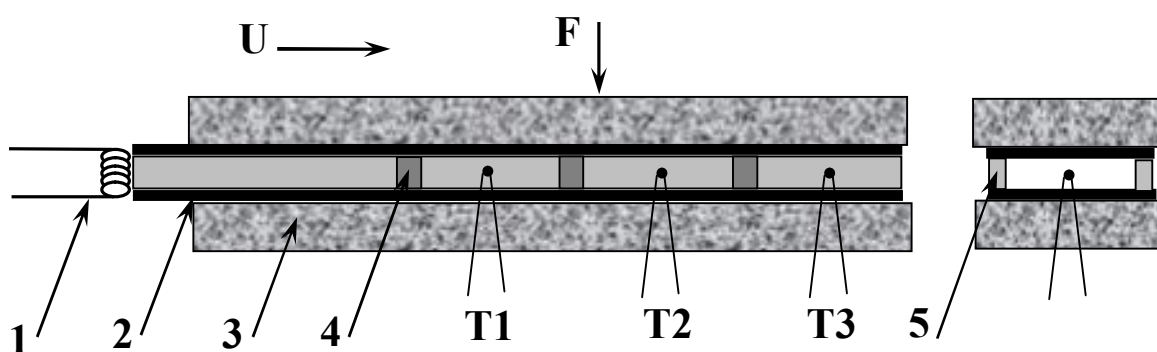


Рис. 1. Продольное и поперечное сечение образца. 1 – инициатор, 2 – ленты, 3 – графитовые блоки, 4, 5 – поперечные и продольные прокладки. T1–T3 –термопары.

Так как газ при давлениях близких к атмосферному давлению обладает малой теплоемкостью и плотностью, его роль в переносе тепла в процессе горения обычно не учитывают. Поэтому роль газов в процессах СВС при горении смесей металлов с неметаллами считается несущественной. Однако горение некоторых систем

сопровождается выделением большого количества газов (до  $100 \text{ см}^3/\text{г}$  смеси [12]). Основная масса газов выделяется во фронте горения и уносит с поверхности легкие раскаленные частицы. Как показала видеозапись процесса горения, большая часть возникающего пылегазового потока направлена в сторону несгоревшей части образца, прогревает ее и приводит к увеличению скорости горения. Поток возникает в связи с разностью давления за фронтом горения и перед ним. Давление за фронтом горения значительно выше как за счет газифицирующихся примесей, так и за счет нагрева газа, находящегося в зазоре и в порах образца. На рисунках 2а, 2б показаны характерные термограммы процессов горения образцов с зазором. В случае сквозного канала (рис. 2а,) наблюдается прогрев термопар, спай которых находился в канале, до  $800\text{--}1000^\circ\text{C}$ , после чего происходит резкий рост температуры. На первой относительно длительной стадии происходит практически одновременный прогрев всех термопар пылегазовым потоком. Вторая стадия, характеризующаяся резким ростом температуры, наблюдается при подходе к термопаре фронта горения в конденсированной фазе. При наличии перегородок движения газа в зазоре нет, и фиксируется только вторая стадия (рис. 2б). В этом случае термопара показывает такой же рост температуры, как и при горении лент без зазора, когда спай термопары находится в конденсированной фазе. Основным выделяющимся газом при горении образцов является водород [13]. Поэтому при горении образцов со сквозным каналом на выходе наблюдается длинный факел пламени, возникающий за счет высокой скорости истечения газа и его воспламенения при контакте с воздухом. При уменьшении толщины зазора и при наличии перегородок длина пламени уменьшается, что связано с уменьшением скорости горения и, соответственно, скорости выделения газа.

Если бы скорость горения определялась только теплопереносом в конденсированной фазе, отсутствие или наличие перегородок не играло бы роли. Но разогрев термопар газовым потоком и увеличение скорости горения показывает, что перенос тепла потоком газа в данном случае оказывает существенное влияние. Это влияние проявляется в предварительном прогреве поверхности лент и, возможно, наблюдаемая скорость горения, фиксируемая термопарами, относится к скорости горения на поверхности лент, а не по всей их толщине. Прогрев ленты от горячей поверхности приводит к увеличению скорости ее горения, проявляющейся в том, что внутренние области лент последовательно воспламеняются от горячей поверхности. Этот вывод не противоречит экспериментам работы, а подтверждается тем, что заливка

лент эпоксидной смолой, заполняющей шероховатости поверхности и частично поры образца, приводит к уменьшению скорости горения.

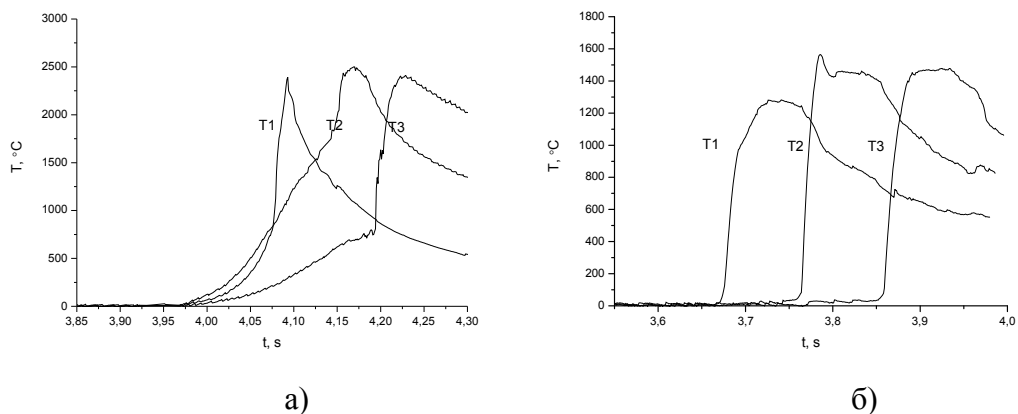


Рис. 2. Характерные профили температур при горении образцов: а) тип I; б) тип II.

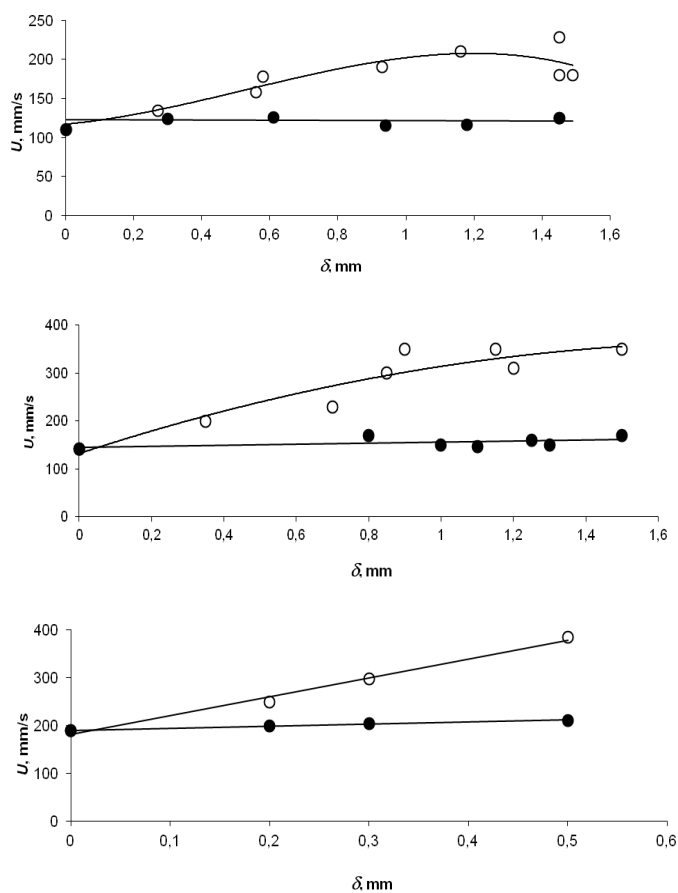


Рис. 3. Зависимость скорости горения от толщины зазора между лентами для исходных и отожженных лент и лент из механически активированной смеси.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-03-03531*

## Литература

1. А.К. Филоненко, В.А. Бунин, В.И. Вершинников, *Химическая физика*, 1982, № 2, стр. 260–264.
2. Sushilkumar P. Koundinyan, John V. Bdzil, Moshe Matalon, D.Scott Stewart, *Combustion and Flame*, 2015, vol. 162, pp. 4486–4496.
3. А.Г. Мержанов, *Успехи химии*, 2003, № 4, стр. 323–345.
4. А.С. Рогачев, А.С. Мукасян, *ФГВ*, 2015, № 1, стр. 66–76.
5. О.К. Лепаква, Л.Г. Расколенко, Ю.М. Максимов, *ФГВ*, 2000, № 5, стр. 27–36.
6. Ю.М. Максимов, О.К. Лепаква, Л.Г. Расколенко, *ФГВ*, 1988, № 1, стр. 48–53.
7. Б.С. Сеплярский, Н.И. Ваганова, *ДАН*, 2000, № 4, стр. 496–499.
8. Б.С. Сеплярский, *ДАН*, 2004, № 5, стр. 640–643.
9. M. Martinez Pacheco, R.H.V. Bouma, and L. Katgerman, *Advances in Science and Technology*, 2006, vol. 45, pp. 2656–2663.
10. S E. Whitney, and Hendrik J. Viljoen, *Papers in Reaction Kinetics*, 2003, vol. 6, pp. 393–430.
11. Э.Н. Руманов, А.Г. Мержанов, *ФГВ*, 1997, № 5, стр. 532–538.
12. S.G. Vadchenko, *Inter. Journal of SHS*, 2015, no. 2, pp. 89–92.
13. А.Г. Мержанов, А.С. Рогачев, Л.М. Умаров, Н.В. Кирьяков, *ФГВ*, 1997, № 4, стр. 439–447.