

12. Филатов В. М., Найбороденко Ю. С. // Горение конденсированных систем.— Черноголовка: ИХФ АН СССР, 1989.— С. 37—40.  
 13. Подергин В. А., Куликов В. А., Корчагин М. А. и др. // Теория и технология металлотермических процессов.— Новосибирск: Наука, 1974.— С. 137—144.

г. Алма-Ата

Поступила в редакцию 5/V 1991

УДК 546

Б. Е. Никольский, Н. Л. Патрагий, Ю. В. Фролов

## О ГОРЕНИИ БОРСОДЕРЖАЩИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Проведены экспериментальные исследования закономерностей распространения фронта экзотермической реакции при горении смесей бора с кислородсодержащими окислителями в зависимости от свойств порошков бора. Показано, что скорость горения борсодержащих гетерогенных конденсированных систем на основе окислителей нитрат натрия, перхлорат аммония пропорциональна удельной поверхности бора в составе и является линейной функцией поверхности частиц бора, доступной для прямого контакта с окислителем.

При горении гетерогенных конденсированных систем на основе бора отмечается стабильность воспламенения и горения составов, а также относительно высокая скорость распространения фронта пламени при использовании высокодисперсных порошков бора. Однако механизм горения таких композиций сложен и слабо изучен [1, 2].

Цель настоящей работы — изучение закономерностей распространения фронта экзотермической реакции при горении смесей бора с кислородсодержащим окислителем в зависимости от свойств порошков бора.

В экспериментах исследовали горение порошков бора аморфного ( $B_a$ ) различной дисперсности и поликристаллического ( $B_k$ ) с окислителем — нитратом натрия (НН) или стехиометрической смесью перхлората аммония (ПХА) с полиметилметакрилатом (ПММА). Удельная поверхность  $S$  и плотность исходных компонентов  $\rho$  приведены в табл. 1.

Образцы формовались методом глухого прессования при давлении 200 МПа и для обеспечения режима торцевого горения бронировались по боковой поверхности. Сжигание проводили в приборе постоянного давления в атмосфере азота при  $p = 10 \div 100$  МПа.

Результаты экспериментов представлены на рис. 1. Определить зависимость скорости горения от какого-либо параметра в явном виде весьма сложно. Кроме того, поскольку образцы содержат порошки бора, отличающиеся по характеристикам и по концентрации, то плотность (коэффициент уплотнения образцов  $K_y$ ) также переменна.

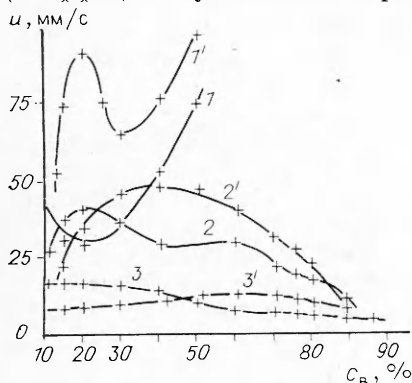


Рис. 1. Зависимость скорости горения от концентрации и удельной поверхности бора.

Окислитель: 1—3 — ПХА + ПММА, 1'—3' — НН;  $S_B$ ,  $m^2/g$ : 1, 1' — 15, 2, 2' — 5,8, 3, 3' — 0,8,  $p = 40$  МПа.

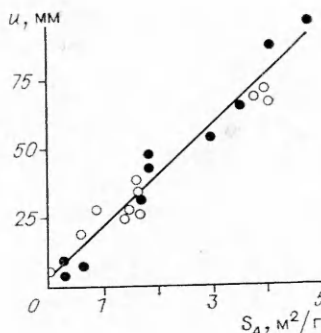


Рис. 2. Зависимость скорости горения борсодержащих составов от удельной поверхности окисления бора при использовании в качестве окислителя НН (темные точки) и ПХА + ПММА (светлые);  $p = 40$  МПа.

Таблица 1

Параметры	Компонент смеси				
	В <sub>а</sub>	В <sub>к</sub>	ПХА	НН	ПММА
$S, \text{ м}^2/\text{г}$	5,8; 15,0	0,8	4,2	<0,1	0,6
$\rho, \text{ г}/\text{см}^3$	1,73 *	2,34	1,95	2,26	1,12

\* Пикнометрическая плотность.

Таблица 2

Окислитель	$S_B, \text{ м}^2/\text{г}$	$c_B, \%$		Объемное содержание, %	
		НКП	ВКП	В(НКП)	Окислитель (ВКП)
НН	15	13	50	14,2	—
	5,8	15	80	17,0	12,5
	0,8	15	85	14,4	16,0
ПХА	15	10	50	—	—
	5,8	10	85	—	15,4
	0,8	10	90	—	15,0

Примечание. Прочерк означает, что концентрационные пределы по объемному содержанию бора в части экспериментов не определены из-за разрушения образцов при выпрессовке.

Попытка облегчить анализ и обобщить полученные результаты путем введения параметра, пропорционального относительному содержанию В в единице объема образца (т. е. фактически параметра, пропорционального плотности В  $P_B = c_B \rho_0$  ( $\text{г}/\text{см}^3$ ), где  $c_B$  — массовое содержание бора, а  $\rho_0$  — экспериментальная плотность образца), также не увенчалась успехом. Характер кривых практически не изменился.

Таким образом, зависимость скорости горения от типа, концентрации и дисперсности исходных компонентов принципиально неоднозначна. Можно лишь констатировать, что чем выше дисперсность В, тем больше значение  $u$  при прочих равных условиях.

В табл. 2 суммированы экспериментальные данные по концентрационным пределам горения рассматриваемых борсодержащих композиций. Эти пределы по оценкам совпадают с условием образования связанной пространственной структуры по каждому из компонентов [3], обеспечивающей непрерывность реакционной поверхности высокотемпературного окисления (горения бора), доступной для контакта с окислителем.

Существующий математический аппарат, к сожалению, не позволяет получить точное значение поверхностей контакта компонентов прессованных гетерогенных конденсированных систем, особенно в волне горения. Поэтому можно сделать лишь приблизительную оценку этих поверхностей, исходя из следующих соображений. Предполагается, что поверхность контакта одноименных частиц в реакции не участвует. Удельная поверхность бора в единице объема образца определяется параметром  $P_B$ . Поверхность контакта одноименных частиц и поверхность, свободная для реакции с окислителем, находятся пропорционально объемным концентрациям компонентов. Количество одноименных контактов оценивается по формуле [4]

$$N_k = -8 \ln(1 - \beta),$$

где считается, что объемная концентрация компонента  $\beta \leq 0,6$ . С другой

стороны, она не может быть и менее 0,16, т. е. ниже концентрационного предела горения по данному компоненту (16 % объема системы). Это означает, что корреляция между скоростью горения и удельной поверхностью дисперсного бора может существовать только в композициях, где объемная концентрация В и окислителя лежит в пределах от 16 до 60 %. Если при этом в композиции присутствует третий компонент (в рассматриваемом случае ПММА), то его концентрация также не должна превышать порогового значения — 16 % объема.

На рис. 2 в координатах скорость горения — «свободная» удельная поверхность окисления бора приведены экспериментальные результаты по скорости горения составов на основе бора с кислородсодержащими окислителями (см. рис. 1). Эта графическая зависимость может быть описана прямой с высоким коэффициентом корреляции  $R = 0,97$ :

$$u = (4,0 + 18,8S_B) \text{ [мм/с]}.$$

Таким образом, предположение о ведущей роли суммарной («открытой») для прямого контакта с окислителем) реакционной поверхности и о наличии корреляции между скоростью горения и удельной поверхностью окисления бора оправдано, по крайней мере, при горении смесей бора на основе кислородсодержащих окислителей. Это позволяет в первом приближении прогнозировать скорость горения борсодержащих композиций по известным массовым концентрациям и удельным поверхностям их компонентов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Charsley E. L., Hider J. A., Warrington S. B. // Proc. 11th int. pyrotechnics seminar, Colorado, 1986.
2. Charsley E. L., Laye P. G. et al. // Proc. 14th Int. pyrotechnics seminar, Jersey, 1989.
3. Фролов Ю. В., Пивкина А. Н., Никольский Б. Е. Влияние пространственной структуры реакционной среды на тепловыделение при образовании алюминидов никеля и циркония // ФГВ.— 1988.— 24, № 5.
4. Haller W. // J. Chem. Phys.— 1965.— 42, N 2.

г. Москва

Поступила в редакцию 28/III 1991

УДК 536.46

В. М. Филатов, Ю. С. Найбороденко

#### О МЕХАНИЗМЕ ГОРЕНИЯ НИКЕЛЬ-АЛЮМИНИЕВЫХ ТЕРМИТОВ

Изучено горение никель-алюминиевых термитов. Рассчитаны адиабатические температуры горения и экспериментально исследовано влияние соотношения компонентов, пористости, дисперсности, давления на скорость горения. С использованием микрогермопарного метода исследована структура волны горения и определен фазовый состав продуктов взаимодействия. Установлено, что скорость горения определяется низкотемпературной областью волны горения (930—1670 К), в которой образуются промежуточные соединения — алюминиды никеля. Максимальные температуры горения, достигаемые в зоне догорания в результате окислительно-восстановительной реакции, на скорость распространения не влияют. Определен фазовый состав продуктов горения никель-алюминиевых термитов.

Алюмотермические смеси типа алюминий — окисел переходного металла горят с высокими тепловыми эффектами и температурами горения, они представляют несомненный интерес для пиротехники. Изучение закономерностей и механизма горения таких систем проводилось в основном на примере железоалюминиевых термитов [1, 2], для которых характерно горение с узкой зоной, лимитирующей стадией которой является диссоциация оксида железа, свидетельствующая о кинетическом режиме процесса. Однако проведенные исследования закономерностей горения никель-алюминиевых термитов [3] выявили некоторые особенности, связанные с возможностью образования алюминидов.