

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ В ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ СОСТАВАХ ГАЗОВЗВЕСЕЙ АЛЮМИНИЯ И БОРА

Л. В. Бойчук, В. Г. Шевчук, А. И. Швец

Одесский Национальный университет им. И. И. Мечникова, 65100 Одесса, Украина  
vov@ictg.intes.odessa.ua

Экспериментально исследованы процессы распространения пламени по газовзвесям частиц бора, в смесях бора с алюминием и алюминия с инертной добавкой. Изучен характер распространения пламени и измерены скорости распространения пламени в двухкомпонентных составах, включающих бор. Показано, что для рассмотренного диапазона параметров взвесей добавка бора к алюминию замедляет распространение пламени. Снижение скорости распространения пламени в смесях бор — алюминий проявляется сильнее, чем в аналогичной композиции алюминий — инертная добавка. Это можно объяснить потреблением кислорода бором в относительно низкоэкзотермических реакциях образования субокислов бора и, соответственно, появлением дефицита окислителя для ведущего процесса горения алюминия.

Ключевые слова: пламя, скорость, газовзвесь, алюминий, бор.

Использование потенциальных возможностей любого горючего определяется не только его тепловым эффектом, но и скоростью реализации тепла. Высокие температуры воспламенения частиц бора [1] и большие времена их сгорания [2] предопределяют трудности организации процесса сжигания бора. Действительно, в работе [3], посвященной экспериментальным исследованиям распространения пламени в газовзвесах бора в вертикальных трубах, установлено, что инициировать процесс в бороздушных смесях не удается вплоть до концентрации горючего  $C \approx 400$  г/м<sup>3</sup>. В борокислородных смесях при парциальных давлениях кислорода  $p_{ox} = 0,04 \div 0,07$  МПа не удалось достичь устойчивого распространения пламени, наблюдались лишь кратковременные периоды распространения пламени с последующим прекращением процесса. При  $p_{ox} \geq 0,07$  МПа процесс горения был ламинарным с постоянной видимой скоростью и почти плоской поверхностью фронта пламени. В чистом кислороде в диапазоне концентраций  $200 \div 400$  г/м<sup>3</sup> нормальная скорость пламени  $V_n$  не зависела от концентрации бора и равнялась 0,08 м/с (для кристаллического бора со средним диаметром частиц  $d_m \approx 6$  мкм). Близкие значения  $V_n$  получены в свободных борокислородных облаках ( $V_n \approx 0,1$  м/с) [4] и для бунзенского предварительно перемешанного факела

( $V_n \approx 0,07$  м/с) [5]. Указанные значения  $V_n$  много меньше таковых для аэрозвесей частиц алюминия, магния, циркония [6].

В связи с изложенным выше актуальна задача интенсификации процесса распространения пламени путем добавления легковоспламеняющихся быстрогорящих горючих к газовзвеси частиц бора. Применительно к проблемам воспламенения бора в [7] показано, что небольшие массовые добавки (5 ÷ 10 %) магния и алюминия существенно интенсифицируют воспламенение газовзвеси частиц бора, снижая при этом температуру воспламенения и уменьшая период индукции.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований процесса распространения пламени в двухкомпонентных аэрозвесах бора и алюминия. Опыты проводились в вертикальной полуоткрытой кварцевой трубе диаметром 0,036 м и длиной 1 м. Зажигание осуществлялось у верхнего открытого конца трубы электрической искрой. Подробно методика проведения опытов изложена в [8]. Использовались узкодисперсные порошки кристаллического бора ( $d_m \approx 6,2$  мкм) и сферического алюминия ( $d_m \approx 6$  мкм). Нормальная скорость пламени определялась следующим образом: экспериментально измерялась видимая скорость пламени ( $V_v$ ) и отношение поверхности пламени ( $S_s$ ) к площади его основания ( $S_b$ ),  $k = S_s/S_b$ , а затем определялось значение  $V_n = V_v/k$ . В качестве поверхнос-

Работа выполнена при поддержке INTAS (грант ESA 99-00138).

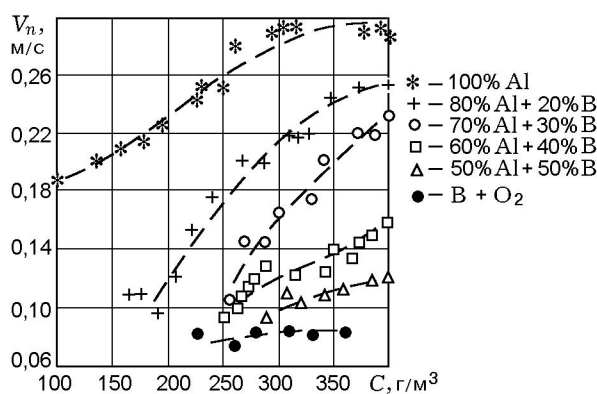
ти фронта пламени принималась поверхность, огибающая видимую зону свечения и имеющая форму параболоида вращения, обращенного своей вершиной в исходную смесь. Высота и радиус параболоида находились по данным кино съемки. Определяемая таким образом площадь поверхности пламени отличалась не более чем на 5 % от значений, полученных численным интегрированием поверхности вращения линии, огибающей проекцию фронта пламени.

В бороалюминиевых аэровзвесах удалось инициировать распространение пламени в трубе вплоть до содержания бора в смеси 50 %. При содержании бора более 30 % процесс горения носил ламинарный характер с постоянной видимой скоростью и гашением во второй половине трубы. При этом при низких концентрациях горючего форма фронта пламени близка к плоской, а по мере увеличения концентрации коэффициент  $k$  монотонно возрастал. При небольших добавках бора (10÷20 %) в ряде случаев наблюдался характерный для распространения пламени по аэровзвеси алюминия переход ламинарного режима в вибрационный с последующим турбулентным распространением пламени в нижней части трубы [8]. Коэффициенты трансформации фронта  $k$  при этом близки к таковым для взвесей алюминия.

Таким образом, общий характер процесса горения позволяет сделать вывод о том, что добавление медленно горящего бора к сравнительно быстро горящему алюминию стабилизирует процесс, поскольку распространение пламени в двухкомпонентных бороалюминиевых газозвесах протекает преимущественно в ламинарном режиме и носит более устойчивый характер.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке в виде зависимости нормальной скорости пламени  $V_n$  от суммарной концентрации горючего  $C$  с различным содержанием бора в смеси. Здесь же для сравнения приведены скорости пламени для однокомпонентных аэровзвесей алюминия и борокислородных взвесей (во всех случаях нормальные скорости определялись на участке ламинарного режима). Как видно из рисунка, с ростом суммарной концентрации горючего и уменьшением содержания бора во всех случаях скорость пламени увеличивается.

При низких концентрациях горючего даже небольшая добавка бора заметно снижает ско-



Зависимость нормальной скорости пламени от концентрации горючего в аэровзвесах бор+алюминий различного состава

рость пламени; так, при  $C = 200$  г/м<sup>3</sup> замена алюминия 20 % бора приводит к двухкратному снижению скорости по сравнению со скоростью пламени во взвеси чистого алюминия. По-видимому, в области низких суммарных концентраций горючего ( $C = 200 \div 250$  г/м<sup>3</sup>) при содержании бора в смеси 20 % и более тепла, выделяющегося при сгорании алюминия, недостаточно для воспламенения частиц бора. Вследствие этого бор в такой двухкомпонентной смеси оказывается инертным тепловым стоком, что и приводит к значительному снижению скорости пламени, а при концентрациях ниже 180 г/м<sup>3</sup> — и к невозможности инициирования горения взвеси.

При достаточно больших концентрациях горючего ( $C \approx 350 \div 400$  г/м<sup>3</sup>), содержащего не более 30 % бора, скорости пламени приближаются к таковым во взвесах алюминия, т. е. бор при таких параметрах слабо влияет на распространение пламени. При увеличении содержания бора до 40 ÷ 50 %, несмотря на его высокую теплотворную способность, даже при достаточно больших суммарных концентрациях горючего, скорость пламени в двухкомпонентной газозвеси значительно ниже скорости пламени в алюминиевых взвесах.

Для выяснения энергетической роли бора приведем простые оценки скорости распространения пламени в смеси, считая бор инертным компонентом, играющим роль исключительно теплового стока. В простейшем случае чисто кондуктивного механизма распространения пламени по взвеси [9] нормальная скорость определяется следующим соотношением:

$$V_n^2 = \frac{\lambda}{\tau_c} \frac{1}{c\bar{\rho}} \frac{T_{ad} - T_i}{T_i - T_0}. \quad (1)$$

Здесь  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности газовой смеси,  $\tau_c$  — время горения частицы горючего,  $c\bar{\rho}$  — эффективная объемная теплоемкость взвеси ( $(c\bar{\rho})_{Al} = c_g \rho_g + c_{Al} C_{Al}$  для алюминия и  $(c\bar{\rho})_m = c_g \rho_g + c_{Al} C_{Al} + c_B C_B$  для смеси бора с алюминием),  $c_g$ ,  $c_{Al}$ ,  $c_B$  — удельные теплоемкости воздуха, алюминия, бора,  $C_{Al}$ ,  $C_B$  — массовые концентрации алюминия и бора соответственно,  $\rho_g$  — плотность воздуха,  $T_i$  — температура газа в момент воспламенения частиц алюминия. Учитывая малые размеры используемых частиц, в дальнейшем будем полагать, что  $T_i$  — температура самовоспламенения частиц алюминия,  $T_{ad}$  — адиабатическая температура сгорания,  $T_0$  — начальная температура взвеси.

Используя соотношение  $QC_{Al} = (c\bar{\rho})(T_{ad} - T_0)$ , где  $Q$  — тепловой эффект сгорания в расчете на единицу массы алюминия, перепишем (1) в виде:

для взвеси алюминия —

$$V_{Al}^2 = \frac{\lambda}{\tau_c^{Al}} \frac{1}{(c\bar{\rho})_{Al}} \left[ \frac{QC_{Al}}{(c\bar{\rho})_{Al}(T_i - T_0)} - 1 \right], \quad (2)$$

для смеси алюминия с бором —

$$V_m^2 = \frac{\lambda}{\tau_c^m} \frac{1}{(c\bar{\rho})_m} \left[ \frac{QC_{Al}}{(c\bar{\rho})_m(T_i - T_0)} - 1 \right]. \quad (3)$$

Суммарную концентрацию  $C_t = C_{Al} + C_B$  в дальнейшем считаем постоянной. Из (2) и (3) следует

$$\frac{V_m}{V_{Al}} = \frac{(c\bar{\rho})_{Al}}{(c\bar{\rho})_m} \left[ \left( 1 - \frac{T_i - T_0}{QC_{Al}} (c\bar{\rho})_m \right) / \left( 1 - \frac{T_i - T_0}{QC_{Al}} (c\bar{\rho})_{Al} \right) \right]^{1/2} \sqrt{\frac{\tau_c^{Al}}{\tau_c^m}}. \quad (4)$$

Считая температуру  $T_i$  неизменной для обоих типов горючих взвесей, а  $\tau_c^{Al} \approx \tau_c^m$ , получим

$$\frac{V_m}{V_{Al}} = \frac{(c\bar{\rho})_{Al}}{(c\bar{\rho})_m} \left[ \left( 1 - \frac{T_i - T_0}{QC_{Al}} (c\bar{\rho})_m \right) / \left( 1 - \frac{T_i - T_0}{QC_{Al}} (c\bar{\rho})_{Al} \right) \right]^{1/2}. \quad (5)$$

Для численных оценок используем следующие значения теплофизических величин:  $(T_i - T_0) = 2000$  К;  $C_m = 0,3$  кг/м<sup>3</sup>;  $c_p^B = 2,12 \cdot$

$10^3$  Дж/(кг·К);  $c_g = 1,13 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К);  $c_p^{Al} = 1,17 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К);  $Q = 30,9 \cdot 10^6$  Дж/кг.

Результаты расчета по формуле (5) и их сопоставление с экспериментальными данными приведены в таблице. Анализ результатов привел к неожиданному выводу: бор в смесях с алюминием обладает существенно большим ингибирующим воздействием на распространение пламени по сравнению с ситуацией, когда его можно считать инертным компонентом.

Учитывая приближенный характер проведенных оценок, прежде чем переходить к развитию какой-либо гипотезы о природе столь необычного факта, необходимо провести аналогичные опыты со смесями алюминия с действительно инертным компонентом.

Условия проведения таких опытов требуют инертной добавки с размером частиц не больше размера частиц исходного алюминия (с тем, чтобы предотвратить их существенное температурное запаздывание по отношению к газу), не образующих агломератов как между собой, так и с частицами алюминия в процессе создания взвеси. Эти условия оказались очень жесткими. В предварительных опытах было испытано более десятка различных порошкообразных веществ (прежде всего, оксиды металлов), и только одно из них — Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> с размером частиц около 1 мкм — позволило удовлетворить исходным условиям. В дальнейшем тестовые испытания инертной добавки проводились именно с этим веществом при прочих условиях, идентичных условиям в опытах со смесями алюминий — бор (см. таблицу, там же приве-

Смесь	C <sub>i</sub> , %	V <sub>m</sub> /V <sub>Al</sub>	
		Эксперимент	Расчет
Al+B	0	1	1
	20	0,68 ± 0,07	0,85
	30	0,53 ± 0,06	0,79
	40	0,44 ± 0,06	0,66
	50	0,37 ± 0,04	0,52
Al+Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0	1	1
	20	0,96 ± 0,04	0,91
	30	0,92 ± 0,05	0,87
	40	0,80 ± 0,05	0,80
	50	Не горит	Не горит

дены оценки по формуле (5)). При этом газодинамическая картина процесса и структура зоны горения близки к таковым в смесях алюминий — бор. Исключение составила композиция 50 % Al + 50 % Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, для которой не удалось организовать горение.

Из таблицы следует, что в случае чисто инертной добавки расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются в пределах погрешности экспериментов. Это свидетельствует о правомочности используемого приближения для оценки роли бора в его смесях с алюминием.

Как следует из (4), основным фактором, обуславливающим уменьшение скорости пламени в смесях алюминий — бор по сравнению с таковой в смесях алюминий — инерт, является уменьшение множителя  $\tau_c^{Al} / \tau_c^m$  за счет возрастания времени горения частиц алюминия в смесях с бором и, как следствие, за счет уменьшения интенсивности теплоподвода в предпламенную зону.

Причина этого явления, на наш взгляд, заключается в следующем. Бор по сравнению с алюминием характеризуется большими значениями теплоемкости и времени горения. Вследствие этого большую часть времени горения алюминия бор инертно греется и воспламеняется уже в конце зоны горения алюминия. Горение же самого бора протекает через низкоактивационные стадии с образованием BO и B<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (эти стадии характеризуются небольшими тепловыми эффектами [2]), а максимальное выделение тепла от горения бора происходит при объемном догорании полупродуктов до конечного продукта B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> за фронтом пламени. Это приводит к значительному увеличению времени горения частиц алюминия за счет расходования кислорода на образование борных полупродуктов и расширения зоны горения. Иными словами, уменьшение концентрации кислорода в реакциях окисления бора тормозит процессы горения алюминия и приводит к расширению зоны горения.

Таким образом, при большом содержании бора во взвеси значительная часть тепла, выделяющегося при горении алюминия, расходуется на практически инертный прогрев бора.

Само горение бора сопровождается уменьшением концентрации окислителя в зоне горения, а тепло при его сгорании в основном выделяется на больших расстояниях от предпламенной зоны и не оказывает теплового влияния на скорость пламени. Подтверждением этому служат результаты спектральной диагностики борного факела [6], показывающие, что зона конденсации B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, в которой реализуется максимальное тепловыделение от сгорания бора, находится на значительном удалении от зоны горения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Polishchuk D. I., Zolotko A. N., Shevchuk V. G. Ignition of boron particles // Arch. Termodinamiki y Splania. 1976. P. 81–85.
2. King M. K. Ignition and combustion of boron particles and clouds // J. Spacecraft and Rockets. 1982. N 4. P. 294–306.
3. Maček A. Combustion of boron particle at atmosphere pressure // Combust. Sci. Technol. 1969. V. 1. P. 181–191.
4. Вовчук Я. И., Золотко А. Н., Клячко Л. А. и др. Время горения бора с учетом влияния диффузионного и кинетического факторов // Химическая физика процессов горения и взрыва. Черноголовка, 1977. С. 90–93.
5. Shevchuk V. G., Boychuk L. V., Goroshin S. V., Kostyshin Yu. N. Comparative research of the flame propagation in boron and Al, Mg, Zr, Fe dust clouds // Combustion of Boron Based Solid Propellants and Solid Fuels/ K. K. Kuo (Ed.). Boca Raton: CRC Press, 1993. P. 478–484.
6. Goroshin S. V., Ageev N. D., Shoshin Yu. L., Shevchuk V. G. The premixed laminar flames in the boron dust clouds // Ibid. P. 469–477.
7. Золотко А. Н., Мацко А. М., Полищук Д. И. и др. Воспламенение двухкомпонентной газозвеси частиц металлов // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 1. С. 23–26.
8. Асланов С. К., Шевчук В. Г., Костышин Ю. Н. и др. Закономерности вибрационного горения аэрозвесей // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 2. С. 36–43.
9. Лейпунский О. И. О зависимости от давления скорости горения черного пороха // Журн. физ. химии. 1960. Т. 34, № 1. С. 177–181.

Поступила в редакцию 19/XII 2001 г.