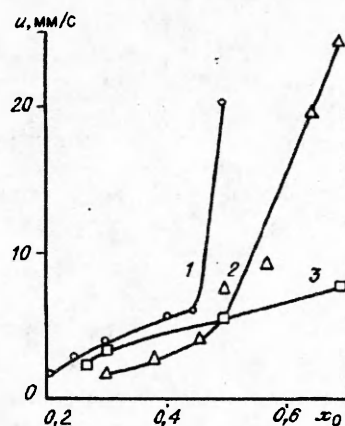


Рис. 5. Зависимость скорости горения в потоке $N_2 + O_2$ от концентрации кислорода.
1 — сплав β_2 ; 2 — ОТ4-1В; 3 — Ст. 20.



основе титана ОТ4-1В и β_2 в области $v < 30$ м/с характеризуются более сложным видом зависимостей $u(x_0)$: начиная с $x_0 = 0,45$ темп роста u с повышением x_0 резко возрастает.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы. В потоке $N_2 + O_2$ с $x_0 = 0,25$ при $v \geq 53$ м/с реализуется режим самоподдерживающегося горения Ст. 20. С увеличением x_0 до 0,3 предельные скорости потока газа для всех сплавов резко снижаются.

В области $v < 30$ м/с, $x_0 < 0,45$ скорости горения всех сплавов не превышает 6 мм/с, при $x_0 > 0,45$ с ростом x_0 скорость горения сплавов β_2 и ОТ4-1В резко увеличивается.

Процесс горения титановых сплавов, в отличие от горения Ст. 20, сильно интенсифицируется с повышением скорости потока $N_2 + O_2$ в области $v > 30$ м/с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маркштейн Г.Х. Горение металлов // РТК. — 1963. — 1, № 3. — С. 3.
2. Иванов Б.А. Безопасность применения материалов в контакте с кислородом. — М.: Химия, 1984.
3. Ефимов Б.Г., Клюкин С.С., Кувяев П.Н. и др. Влияние потока воздуха на горение титановых пластин // ФГВ. — 1989. — 25, № 2. — С. 29.
4. Борисова Е.А., Берникова Н.Г., Ефимов Б.Г. др. Влияние состава титановых сплавов на характер горения в потоке воздуха // ФГВ. — 1991. — 27, № 3. — С. 35.

140160, г. Жуковский, ЦАГИ

Поступила в редакцию 11/1 1994,
после доработки — 25/IV 1994

УДК 536.46

Л.Я. Кашпоров, Ю.Е. Шелудяк, В.В. Ухов

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

В рамках энтальпийного подхода проведен анализ экспериментальных данных о скорости горения различных систем на основе алюминия. Определены тепловые параметры волны горения этих смесей и установлено, что температура их воспламенения в волне стационарного горения близка к температуре плавления алюминия.

В рамках энтальпийного подхода [1—7] скорость стационарного горения определяется уравнением

$$u\rho = \frac{q_m}{h_m - h(T_n)}, \quad (1)$$

где u — линейная скорость горения; ρ — плотность; h — энтальпия; T_n — начальная температура; q_m и h_m — тепловой поток и максимальная энтальпия в критическом сечении волны горения. Параметр q_m характеризует внешнее тепловое воздействие на горящий образец и зависит от тепловыде-

ления в результате протекания химических реакций в зоне высоких температур и теплопередачи из зоны высоких температур к критическому сечению волны горения. Параметр h_m характеризует внутреннее тепловое состояние горючей системы и зависит от природы горючей системы и протекания химических реакции в прогревом слое.

Параметры критического сечения волны горения связаны с энергией активации E химической реакцией в прогревом слое соотношением

$$\frac{E}{R} = \frac{T_m^2 c_p(T_m)}{h(T_m) - h(T^*)} f_n(\eta), \quad (2)$$

где R — универсальная газовая постоянная; c_p — изобарная теплоемкость; T_m — температура критического сечения волны горения; T^* — температура, до которой можно нагреть инертную систему количеством тепла h_m ; η — доля вступившей в реакцию горючей системы; $f_n(\eta) \approx 1 + 0,5n\eta$ при малых η ; n — порядок реакции. Для реакции нулевого порядка и при постоянстве теплоемкости уравнение (2) переходит в уравнение Н.Н. Семенова для критической температуры воспламенения

$$\frac{E}{R} = \frac{T_m^2}{T_m - T^*}. \quad (3)$$

Поэтому величину T_m можно рассматривать как температуру воспламенения слоя горючей системы поступающим из зоны высоких температур тепловым потоком за характерное для процесса стационарного горения время t^* . По порядку величины t^* соответствует времени полного протекания химической реакции при максимальной температуре горения.

При экспериментальном исследовании воспламенения одиночных частиц алюминия в высокотемпературной газовой среде установлено, что воспламенение наблюдается только в том случае, когда температура газа превышает 2210—2360 К [8]. Температура воспламенения T_b одиночных частиц алюминия близка к температуре плавления окисла Al_2O_3 $T_{пл} = 2327$ К и, по данным [8], малочувствительна к изменению размера частиц алюминия и содержания кислорода в газовой среде. Однако имеются свидетельства и о сильной зависимости T_b от размера частиц алюминия d_{Al} , причем зависимость $T_b(d_{Al})$ проходит через минимальное значение $T_b \approx 1000$ К при $d_{Al} = 5 \div 10$ мкм [9, 10]. Отмечается также уменьшение температуры воспламенения частиц алюминия в продуктах горения конденсированных смесевых систем и порохов до $T_b = 1300 \div 1500$ К даже при $d_{Al} = 30 \div 50$ мкм, а также при увеличении концентрации частиц алюминия в потоке или составе [9, 10].

По мнению большинства исследователей воспламенение частиц алюминия происходит после потери окисной пленкой защитных свойств в результате ее расплавления. Частичная потеря защитных свойств окисной пленки в результате ее растрескивания возможна и при более низких температурах, так как коэффициент теплового расширения твердого алюминия в 3,5 раза выше, чем у окисла, и, кроме этого, объем алюминия при плавлении увеличивается на 6,4 %. Однако при низкоскоростных режимах нагрева проступающий через образовавшиеся трещины активный алюминий быстро окисляется и защитные свойства окисной пленки восстанавливаются без существенного саморазогрева частицы.

В работах [9, 10] высказано предположение, что при высокоскоростном режиме нагрева защитные свойства окисной пленки не успевают восстанавливаться. В итоге становится возможным интенсивный саморазогрев частицы и снижение минимальной температуры, при которой тепловыделение за счет экзотермической химической реакции начинает превышать теплотери в окружающую среду. Наиболее жесткие условия нагрева частиц алюминия можно реализовать в волне стационарного горения го-

Тепловые параметры волны горения систем на основе алюминия

Ис-точник	Горючая система	d_{Al} , мкм	n	T_n , К	h_m , кДж/кг	q_m , кВт/м ²	δu , %	T^* , К
[12]	Al + (20 % O ₂ + 80 % N ₂) $B_{Al} = 0,45 \div 0,50$ кг/м ³	6	3	400—600	614,2	114,8	1,4	881
					605,2	117,2	1,4	874
[13]	Al + (20 % O ₂ + 80 % He) $B_{Al} = 0,45 \div 0,50$ кг/м ³	6	4	400—650	732,4	450,8	1,9	839
					712,0	467,8	2,1	834
[13]	Al + (41 % O ₂ + 59 % He) $B_{Al} = 0,4 \div 0,5$ кг/м ³	6	3	400—600	914,6	121,0	0,1	826,5
					866,7	124,9	0,8	801,5
[14]	25 % Al + 75 % Fe ₂ O ₃ $\Pi = 0,42$	< 10	6	293—573	536,7	26530	2,4	885
				573—723	735,4	43770	0,1	964
[15]	47 % Al + 53 % Zr $\Pi = 0,4$	56	5	293—673	422,3	8972	3,7	931,4
[15]	37 % Al + 63 % Zr $\Pi = 0,4$	56	4	293—573	490,7	16190	1,4	933,6
[16]	17,5 % Al + 82,5 % Cu $\Pi = 0,4$	306	4	623—773	308,2	1134	2,1	883
[16]	12,5 % Al + 87,5 % Cu $\Pi = 0,4$	306	4	698—798	318,1	1781	4,2	933,6

рючих систем (например, двухкомпонентных смесей алюминия с окислителями). В соответствии с предположением [9, 10] можно ожидать, что температура воспламенения частиц алюминия в волне стационарного горения T_m будет ниже экспериментально полученных значений T_v одиночных частиц алюминия в высокотемпературной газовой среде.

В настоящей работе определены тепловые параметры критического сечения волны горения q_m , h_m , T^* , T_m из анализа экспериментальных зависимостей $u(T_n)$ для газозвесей алюминиевого порошка в различной атмосфере [11—13], а также железо-алюминиевого термита [14] и СВС-систем на основе алюминия [15,16]. В таблице приведены полученные из данных [11—16] методом наименьших квадратов значения тепловых параметров волны горения h_m и q_m и соответствующие значения T^* для газозвесей алюминиевого порошка в различной атмосфере и для конденсированных систем. Указаны также диапазоны начальных температур T_n , число n анализируемых экспериментальных значений скорости горения, средняя квадратическая погрешность аппроксимации экспериментальных данных δu , средний размер частиц алюминия d_{Al} , содержание алюминия в газозвеси B_{Al} и пористость Π конденсированных систем. Для газозвесей приведено два набора оценок — для минимального (верхняя строчка) и максимального содержания алюминия в газозвеси в пределах указанного авторами разброса значений B_{Al} . Содержание компонентов газовой атмосферы газозвесей алюминия указано в объемных долях, а содержание компонентов конденсированных систем — в массовых долях.

Для всех рассмотренных систем значения h_m соответствуют нагреву инертных смесей до температур T^* , близких к температуре плавления алюминия $T_{пл} = 933,6$ К, а действительная температура воспламенения смеси волной стационарного горения T_m , в соответствии с уравнением (3), будет выше значений T^* на 62—98 К при $E = 95,5$ кДж/моль [10]. В тех случаях, когда вычисленные значения T_m больше $T_{пл}$, разность $T_m - T_{пл}$ позволяет определить долю расплавленного алюминия в смеси в момент воспламенения.

Для газозвесей алюминия наблюдается некоторое уменьшение значений T^* при замене азота гелием и при увеличении содержания кислорода в гелиевой атмосфере. Однако эти различия невелики и лежат в пределах

погрешности оценки T^* , так как погрешность определения параметров h_m и q_m , как минимум, на порядок выше погрешности аппроксимации исходных данных о скорости горения. Гораздо более существенным является другой факт — четырехкратное возрастание q_m при замене в воздушной атмосфере азота гелием. При такой замене ровно во столько же раз возрастает теплопроводность газовой атмосферы. Поэтому механизм горения газозвеси алюминия в азотной и гелиевой атмосферах идентичен, а увеличение скорости горения обусловлено увеличением теплоподвода из зоны высоких температур к поверхности воспламенения в результате более высокой теплопроводности газовой среды.

Для конденсированных систем h_m соответствует нагреву смесей до температуры плавления алюминия с частичным или полным расплавлением содержащегося в смеси алюминия, а для термитной системы $25\% \text{Al} + 75\% \text{Fe}_2\text{O}_3$ в зависимости от диапазона начальных температур наблюдается два режима горения. При $T_n < 573 \text{ K}$ h_m соответствует началу плавления алюминия, а при $T_n > 573 \text{ K}$ температура воспламенения смеси в волне стационарного горения несколько выше: $T_m = 1062 \text{ K}$ при $E = 95,5 \text{ кДж/моль}$.

В соответствии с уравнением (1) температурный коэффициент массовой скорости горения определяется уравнением

$$\beta_m = \left[\frac{\partial \ln(u\varphi)}{\partial T_n} \right]_p = \frac{c_p(T_n)}{h_m - h(T_n)} \approx \frac{1}{T^* - T_n}. \quad (4)$$

Поэтому для всех рассмотренных выше смесей на основе алюминия в первом приближении

$$\beta_m = \frac{1}{933,6 - T_n}, \quad (5)$$

а температурный коэффициент линейной скорости горения определяется из соотношения

$$\beta_n = \beta_m + \alpha_v,$$

где α_v — коэффициент объемного расширения смеси.

Таким образом, в отличие от одиночных частиц алюминия, при горении которых интенсивное тепловыделение, обеспечивающее саморазогрев частицы, происходит после полного разрушения окисной пленки в результате ее плавления, в случае двухкомпонентных смесей на основе алюминия саморазогрев частиц происходит при первом же нарушении целостности окисной пленки при температуре плавления алюминия. Поэтому температура плавления алюминия является характерной температурой зажигания смесей на основе алюминия в волне стационарного горения. Эта характерная температура малочувствительна не только к изменению основных факторов, влияющих на скорость горения — начальной температуры смеси, размера частиц алюминия, состава газовой атмосферы в газозвесах и содержания компонентов в конденсированных системах, — но и к изменению вида химической реакции, обеспечивающей тепловыделение — окисление алюминия газообразным кислородом в газозвесах, протекание обменной реакции в термитной системе или протекание реакции образования интерметаллидов в СВС-системах. Наблюдающаяся при воспламенении смесей алюминиевого порошка с оксидами металлов некоторая зависимость T_v от свойств оксида [17], по-видимому, обусловлена низкоскоростным режимом нагрева при проведении экспериментов.

Авторы выражают глубокую признательность проф. А.Н. Золотко, любезно представившего таблицу сглаженных экспериментальных данных по скорости горения газозвесей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кашпоров Л.Я., Шелудяк Ю.Е., Мальцев В.М. и др. Влияние начального теплового состояния на скорость горения конденсированных систем // Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение конденсированных систем. Материалы IX Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. — Черногловка. — 1989. — С. 18—21.
2. Кашпоров Л.Я., Рабинович В.А., Шелудяк Ю.Е. Теплофизические аспекты процесса горения // Теплофизические свойства веществ и материалов. М.: Издательство стандартов. — 1991. — Вып. 30. — С. 139—147.
3. Силин Н.А., Кашпоров Л.Я., Шелудяк Ю.Е. и др. Функциональная зависимость скорости горения смесей $Mg + NaNO_3$ от многих переменных // ФГВ. — 1992. — Т. 28. — № 5. — С. 27—34.
4. Кашпоров Л.Я., Канахин С.П., Шелудяк Ю.Е., Ухов В.В. О механизме горения нитрогликоля // ФГВ. — 1993. — Т. 29. — № 2. — С. 32—36.
5. Кашпоров Л.Я., Рабинович В.А., Шелудяк Ю.Е. Энтальпийный подход к изучению процесса горения. I. Уравнение закона сохранения энергии для химически реагирующих систем и его следствия для процесса горения // ИФЖ. — 1994. — Т. 66. — № 3.
6. Кашпоров Л.Я., Рабинович В.А., Шелудяк Ю.Е. Энтальпийный подход к изучению процесса горения. II. Результаты теплового анализа некоторых горючих систем // ИФЖ. — 1994. — Т. 66. — № 3. — С.
7. Шелудяк Ю.Е., Кашпоров Л.Я., Малинин Л.А., Цалков В.Н. Теплофизические свойства компонентов горючих систем. М.: НПО "Информ ТЭИ", 1992. — 184 с.
8. Friedman R., Mashek A. Ignition and combustion of aluminium particles in hot ambient gases // Combustion and Flame. — 1962. — V. 6. — N 1. — P. 9—19.
9. Фролов Ю.В., Похил П.Ф., Логачев В.С. Воспламенение и горение порошкообразного алюминия в высокотемпературных средах и составе гетерогенных конденсированных систем // ФГВ. — 1972. — Т. 8. — № 2. — С. 213—236.
10. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972. — 294 с.
11. Агеев Н.Д., Вовчук Я.И., Горошин С.В. и др. Стационарное горение твердых горючих. Ламинарный диффузионный двухфазный факел // ФГВ. — 1990. — Т. 26. — № 6. — С. 54—62.
12. Агеев Н.Д., Горошин С.В., Золотко А.Н. и др. Скорость стационарного пламени в газозвезях алюминия // Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение гетерогенных и газовых систем. Материалы IX Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. — Черногловка. — 1989. — С. 83—85.
13. Goroshin S.V., Ageev N.D., Shoshin Yu.L. The premixed aluminium dust laminar flame // The 23 International Symposium on Combustion, France, 1990. Abstracts of Symposium Papers. — P. 137.
14. Лукашенин Г.В., Подгребенков А.Л. О температурном коэффициенте скорости горения некоторых систем // ЖФХ. — 1962. — Т. 36, № 12. — С. 2784—2786.
15. Найбороденко Ю.С., Лавренчук Г.В., Филатов В.М. и др. Механизм образования алюминидов циркония при безгазовом горении // Проблемы технологического горения. Т. 1. Кинетика, термодинамика, механизм и теория горения. Материалы III Всесоюзной конференции по технологическому горению. — Черногловка. — 1981. — С. 67—70.
16. Итин В.И., Братчиков А.Д., Лепинский А.Б. Фазовый переход при горении смесей меди и алюминия // ФГВ. — 1981. — Т. 17. — № 5. — С. 31—34.
17. Черненко Е.В., Афанасьева Л.Ф., Лебедева В.А., Розенбанд В.И. Воспламеняемость смесей окислов металлов с алюминием // ФГВ. — 1988. — Т. 24. — № 6. — С. 3—11.

141300, г. Сергиев Посад,
НИИПХ

Поступила в редакцию 15/V 1992,
после доработки — 29/III 1994

УДК 662.612.22

Л.А. Клячко, Е.С. Шахиджанов

ГОРЕНИЕ СМЕСЕЙ МАГНИЯ С НИТРАТОМ НАТРИЯ II. СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ МАГНИЯ, НИТРАТА НАТРИЯ И ОРГАНИЧЕСКОГО ГОРЮЧЕГО

Предложена предельная схема процесса горения трехкомпонентных смесей магния, нитрата натрия и органического горючего. Получено приближенное уравнение для скорости горения таких смесей. Дано сопоставление экспериментальных и расчетных зависимостей скорости горения от состава смеси и внешнего давления.

В [1] рассмотрен вопрос о скорости горения двухкомпонентных смесей магния с нитратом натрия. При горении трехкомпонентной смеси магния,

© Л.А. Клячко, Е.С. Шахиджанов, 1994.