

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. П. Боуден, А. Д. Иоффе. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. М.: ИЛ, 1955.
2. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев. Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом. М.: Наука, 1968.
3. А. В. Дубовик, В. К. Боболев. Чувствительность жидких взрывчатых систем к удару. М.: Наука, 1978.
4. А. Г. Мержанов, В. В. Барзыкин, В. Т. Гонтковская. Докл. АН СССР, 1963, 148, 380.
5. А. Г. Мержанов. О критических условиях теплового взрыва очага разогрева. Препринт. Черноголовка, 1968.
6. А. П. Амосов. Докл. АН СССР, 1978, 243, 673.
7. А. Г. Мержанов, Б. И. Хайкин, К. Г. Шкадинский. ПМТФ, 1969, 5.
8. К. Г. Шкадинский. ФГВ, 1971, 7, 3, 332.
9. Э. И. Максимов, К. Г. Шкадинский. ФГВ, 1971, 7, 3, 45.
10. Я. Б. Зельдович, Н. И. Симонов. ЖФХ, 1949, 23, 11.
11. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1968.
12. Т. П. Ивлева, К. Г. Шкадинский. Информ. бюл. Госфонда алгоритмов и программ СССР, 1979, 1 (27).
13. К. Г. Шкадинский, Б. И. Хайкин, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1971, 7, 1, 19.
14. Б. В. Новожилов. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. М.: Наука, 1973.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ НИКЕЛЕВО-АЛЮМИНИЕВЫХ ТЕРМИТОВ

А. А. Шидловский, В. В. Горбунов

(Москва)

Горение термитных систем детально изучалось на примере смесей $Al + Fe_2O_3$ [1—5], однако в литературе отсутствуют данные о горении смесей алюминия с оксидами никеля. Интересно сопоставить особенности их горения с горением смесей $Al + Fe_2O_3$, так как Ni_2O_3 и Fe_2O_3 обладают различиями в свойствах, существенных для горения. Так, для Ni_2O_3 энтальпия перехода в NiO составляет всего 1,2 ккал/г — атом металла, в то время как аналогичный переход для Fe_2O_3 требует затраты 33,5 ккал/г — атом. Это обуславливает значительно меньшую термическую стабильность Ni_2O_3 , который начинает разлагаться с образованием NiO уже при 570 К, а полное разложение достигается при 1470 К [6]. Известно также, что образование интерметаллида $AlNi$ из элементов весьма экзотермично: $\Delta H_{298}^0 = -28,1$ ккал/моль [7]. При использовании мелкодисперсного алюминия смесь его с никелем горит со скоростью 12—14 см/с [8—10]. Имеются указания, что добавка никеля к смеси $Al + Fe_2O_3$ увеличивает скорость горения и улучшает ее воспламеняемость [11].

Уравнения реакций горения смесей	g, %	Q, ккал/г	u_m , г/(см ² ·с), при p,	
			МПа	
			0,1	10
$2Al + Ni_2O_3 = Al_2O_3 + 2Ni$	25,0	1,29	23	49
$4Al + Ni_2O_3 = Al_2O_3 + 2AlNi$	39,5	1,24	23	44
$2Al + 3NiO = Al_2O_3 + 3Ni$	19,4	0,81	7,8	42
$3Al + 3NiO = Al_2O_3 + AlNi + 2Ni$	26,5	0,83	11	45
$5Al + 3NiO = Al_2O_3 + 3AlNi$	38,0	0,86	15	55
$2Al + Fe_2O_3 = Al_2O_3 + 2Fe$	25,0	0,95	10	18

Примечание. При расчетах все продукты горения смесей принимались твердыми. Значения ΔH_{298}^0 исходных компонентов и продуктов взяты из [7].

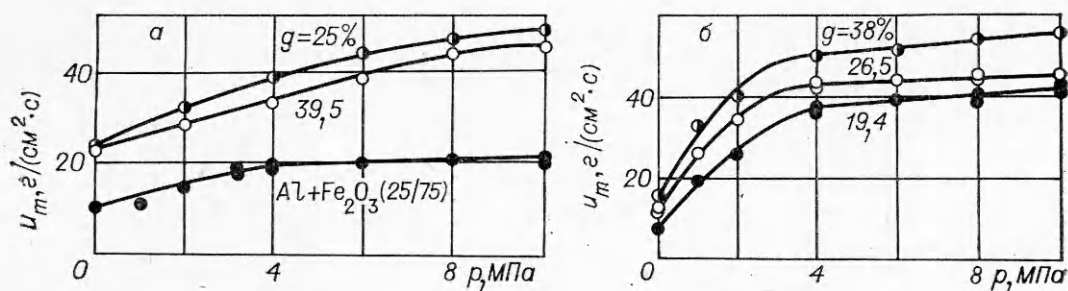


Рис. 1. Влияние давления на скорость горения смесей Al + Ni₂O₃ (а) и Al + NiO (б) при различном содержании алюминия.

В настоящей работе изучалось горение двойных смесей алюминия с оксидами никеля. Для сравнения проводились опыты с Al + Fe₂O₃. Использовались оксиды никеля и железа марки ч. с размером частиц менее 63 мкм и алюминий марки АСД-4. Навески смесей (0,7—0,8 г) помещались в трубку из органического стекла (внутренний диаметр 7 мм) и прессовались до относительной плотности 0,6—0,7. Опыты проводились в бомбе постоянного давления в атмосфере азота; для воспламенения использовалась смесь Mg + BaO₂ в количестве ~ 0,1 г. Скорость горения измерялась фоторегистратором. Изучалось влияние давления до 10 МПа и соотношения компонентов на скорость горения смесей. Предварительно проведены расчеты теплот горения Q стехиометрических смесей Al с Ni₂O₃, NiO и Fe₂O₃ и смесей с повышенным содержанием Al, избыток которого может расходоваться на образование AlNi (см. таблицу). В таблице помещены экспериментальные данные по скорости горения смесей при одинаковом массовом содержании Al ($g = 25\%$) смесь с Ni₂O₃ горит в 2,5 раза быстрее, чем смесь с Fe₂O₃. Характер кривых $u_m = f(p)$ близок, но скорость горения смеси с Ni₂O₃ увеличивается быстрее, чем смеси с Fe₂O₃ (значения ν в формуле $u_m = bp^\nu$ равны соответственно 0,28 и 0,16). Увеличение содержания Al до $g = 39,5\%$ в составе с Ni₂O₃ (в расчете на образование AlNi) приводит к небольшому снижению скорости, не влияя, однако, на характер ее зависимости от давления.

Скорость горения смесей Al + NiO с $g = 19, 26$ и 38% (рис. 1, б) в интервале 0,1—3 МПа сильно увеличивается, но при дальнейшем повышении давления до 10 МПа рост скорости замедляется: для области 3—10 МПа $\nu = 0,07 \div 0,10$. Из двух стехиометрических смесей Al с Ni₂O₃ и NiO последняя горит несколько медленнее.

Влияние содержания алюминия на скорость горения изучалось при давлении 4 МПа (рис. 2). Максимальная скорость горения состава Al + Ni₂O₃ соответствует содержанию Al 20—30%, т. е. вблизи стехиометрического. При $g = 15\%$ u_m значительно уменьшается, а смесь с 10% Al вообще не воспламенялась. Максимальная скорость горения составов Al + NiO и Al + Fe₂O₃, напротив, наблюдается при значительном содержании Al (около 40%). При уменьшении значения g до 15% в смеси Al + NiO (стехиометрия — $g = 19,4\%$) горение не распространяется. Состав Al + Fe₂O₃ горит при $g = 15\%$ и не воспламеняется при $g = 10\%$.

Итак, найдено, что никелевые термиты горят как при атмосферном давлении, так и при $p = 10$ МПа значительно (в 2,5 раза) быстрее железо-алюминиевого термита. В случае стехиометрической смеси Al с Ni₂O₃ это обусловлено легкостью отщепления кислорода (по сравнению с Fe₂O₃) и высокой

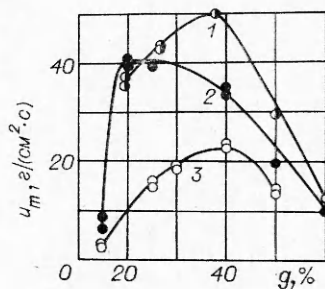


Рис. 2. Влияние содержания алюминия на скорость горения смесей с NiO (1), Ni₂O₃ (2) и Fe₂O₃ (3).

теплотой горения смеси. Не исключено и каталитическое влияние оксидов никеля, а также и продукта горения — металлического никеля — на скорость горения алюминия.

Поступила в редакцию 1/VII 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Беляев, Л. Д. Комкова. ЖФХ, 1950, 24, 11, 1302.
2. П. Ф. Похил, Л. Д. Ромоданова. ФГВ, 1969, 5, 2.
3. Н. Н. Бахман, В. С. Никифоров. ЖФХ, 1964, 38, 1.
4. Г. В. Лукашени, А. Д. Погребенков. ЖФХ, 1962, 36, 12.
5. Э. И. Максимов, А. Г. Мержанов, В. М. Шкиро. ФГВ, 1965, 1, 1.
6. И. С. Куликов. Термическая диссоциация соединений. М.: Metallurgy, 1969.
7. D. D. Wagman, W. H. Evans et al. Technical Note, No 270—4. Washington, 1969.
8. Ю. С. Найбороденко, В. И. Итин и др. Известия вузов, Физика, 1973, 16, 6.
9. Ю. С. Найбороденко, В. И. Итин. — В сб.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1977.
10. A. P. Hardt, R. W. Holsinger. Comb. Flame, 1973, 21, 1.
11. A. P. Hardt. — In: Encyclopedia of Explosives and Related Items. V. 9, 1980.

К ВОПРОСУ О ПОВЕРХНОСТНОМ ГОРЕНИИ, АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ, НАГРЕВАЕМЫХ ВНУТРЕННИМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛА

Ю. И. Яламов, Е. Р. Щукин, Л. Г. Эйдинов, З. Л. Шулиманова
(Москва)

Поверхностное горение аэрозольных частиц осуществляется в тех случаях, когда окисление молекул вещества горючего происходит главным образом на поверхности частицы (например, в случае горения углеродных частиц) [1].

В опубликованных до настоящего времени работах достаточно подробно изучено свободное (не осложненное внутренними источниками тепла) горение аэрозольных частиц [1—3]. Авторами [1] впервые теоретически рассмотрено поверхностное горение углеродных частиц в поле электромагнитного излучения. Построенная в [1] теория имеет ограниченную степень применения, так как при описании гетерогенного горения частиц использован степенной вид зависимости коэффициентов теплопроводности κ и D от температуры газовой смеси ($\kappa = \kappa_0(T/T_0)^{1/2}$, $D = D_0(T/T_0)^{3/2}$). Степенные функции на больших температурных интервалах описывают зависимости κ и D от температуры с большой погрешностью. Так, величина κ воздуха, вычисленная по формуле $\kappa = \kappa_0(T/T_0)^{1/2}$ при $T = 3000$ К ($T_0 = 300$ К), в 6 раз меньше реальной величины κ .

Развитая в настоящей работе теория позволяет описывать процесс гетерогенного горения твердых аэрозольных частиц сферической формы (например, углеродных частиц [1]), осложненный внутренними источниками тепла, при произвольных зависимостях коэффициентов теплопроводности и диффузии от температуры.

Горение частиц рассмотрено в трехкомпонентной газовой смеси, состоящей из молекул окислителя, какого-либо окисла вещества горючего и молекул несущего инертного газа. При этом рассматривается следующая схема реакции окисления молекул вещества частицы A_4 молекулами окислителя A_1 : $\nu_4 A_4 + \nu_1 A_1 = \nu_2 A_2$. Символы A_1 , A_4 , служат для обозначения атомов и молекул, вступающих в реакцию веществ окислителя A_1 и частицы A_4 , A_2 — для обозначения молекул окисла, образующегося в процессе реакции; ν_1 , ν_2 и ν_4 — стехиометрические коэффициенты реакции. Так, в случае анализируемой в [1] реакции $2C + O_2 = 2CO$ символ A_4 — углерод C , A_1 — кислород O_2 , A_2 — CO , а $\nu_4 = 2$, $\nu_1 = 1$, $\nu_2 = 2$.