

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ГАЗОВЗВЕСИ ЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ

*А. Н. Золотко, А. М. Мацко, Д. Н. Полищук,
С. Н. Буйновский, Л. А. Гапоненко*

(Одесса)

Вопросам интенсификации процессов воспламенения трудно воспламеняемых металлов, таких как В, Al, уделяется в настоящее время достаточно много внимания. Применяемые методы интенсификации [1—5] заключаются в использовании различных покрытий, амальгамирования, легирования с целью оказать физическое или химическое воздействие на металл или окисную пленку, затрудняющую диффузию окислителя к поверхности металла. Эти методы достаточно перспективны, однако сложны в технологическом плане и в интерпретации получаемых результатов. Отсюда же возникают затруднения в прогнозировании воздействия того или иного активирующего элемента либо соединения.

Использование металлических порошков в виде газозвеси подкачивает применение иного пути интенсификации воспламенения трудно воспламеняемых металлов — теплового воздействия на газовую среду, в которой находится взвесь. Этого можно добиться путем использования механической смеси порошков трудно воспламеняемого и легко воспламеняемого металла. Очевидно, что активный металл, обладающий низкой температурой воспламенения и малыми временами задержки воспламенения, в процессе выгорания будет служить дополнительным тепловым источником и, следовательно, причиной интенсификации процесса воспламенения менее активного компонента смеси.

Рассмотрим эффективность предлагаемого метода на примере воспламенения механической смеси порошков магния и бора. Выбор этих порошков целесообразен по следующим причинам: известно, что аэрозвесь частиц кристаллического бора обладает довольно высокой температурой воспламенения — 1400—1700 К [6] (в зависимости от параметров взвеси) и существенными временами задержки воспламенения [7]. В отличие от бора аэрозвесь частиц магния воспламеняется значительно легче: температуры их воспламенения лежат в диапазоне 800—950 К [8—12]. Учитывая сильную зависимость времени задержки воспламенения от температуры газа и высокую скорость горения магния, можно полагать, что в широком диапазоне температур среды (превышающих температуры воспламенения взвеси частиц магния) порошок магния полностью прореагирует еще до воспламенения взвеси частиц бора и послужит тепловым интенсификатором процесса воспламенения последней.

В настоящей работе представлены результаты теоретического и экспериментального исследований воспламенения такой двухкомпонентной газозвеси.

Пусть в момент времени $t=0$ двухкомпонентная газозвесь, образованная частицами магния радиуса r_1 и частицами бора радиуса r_2 , попадает в равномерно прогретый реакционный объем. Введем следующие упрощающие предположения: 1) градиент температуры по радиусу частиц отсутствует; 2) выгоранием металлов за предвоспламенительный период пренебрегаем [13]; 3) тепло, выделяющееся в результате реакции $2\text{Mg} + \text{O}_2 = 2\text{MgO}$ будем учитывать как объемные тепловые источники, действующие в течение времени горения магния. Тогда с учетом сделанных предположений запишем уравнения теплового баланса для отдельных частиц магния, бора, для газа, а также массового баланса для пленки окиси бора и частицы магния

$$1/3 \cdot c_1 \rho_1 r_1 \cdot dT_1/dt = q_1 k_1 c_{\text{ок}} \rho_{1\text{ок}} \exp(-E_1/RT_1) - \alpha_1(T_1 - T_r), \quad (1)$$

$$1/3 \cdot c_2 \rho_2 r_2 \cdot dT_2/dt = qW_{\text{об}} - lW_{\text{исп}} - \alpha_2(T_2 - T_r), \quad (2)$$

$$\rho_r c_r \frac{dT_r}{dt} = \alpha_1 N_1 S_1 (T_1 - T_r) [\chi(t) - \chi(t - \tau_i)] + \alpha_2 N_2 S_2 (T_2 - T_r) - \\ - \alpha_0 S_0 (T_r - T_0) + \frac{4}{3} \pi r_1^3 \rho_1 N_1 q_1 \left| \frac{dr_1}{dt} \right| [\chi(t - \tau_i) - \chi(t - \tau_{гор} + \tau_i)], \quad (3)$$

$$\rho_1 \cdot dr_1/dt = -L_1 \beta_1 c_{ок}, \quad (4)$$

$$\rho_{2ок} \cdot dh_2/dt = W_{обп} - W_{исп}, \quad (5)$$

начальные условия:

$$t = 0, h_2 = h_{2н}, T_1 = T_2 = T_н, T_r = T_0;$$

$$t = \tau_i, r_1 = r_{1н}.$$

Здесь индекс 1 соответствует частице магния, 2 — частице бора, г — газовой среде, индекс 0 — поверхности реакционного сосуда; q, l — тепловой эффект реакций окисления бора и теплота испарения борного ангидрида соответственно; c_r, c_1, c_2 — теплоемкости газа, магния и бора; $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ — коэффициенты теплоотдачи газ — стенка, частица магния — газ, частица бора — газ; S_0, S_1, S_2 — площадь поверхности реакционного сосуда, частицы магния и бора; $\chi(t)$ — функция Хэвисайда; $c_{ок}$ — концентрация окислителя в среде; E_1, l_1 — энергия активации и экспоненциальный множитель; q_1 — тепло, выделяющееся при сгорании одного грамма магния; L_1 — массовый стехиометрический коэффициент; β_1 — коэффициент массообмена; $W_{обп} = \frac{2,26 \cdot 10^{-5} T_2 p_{O_2} \exp(-22600/T_2)}{4\pi h_2}$, $W_{исп} =$

$$= \frac{2,81 \cdot 10^{10} \gamma_{ок} \exp(-44000/T_2)}{4\pi T_2^{0,5} \left(1 + \frac{4,5 \cdot 10^7 \gamma_{ок} P r_2}{T_2 Nu} \right)}$$

— скорости образования и испарения жидкой окисл бора [14]; p_{O_2} — парциальное давление кислорода, установившееся в объеме после сгорания магния; $\rho_{2ок}$ — плотность окиси бора; h_2 — толщина пленки окиси бора; P — общее давление; $\gamma_{ок}$ — коэффициент испарения жидкой окиси бора; $\tau_i, \tau_{гор}$ — время индукции взвеси частиц магния и время горения частицы магния.

Численное интегрирование системы (1) — (5) позволило определить критические температуры и времена задержки воспламенения взвеси частиц бора при различных соотношениях магния и бора во взвеси, размерах и начальных температурах частиц, а также при различных параметрах окислительной среды. В качестве примера, иллюстрирующего протекание процесса воспламенения двухкомпонентной газозвеси, на рис. 1 представлены зависимости температур частицы магния, частицы бора, газа и толщины окисной пленки на частице бора от времени.

Видно, что в начальный момент времени происходит быстрое выравнивание температур частиц обоих металлов и газа. Момент воспламенения магния определяется резким повышением температуры газа, вследствие чего значительно увеличивается скорость прогрева частиц бора, что и является причиной интенсификации процесса воспламенения газозвеси частиц бора.

Результаты расчета критических условий воспламенения двухкомпонентной газозвеси сопоставлялись с экспериментальными данными, полученными по методике и на установке, описанной в работе [6]. Опыты проводились в диапазоне температур среды $T_r = 1150-1575$ К. Среднеквадратичный радиус частиц магния и бора составлял 3,2 и 3,6 мкм соответственно. Для каждой фиксированной температуры среды определялась предельная массовая концентрация частиц двухкомпонентной газозвеси, при которой еще наблюдалось воспламенение. Исследуемые порошки получены механическим смешиванием исходных порошков магния и бора с содержанием магния 5, 10 и 15% по массе. Процентное содер-

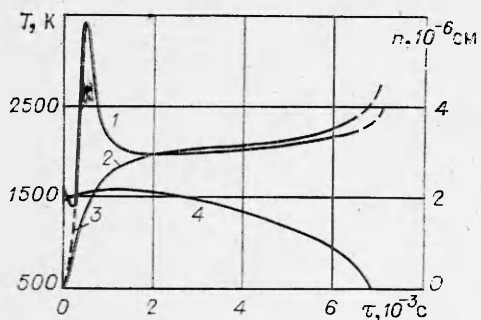


Рис. 1. Зависимости температур частиц бора (1), газа (2), магния (3) и толщины окисной пленки на частице бора (4) от времени; $T_{1н} = T_{2н} = 500$ К, $T_{гн} = 1700$ К, $r_{1н} = r_{2н} = 5$ мкм, $C = 230$ мг/л, $h_{2н} = 2 \cdot 10^{-6}$ см [14], 13% Mg, 87% В.

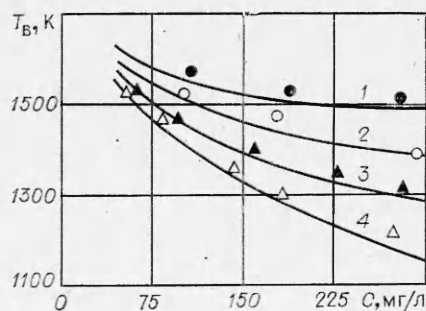


Рис. 2. Зависимость критической температуры воспламенения двухкомпонентной газозвеси частиц металлов от суммарной массовой концентрации. 1 — 100% бора; 2 — 95% бора, 5% магния; 3 — 90% бора, 10% магния; 4 — 85% бора, 15% магния.

жание магния выбиралось с таким расчетом, чтобы после его выгорания оставшегося кислорода было достаточно для дальнейшего протекания процесса воспламенения газозвеси частиц бора.

На рис. 2 кривыми показаны зависимости температуры воспламенения T_0 двухкомпонентной газозвеси от суммарной массовой концентрации частиц магния и бора, рассчитанные по уравнениям¹ (4)–(5). Точками нанесены экспериментальные результаты. Получено хорошее качественное и количественное согласие расчетных зависимостей с экспериментальными результатами. По мере увеличения процентного содержания магния во взвеси критическая температура воспламенения падает. Снижение критической температуры воспламенения двухкомпонентной газозвеси (см. кривые 2–4) по сравнению с однокомпонентной взвесью частиц бора (см. кривую 1) существенное.

На следующем этапе работы определялись периоды задержки воспламенения двухкомпонентной взвеси. Экспериментально их значения определялись при помощи скоростной киносъемки, которая позволила также обнаружить две отдельные вспышки, соответствующие воспламенению магния, а затем бора. Температура стенок реакционного сосуда во время опытов поддерживалась постоянной и была равна 1565 К.

Расчетные зависимости времени задержки воспламенения от массовой концентрации, полученные численным интегрированием системы (1)–(5) для условий эксперимента, представлены на рис. 3 (кривыми). Причины отклонения расчетных зависимостей от опытных данных для газозвеси частиц бора (кривая 1) обсуждались в работе [7]. Напомним лишь, что основная причина расхождения результатов заключается в трудности определения коэффициента теплообмена газ — стенка. Для случая воспламенения двухкомпонентной газозвеси частиц металлов (кривые 2–4) наблюдается хорошее качественное и количественное согласование с экспериментальными результатами. Это связано с тем, что сокращение времени индукции способствует реализации в реакционном объеме условий, близких к адиабатическим, отсюда — уменьшение погрешности в выборе коэффициента теплообмена газ — стенка. Некоторое превышение экспериментальных результатов над расчетными для состава 15% магния + 85% бора объясняется относительно большой погрешностью определения массовой концентрации, поскольку время формиро-

¹ При расчете в качестве входных использовались следующие параметры среды и взвеси: $h_{2н} = 2 \cdot 10^{-6}$ см, $T_{1н} = T_{2н} = 500$ К, $T_{гн} = T_0$. Температура среды варьировалась от 1100 до 1600 К.

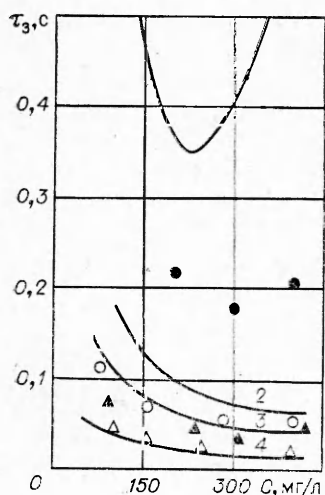


Рис. 3. Зависимость времени задержки воспламенения двухкомпонентной газовой взвеси частиц металлов от суммарной массовой концентрации (обозначения аналогичны рис. 2).

вания облака взвеси частиц соизмеримо со временами задержки воспламенения данного состава.

Таким образом, в данной работе установлена возможность инициирования воспламенения газовой взвеси частиц бора путем добавления небольшого количества магния, выявлен механизм этого процесса и дано его математическое описание. Результаты работы, а также метод инициирования воспламенения взвеси частиц трудновоспламеняемого металла могут быть применены и для смесей других горючих, обладающих разными температурами воспламенения.

Кроме того, полученные данные могут быть полезны для решения вопросов, связанных с обеспечением пожаро- и взрывобезопасности при работе с различными порошкообразными материалами.

Поступила в редакцию
9/1 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. D. K. Kuehl. Amer. Inst. Aeron. and Astron. J., 1965, 3, 12, 2239.
2. D. K. Kuehl. Pyrodynamics., 1965, 1—2, 65.
3. A. M. Mellor, J. Glassman. Combustion Science and Technology, 1970, 1, 6, 437.
4. В. Г. Поярков, Н. В. Мануев, В. В. Тимашов. Порошковая металлургия, 1970, 7, 96.
5. Е. И. Попов, А. Л. Брейтер. Порошковая металлургия, 1973, 5, (125), 101.
6. А. Н. Золотко, Л. А. Клячко и др. ФГВ, 1977, 13, 1.
7. А. Н. Золотко, К. М. Копейка и др. Материалы V Всесоюз. симп. по горению и взрыву. Черногоровка, 1977.
8. H. M. Cassel, J. Liebman. Combustion and Flame, 1962, 6, 3, 153.
9. К. М. Копейка, А. Н. Золотко, Д. И. Полищук.—В сб.: Физика аэродисперсных систем. Вып. 11. Киев, Вища школа, 1974.
10. А. Б. Рыжик, Б. С. Лимонов, В. С. Махин.—В сб.: Физика аэродисперсных систем. Вып. 12. Киев, Вища школа, 1975.
11. К. М. Копейка, А. Н. Золотко, Д. И. Полищук.—В сб.: Физика аэродисперсных систем. Вып. 12, Киев, Вища школа, 1975.
12. К. М. Копейка, А. Н. Золотко, Д. И. Полищук. Материалы Всесоюз. науч. семинара. Таллин, 1974.
13. Э. Н. Руманов, Б. И. Хайкин. ФГВ, 1969, 5, 129.
14. M. K. King. Combustion Science and Technology, 1972, 5, 4, 155.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФфуЗИОННОГО ГОРЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ ТОПЛИВ В ТУРБУЛЕНТНОМ СПУТНОМ И ВСТРЕЧНОМ ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

Ю. М. Аннушкин, Г. Ф. Маслов

(Москва)

Теоретическая схема диффузионного горения топлива, т. е. горения горючего в струе по мере ее смешения при эжекции внешнего окислителя, впервые сформулированная Я. Б. Зельдовичем [1], в практике ис-