

КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ КОНГЛОМЕРАТОВ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ

Д. И. Полищук, В. Г. Шевчук, В. Л. Великанова,
С. В. Горошин, И. Н. Нечитайло

(Одесса)

Воспламенение плотных совокупностей частиц металлов (конгломератов) в горячей окислительной среде протекает при более низкой температуре по сравнению с одиночными частицами, поскольку химическая реакция идет не только на внешней поверхности, но и в порах конгломерата [1—4]. В работе приведены экспериментальные данные и анализ особенностей воспламенения конгломератов частиц алюминия, обладающих, как известно, свойством покрываться в процессе реагирования плотной защитной пленкой.

Если диффузионное сопротивление пленки окиси превосходит диффузионное сопротивление пор конгломерата (приближение равнодоступной реакционной поверхности), то критическое условие воспламенения сферического конгломерата радиуса R_0 , составленного из частиц металла радиуса r_0 , при параболическом законе окисления имеет вид [5]

$$\left(\frac{3QE\rho}{\rho_m R_T T_0^2}\right)^2 \frac{2\rho_k}{3 \text{Nu} \lambda c_k} \left(\frac{R_0}{r_0}\right)^2 K_0 C^m \exp(-E/R_T T_0) = 2,33. \quad (1)$$

В выражении (1) не учтены теплотери на излучение, выгорание частиц, отсутствует градиент температуры по радиусу конгломерата. Здесь T_0 — температура воспламенения конгломерата (наименьшая температура среды, обеспечивающая срыв теплового равновесия); Q — тепловой эффект реакции окисления в расчете на 1 г окиси алюминия; ρ_k , c_k — плотность и удельная теплоемкость конгломерата; ρ , ρ_m — плотность окиси и алюминия соответственно; λ — теплопроводность газа; R_T — универсальная газовая постоянная; K_0 и E — предэкспонент и энергия активации в законе окисления металлической частицы, записанном в виде

$$dh/d\tau = K_0 C^m e^{-E/RT}/h, \quad (2)$$

где τ — время; h — толщина окисной пленки; m — порядок реакции в законе окисления; C — концентрация окислителя.

Опытные данные [6, 7] свидетельствуют о том, что в широком диапазоне температур алюминий окисляется по параболическому закону. В экспериментах [8], проведенных при температуре 1000 ÷ 1600 К, получено следующее выражение для константы скорости окисления Al:

$$K = 2,5 \cdot 10^8 (p/p_0)^{0,45} \exp(-10^5/RT) \text{г}^2/(\text{см}^4 \cdot \text{с}), \quad (3)$$

где p — парциальное давление кислорода; p_0 — полное давление среды. Этот диапазон соответствует диапазону температур воспламенения конгломератов частиц алюминия в настоящих опытах.

Используя (3), можно записать закон окисления частицы алюминия

$$dh/d\tau = [0,775 \cdot 10^8 (p/p_0)^{0,45} \cdot \exp(-10^5/R_T T)] : h \text{ см/с}, \quad (4)$$

т. е. $E = 10^5$ кал/моль, $K_0 C^m = 0,775 \cdot 10^8 (p/p_0)^{0,45}$ см²/с. Значения остальных величин, входящих в (1), полагались: $Q = 4000$ кал/г, $\rho_m =$

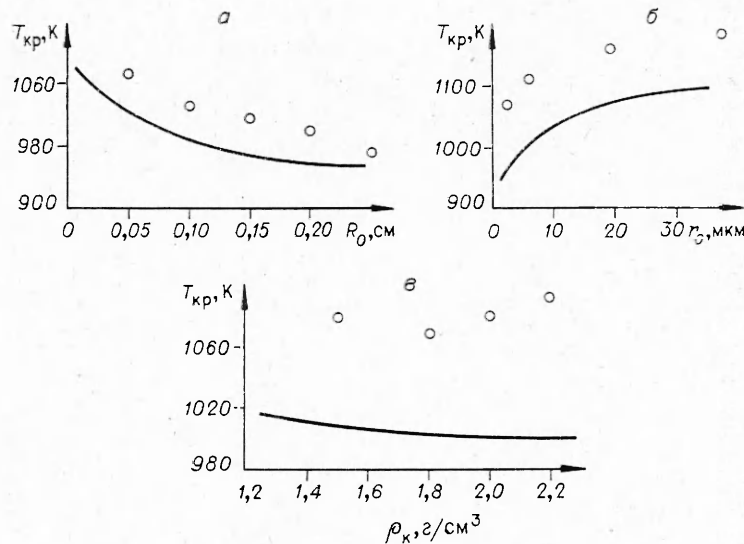


Рис. 1. Зависимость температуры воспламенения от размера конгломерата (а), радиуса частиц фракции (б) и от плотности конгломерата (в); $p_{O_2} = 0,21$ атм.

а) $\rho_k = 1,8$ г/см³, $r_0 = 6$ мкм; б) $\rho_k = 2$ г/см³, $R_0 = 0,1$ см; в) $R_0 = 0,2$ см, $r_0 = 9$ мкм.

$= 2,7$ г/см³, $\rho = 3,97$ г/см³, $c_k = 0,28$ кал/(г·град), $\lambda = 2,1 \cdot 10^{-4}$ кал/(см·с·град), $p/p_0 = 0,21$.

Расчет критических температур воспламенения в зависимости от параметров конгломерата (r_0 , R_0 , ρ_k), выполненный по формуле (1), представлен на рис. 1 (сплошные линии). Там же приведены экспериментальные данные.

Эксперименты проводились методом подвешенной капли. Сферический конгломерат, полученный высушиванием в инертной среде водно-глицериновой суспензии частиц Al, вводился на вольфрамовом подвесе диаметром 50 мкм в нагретый воздушный поток, движущийся по реакционной трубе электронагревательной печи. Момент воспламенения фиксировался фотоэлектронной схемой. Температура среды определялась платино-платинородиевой термопарой с погрешностью, не превышающей $\pm 5^\circ$. Использовался алюминий чистотой 99,8%. Опыты проводились при постоянном числе Рейнольдса, равном 8 ($Nu = 2,32$). Качественный ход полученных зависимостей такой же, как и для конгломератов частиц бора, и объясняется в работе [9].

Приведенный выше расчет сделан для монодисперсных частиц алюминия. В экспериментах использовались порошки алюминия различной дисперсности и достаточно узкого фракционного состава ($\sigma \leq 0,4$, где σ — дисперсия логарифмически нормального распределения, r_0 — среднеквадратичный радиус частиц данной дисперсности).

Поскольку в реальных условиях используются полидисперсные порошки металла, оценим влияние полидисперсности на критические условия воспламенения конгломератов. Будем аппроксимировать распределение частиц по размерам логарифмически нормальным законом

$$f(r) dr = 1/\sqrt{2\pi}\sigma \cdot \exp[-(\ln r - \overline{\ln r})^2/2\sigma^2] d \ln r, \quad (5)$$

где $\sigma = \sqrt{(\ln r - \overline{\ln r})^2}$ — дисперсия распределения.

Логарифмически нормальный закон распределения оказывается на более удобным и точным, поскольку он справедлив для аэрозолей

конденсационного происхождения [10]. В частности, как показано в [11], на основе простых гипотез о характере процесса дробления твердых частиц распределение их по размерам стремится асимптотически (по мере измельчения) к логарифмически нормальному.

Перепишем (1) в более удобной форме

$$\left(\frac{3QE\rho}{R_r T_0^2}\right)^2 \cdot \left(\frac{S_p}{S_{\Pi}}\right)^2 \cdot \frac{2K_0 C^{n_0} e^{-E/R_r T_0}}{3\lambda \rho_K c_K \text{Nu}} = 2,33. \quad (6)$$

Здесь $S_{\Pi} = 4\pi R_0^2$ — внешняя поверхность конгломерата; S_p — полная реакционная поверхность конгломерата (для монофракционного конгломерата $S_p = 4\pi \frac{\rho_K R_0^3}{\rho_M r_0}$). Для учета полидисперсности порошка металла необходимо переписать выражение S_p/S_{Π} с учетом функции распределения частиц по размерам. Полная реакционная поверхность конгломерата

$$S_p = 4\pi N \int_0^{\infty} r^2 f(r) dr.$$

Полное число частиц в объеме конгломерата

$$N = \frac{R_0^3 \rho_K}{\rho_M \int_0^{\infty} r^3 f(r) dr},$$

тогда

$$\frac{S_p}{S_{\Pi}} = \frac{R_0 \rho_K \int_0^{\infty} r^2 f(r) dr}{\rho_M \int_0^{\infty} r^3 f(r) dr}. \quad (7)$$

Подставив в (7) выражение (5), получим после интегрирования

$$\frac{S_p}{S_{\Pi}} = \frac{R_0 \rho_K}{\rho_M} e^{-\frac{5}{2}\sigma^2} e^{-\overline{\ln r}}. \quad (8)$$

В пределе при $\sigma \rightarrow 0 e^{-\overline{\ln r}} \rightarrow \frac{1}{r}$, а $S_p/S_{\Pi} = R_0 \rho_K / r \rho_M$. Подставляя (8) в (6), получим критическое условие воспламенения

$$\left(\frac{3QE\rho}{\rho_M R_r T_0^2}\right)^2 \frac{2\rho_K R_0^2 K_0 C^{n_0} e^{-E/R_r T_0}}{3 \text{Nu} \lambda c_K e^{2\overline{\ln r}} e^{5\sigma^2}} = 2,33, \quad (9)$$

которое совпадает с условием (1) для монофракций при $\sigma \rightarrow 0$.

Из формулы (9) видно, что увеличение дисперсии σ (при постоянном $\overline{\ln r}$) приводит к росту температуры воспламенения вследствие уменьшения реакционной поверхности, обусловленного уменьшением доли мелких частиц в распределении по размерам. Зависимость температуры воспламенения от σ представлена на рис. 2 (кривая). Точки на рисунке — эксперимент. Сопоставление рас-

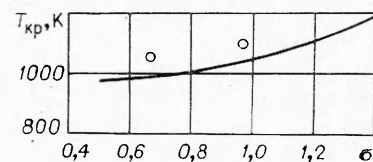


Рис. 2. Зависимость температуры воспламенения от дисперсии распределения частиц; $\rho_{O_2} = 0,21$ атм, $\rho_K = 2$ г/см³, $R_0 = 0,2$ см, $\overline{\ln r} = -1,4$.

четных и экспериментальных данных достаточно убедительно свидетельствует в пользу принятой для описания воспламенения конгломератов частиц модели равнодоступной реакционной поверхности.

Поступила в редакцию
29/IX 1976,
после доработки — 17/XI 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Г. Шевчук, А. Н. Золотко, Т. А. Яковлева.— В сб.: Физика аэродисперсных систем. Киев, «Вища школа», 1974, вып. 10.
2. М. А. Гуревич, Е. С. Озеров, С. А. Чивилихин. ФГВ, 1974, 8, 4.
3. Д. И. Полищук, А. Н. Золотко и др.— В сб.: Физика аэродисперсных систем. Вып. 12. Киев — Одесса, «Вища школа», 1975.
4. Д. И. Полищук, В. Л. Великанова и др.— В сб.: Физика аэродисперсных систем. Вып. 14. Киев — Одесса, «Вища школа», 1976.
5. Б. И. Хайкин, В. Н. Блошенко, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1970, 5, 4.
6. О. Кубашевский, Б. Голкинс. Окисление металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1965.
7. Ж. Бенар. Окисление металлов. М., «Металлургия», 1969.
8. Б. С. Митин, В. В. Самотейкин. ЖФХ, 1970, 2.
9. В. Г. Шевчук, А. И. Золотко, Д. И. Полищук. ФГВ, 1975, 11, 2.
10. Н. А. Фукс. Механика аэрозолей. М., Изд-во АН СССР, 1955.
11. А. Колмогоров. Докл. АН СССР, 1941, 30, 299.

КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ГОРЕНИЯ ТОНКИХ СЛОЕВ ПОЛИМЕРОВ

А. Д. Марголин, В. Г. Крупкин

(Москва)

Определение и изучение критических условий самопроизвольного распространения пламени — одно из важнейших направлений теории горения. При изучении горения полимеров исследовались критические концентрации (кислородный индекс) [1, 2], критические давления [3, 4] и скорость обдува [3], предельные размеры горения толстых (по сравнению с характерной шириной прогрева конденсированной фазы при горении) [5] и тонких [6] образцов полимеров.

В настоящей работе изучаются критические размеры горения тонких слоев полимеров в зависимости от толщины образца и концентрации кислорода в составе газовой смеси при давлениях ниже атмосферного. Изучены также условия затухания горения полимеров под действием инерционных перегрузок. Обсуждается взаимосвязь критических явлений при горении полимеров.

Методика эксперимента

Многие авторы при экспериментальном изучении закономерностей горения тонких слоев полимеров в качестве модельного материала выбирают бумагу [4, 7—10]. К настоящему времени накоплен значительный материал по закономерностям стационарного горения этого полимера, поэтому в данной работе также выбран этот объект исследования. Изучалось горение листов потребительской бумаги толщиной 6,5-