

рения воспламенителя проходит через минимальное значение. С уменьшением температуры и увеличением скорости горения поджигаемой системы в исследованном диапазоне параметров энергия зажигания уменьшается.

4. В индукционном режиме зажигание безгазовой системы является результатом теплового воздействия горящего воспламенителя. В режиме «сжигания» зажигание обусловлено в основном воздействием раскаленных шлаков уже сгоревшего воспламенителя.

Отделение ИХФ АН СССР,
Черноголовка

Поступила в редакцию
30/VIII 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Струнина, Т. М. Мартемьянова и др. ФГВ, 1974, 10, 4.
2. В. И. Ермаков, А. Г. Струнина, В. В. Барзыкин. ФГВ, 1976, 12, 2.
3. Вспомогательные системы ракетно-космической техники. М., «Мир», 1970.
4. А. Г. Мержанов, И. П. Боровинская. Докл. АН СССР, 1972, 204, 2.
5. А. Г. Мержанов, А. Э. Аверсон. Comb. Flame, 1971, 16,
6. С. Н. Lang. Comb. Flame, 1962, 6, 4.
7. Б. Льюис, Г. Эльбе. Горение, пламя и взрывы в газах. М., «Мир», 1968.
8. К. Г. Шкадинский. ФГВ, 1970, 6, 4.
9. В. П. Стовбун, Т. И. Кедрова, В. В. Барзыкин. ФГВ, 1972, 8, 3.
10. P. V. Phung, A. P. Hardt. Comb. Flame, 1974, 22, 3.
11. К. Г. Шкадинский, Б. И. Хайкин, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1971, 7, 1.
12. В. С. Владимиров. Уравнение математической физики. М., «Наука», 1967.
13. А. Э. Аверсон, В. В. Барзыкин, А. Г. Мержанов. Докл. АН СССР, 1968, 178, 1.
14. А. Э. Аверсон, В. И. Розенбанд. ФГВ, 1968, 4, 4.

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ПОРОШКООБРАЗНОГО МАГНИЯ

Г. К. Ежовский, Е. С. Озеров

Из металлов, используемых как горючее, магний исследован лучше других, но и для него остаются неизученными некоторые особенности процесса предпламенного окисления. Вследствие этого резко различаются между собой значения энергии активации для скорости окисления, полученные различными авторами расчетной обработкой опытных данных по воспламенению одиночных частиц. В настоящей работе на основе опытных данных по воспламенению частиц и их плотных совокупностей (свободных засыпок) уточняются представления о предпламенном окислении порошкообразного магния.

1. Экспериментальные данные

Пределы воспламенения мелких сферических частиц магния в воздухе были получены в работах [1, 2]. Зависимости температуры газа на пределе воспламенения частиц от их размера $T_{кр}(L)$ в [1, 2] отличаются крутизной. Авторы не объяснили этого различия, не указали, как за время индукции изменялась температура газа и какую конкретную температуру среды они называли предельной. В настоящих опытах, проведенных на трековой установке [3], пределы воспламенения мелких сферических частиц магния в воздухе определялись при двух режимах работы установки: с обогревом защитного кожуха на рабочей трубке

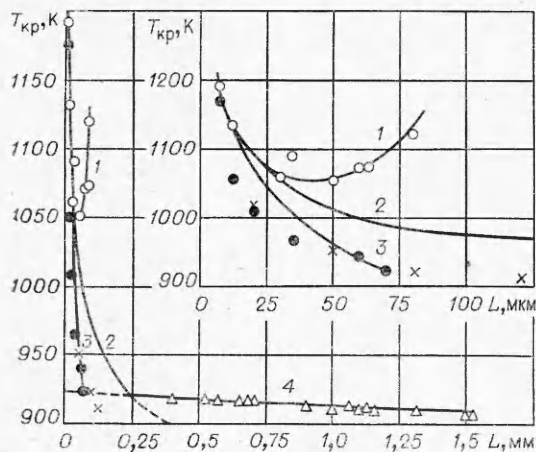


Рис. 1. Зависимость предела воспламенения от размера частиц.

[2]), светлые — средние за время индукции предельные значения температуры газа при $T = \text{const}$. Совпадение данных [2] с найденной зависимостью $T_{кр}(L)$, полученной при $T = \text{var}$, возможно, свидетельствует о том, что названные авторы связывали предел воспламенения в T в «месте» воспламенения при заметном снижении ее вдоль по потоку. В этом случае температура в месте воспламенения может быть заметно ниже той, при которой в действительности нарушилось тепловое равновесие между частицами и газом (см., например, [4]). Различие этих температур тем больше, чем быстрее падает T вдоль по потоку и, следовательно, большую крутизну зависимости $T_{кр}(L)$ в [1] по сравнению с [2] можно объяснить большим продольным градиентом температуры газа в опытах [1].

Опытные данные, полученные при $T = \text{const}$, могут быть завышены из-за ограниченности времени пребывания частиц в потоке и, очевидно, что это завышение может быть тем больше, чем крупнее частицы. Для очень мелких частиц оба вида погрешностей малы и предельные температуры для частиц размером ~ 7 мкм в обеих сериях опытов практически совпали.

Предельные температуры воспламенения крупных сферических частиц, укрепленных на подвеске, получены в проточной печи (установка и метод эксперимента описаны в [5]). Значения этих температур представлены на рис. 1, 4. В условиях опытов значения числа Нуссельта составляли $Nu = 2,4 - 3,0$ (тем больше, чем крупнее частицы), а температура стенок камеры T_s была примерно равна температуре газа ($0 \leq T - T_s \leq 25$ K).

Воспламенение порошка магния в виде свободной засыпки исследовалось в проточной печи с тепловой изоляцией и смотровым окном (по типу печи, описанной в [5]). Навеска порошка магния засыпалась в цилиндрическую чашку диаметром 6 мм и высотой $0,3 - 1,5$ мм в зависимости от толщины слоя порошка, изготовленную из тугоплавкой металлической фольги толщиной 100 мкм. Чашка с порошком крепилась на тонкой керамической державке, закрывалась защитным колпаком, который снимался после ввода державки в поток. Во всех опытах температура стенок была равна температуре газа, интенсивность конвективного теплообмена образцов с потоком газа характеризовалась числом Nu , значения которого в опытах изменялись от 2,6 до 2,9 (зависимость $Nu(Re)$ для продольно-обтекаемой круглой шайбы взята из [6]).

Предельные температуры воспламенения засыпок в воздухе для различных масс навески и различных фракций порошка приведены на

(когда температура газового потока практически не менялась по направлению потока, $T = \text{const}$) и без обогрева кожуха ($T = \text{var}$). В предельных режимах определялось поле температур газа вдоль по потоку, а также температура в «месте» воспламенения последних из горевших частиц (находилась минимальная температура газа, при которой еще горели частицы данной фракции).

Результаты измерений представлены на рис. 1 двумя типами точек: темные характеризуют предельные значения температуры в «месте» воспламенения при $T = \text{var}$ (+ данные

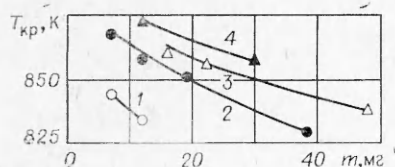


Рис. 2. Предел воспламенения засыпок для различных масс навески и фракций порошка магния.
 $S_{уд}, \text{м}^2/\text{г}$: 1 — 0,314, 2 — 0,108, 3 — 0,071, 4 — 0,054.

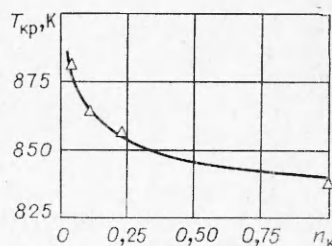


Рис. 3. Зависимость предела воспламенения засыпки от концентрации кислорода в среде.

рис. 2. Зависимость предела воспламенения засыпки от концентрации кислорода иллюстрируется рис. 3 ($S_{уд} = 0,071 \text{ м}^2/\text{г}$, $m = 22,3 \text{ мг}$).

Собственные предельные температуры для сплошных и пористых образцов, испытывавшихся на подвеске, определены с погрешностью, не превышающей $\pm 3 \text{ К}$, а для мелких частиц $\pm 20 \text{ К}$. Максимальные погрешности определения размеров мелких частиц, воспламеняющихся в потоке, составляют $\pm 20\%$, размеров мелких частиц в засыпке $\pm 10\%$, размеров крупных частиц, испытывавшихся на подвеске, $\pm 5\%$. Ошибка при взвешивании навески не превышала $\pm 0,2 \text{ мг}$.

2. Постановка задачи о пределе воспламенения

Известно [7—9], что перед воспламенением магния окисел на его поверхности оказывается пористым и скорость окисления металла не зависит от массы образованного окисла («линейный закон» окисления). Последнее может означать, что пористая пленка окисла практически не мешает окислителю достигнуть открытой поверхности металла и прореагировать с ним. Однако имеются предположения [8, 9], что между пористым слоем окисла и поверхностью металла располагается весьма тонкий плотный подслоя окисла. Если подслоя существует, то он оказывает диффузионное сопротивление переносу окислителя к поверхности металла. Такое предположение не противоречит данным о независимости скорости окисления от массы образованного окисла, если толщина подслоя не меняется во времени. Тогда выражение для скорости потребления окислителя в реакции его с магнием можно записать следующим образом:

$$K_s = K_*(\rho n_k)^v \exp(-E/RT_s).$$

Здесь K_* , E — предэкспонент и энергия активации, R — универсальная газовая постоянная, ρ — плотность газа, n_k — относительная массовая концентрация окислителя в среде, v — порядок реакции.

Одновременно с поверхностной реакцией окисления идет испарение металла, заметное даже в твердом состоянии [10]. Как показано в [11], затраты тепла на испарение металла оказываются соизмеримыми с конвективным теплоотводом. Однако авторы [12] высказали предположение, а в работе [13] доказано расчетом, что вследствие высоких скоростей окисления паров магния расчет пределов воспламенения магния в средах, содержащих кислород, можно проводить без учета затрат тепла на испарение металла. В настоящих опытах за поверхностным воспламенением (быстрым возрастанием яркости свечения) образца обычно следовало появление пламени, но при малых содержаниях окислителя ($n_k \approx 1\%$) были отмечены режимы воспламенения, в которых газофазное пламя не появлялось [5]. Поэтому расчетную обработ-

ку опытных данных проводили как с учетом, так и без учета затрат тепла на испарение горючего. Дополнительные аргументы в пользу того или иного предположения выявлялись при сопоставлении расчетных и опытных зависимостей.

В процессе предпламенного разогрева образцов, материал которых имеет высокие значения коэффициента теплопроводности, пространственная неоднородность поля температур в них невелика, и ею можно пренебречь (критерий $Bi \ll 1$). В этом случае нетрудно показать, что глубина проникновения реакции в пористом образце магния много больше характерного размера испытывавшихся засыпок и конгломератов частиц, поэтому здесь пренебрегаем и неоднородностью поля концентраций окислителя в образце. Для этих режимов можно пренебречь и внешним диффузионным сопротивлением переносу окислителя [14].

Учитывая затраты тепла на испарение металла (без учета реагирования паров), потери тепла излучением и теплоотвод по державке, запишем уравнение теплового баланса образца:

$$m^*c \frac{dT_s}{dt} = qK_* (\rho n_k)^v S_p \exp\left(-\frac{E}{RT_s}\right) - \frac{Nu \lambda}{L} S_T (T_s - T) - \frac{Nu \lambda \gamma p^* S_T}{L P c_p} \exp\left(-\frac{l}{RT_s}\right) - \varepsilon \sigma S_T (T_s^4 - T_r^4) - \left(\frac{Nu^* \lambda^* u^* f^* L^2}{Nu^2 \lambda S_T^2 L^*}\right)^{0.5} (T_s - T). \quad (1)$$

Здесь теплоотвод по державке учтен в предположении, что державка представляет собой полубесконечный тонкий стержень, торец которого имеет температуру образца. Предположено также, что поле температур в стержне безынерционно следует за изменением температуры образца¹. В (1) учтено, что поверхность массообмена S_m (поверхность испарения) может составить лишь часть поверхности теплообмена: $S_m = \gamma S_T$; $\gamma \leq 1$.

При записи уравнения использованы обозначения: m^* , c — масса и удельная теплоемкость образца, λ , c_p — коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость газа, q — тепловой эффект реакции окисления металла на единицу массы реагирующего окислителя, ε — степень черноты образца, $\sigma = 5,7$ Вт/(м²·К⁴), Nu , L — критерий Нуссельта и характерный размер образца, u^* , f^* — периметр и площадь поперечного сечения державки, λ^* — коэффициент теплопроводности державки, Nu^* , L^* — число Нуссельта и характерный размер державки, $S_p = m S_{уд}$ — поверхность реагирования, m , $S_{уд}$ — масса металла в образце и его удельная поверхность, T_s , T — температура образца и газа, l — теплота испарения магния, P , p^* — полное давление и предэкспонента.

Если температура газа $T = \text{const}$, то можно уравнение (1) свести к безразмерному виду, используя условие $|T_s - T|/T \ll 1$ при разложении экспонент (по Франк-Каменецкому) и степенной функции вблизи температуры среды ($T_r = T$):

$$d\theta/d\tau = \kappa \exp \theta - (1 + K_r) \theta - K_i \exp(\chi \theta).$$

Здесь

$$\kappa = K_* q (\rho n_k)^v S_p L E / Nu \lambda S_T (1 + K_c) R T^2 \cdot \exp(-E/RT);$$

$$K_r = \frac{4 \varepsilon \sigma L T^3}{Nu \lambda (1 + K_c)}; \quad K_c = \left(\frac{Nu^* \lambda^* u^* f^* L^2}{Nu^2 \lambda S_T^2 L^*} \right)^{0.5};$$

$$K_i = l p^* \gamma E / P c_p R T^2 (1 + K_c) \cdot \exp(-l/RT); \quad \chi = l/E;$$

$$\tau = Nu \lambda S_T (1 + K_c) / m^* c L \cdot t; \quad \theta = E/RT^2 \cdot (T_s - T).$$

¹ Предположение о квазистационарности поля температур в державке приводит к преувеличению начальной скорости нагрева образца, что может исказить расчетные значения времени индукции засыпки, но практически не влияет на расчетные значения пределов воспламенения для магния.

Связь между параметрами на пределе воспламенения образца находится из условий Семенова:

$$\chi \exp \theta_{кр} - K_i \exp (\chi \theta_{кр}) = (1 + K_r) \theta_{кр}. \quad (2)$$

$$\theta_{кр} = 1 - [(1 - \chi) / (1 + K_r)] K_i \exp (\chi \theta_{кр}). \quad (3)$$

Решая методом последовательных приближений систему трансцендентных уравнений (2) и (3), можем найти пределы воспламенения при известных кинетических константах или найти эти константы по известным из опыта пределам воспламенения. Расчеты показали, что важнейшая характеристика процесса — энергия активации — может быть найдена по приведенным выше опытным данным с доверительным интервалом не менее $\pm 10\%$ (при надежности 0,95). Очевидно, что в расчетной схеме можно провести упрощения, если они приводят к погрешностям в определении энергии активации, заметно меньшим указанного доверительного интервала. Так, например, можно пренебречь затратами тепла на испарение металла, если $K_i < 0,1$. С потерями тепла излучением можно не считаться при $K_r < 0,1$ (если $T_r \leq 0,5T$, то в соответствии с [12] меняется вид критерия $K_R = \frac{\epsilon \sigma E L T_{FF}^2}{R Nu \lambda} < 0,1$).

Теплоотвод по державке пренебрежимо мал, если $K_c < 0,1$. При малых значениях K_i критическое условие воспламенения образца имеет вид ($T_r = T_{кр}$)

$$\chi / (1 + K_r) = 1/e.$$

3. Скорость предпламенного окисления магния

Пользуясь приведенными выше опытными данными, можно считать кинетические константы для скорости предпламенного окисления порошкообразного магния. При этом учтем возможное различие процессов окисления жидкого и твердого магния². Засыпки воспламеняются при температуре поверхности образца заведомо меньшей температуры плавления магния. По пределам воспламенения таких образцов (см. рис. 2, 3) можно найти кинетические константы скорости окисления твердого магния:

$$v = 0,5, K_* = 0,2 \cdot 10^{14} \text{ кг}^{0,5} / (\text{м}^{0,5} \cdot \text{с}), E/R = 36000 \text{ К} \quad (4)$$

по схеме с учетом испарения металла и

$$v = 0,5, K_* = 0,17 \cdot 10^{13} \text{ кг}^{0,5} / (\text{м}^{0,5} \cdot \text{с}), E/R = 34000 \text{ К} \quad (5)$$

по схеме без учета испарения.

Степень совпадения расчетных и опытных значений пределов воспламенения иллюстрируется рис. 4 (расчет с константами (5)). Здесь нанесены значения предельных температур для засыпок при различных содержаниях кислорода, различной дисперсности и массы порошка. На зависимость, построенную для засыпок, легли точки, полученные для конгломератов в [5] (кресты).

Частицы магния, укрепленные на подвеске, воспламеняются при температуре газа ниже точки плавления металла. Однако пределы воспламенения этих частиц, вычисленные с константами для твердого Mg, оказываются выше опытных, причем расчетная температура поверхности частиц оказывается выше температуры плавления магния. Этот

² На такую возможность наше внимание обратил Б. И. Хайкин.

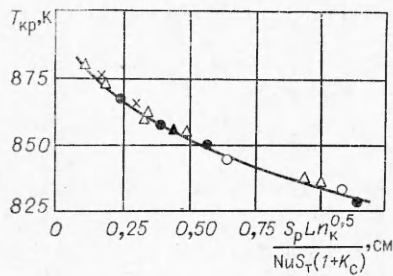


Рис. 4. Предел воспламенения запылок и конгломератов магниевого порошка.

результат означает, что жидкий магний окисляется с более высокой скоростью в сравнении с твердым. Если в процессе разогрева металл достигает точки плавления, то скорость окисления его возрастает скачком и после расплавления частица может воспламениться. Предельные условия воспламенения в этом случае определяются из условия, что перегрев твердой частицы над средой обеспечивает достижение частицей температуры плавления металла:

$$\chi \exp \theta_{пл} - K_i \exp (\chi \theta_{пл}) = (1 + K_*) \theta_{пл}, \quad (6)$$

где $\theta_{пл} = E/RT^2 \cdot (T_{пл} - T)$. Здесь $T_{пл}$ — температура плавления металла. Область применимости этого условия ограничивается «слева» и «справа» зависимостями $T_{кр}(L)$, построенными соответственно для жидких и твердых частиц. В частности, ограничение «справа» при отсутствии влияния испарения задается условием $\theta_{пл} = 1$.

Расчетная кривая $T_{кр}(L)$, полученная для крупных подвешенных частиц с помощью условия (6) без учета затрат тепла на испарение металла (с константами (5)), показана на рис. 1, 4. Как видно, она удовлетворительно согласуется с опытными данными. Если учесть еще и испарение металла (с константами (4)), то расчетная зависимость превышает опытные значения на величины много большие доверительного интервала для опытных пределов воспламенения. Отсюда следует, что для твердого магния испарение металла учитывать не нужно. Чтобы определить скорости предпламенного окисления жидкого магния, используем опытные значения пределов воспламенения мелких частиц ($L < 30$ мкм), для которых мала погрешность определения предела воспламенения, связанная с ограниченностью времени пребывания частиц в потоке (при проведении экспериментов в режиме $T = \text{const}$ пределы для мелких частиц определяются точнее, чем в режиме $T = \text{var}$). В расчете без учета затрат тепла на испарение металла

$$\nu = 0,5, K_* = 0,17 \cdot 10^5 \text{ кг}^{0,5}/(\text{м}^{0,5} \cdot \text{с}), E/R = 15\,000 \text{ К}. \quad (7)$$

Здесь порядок реакции окисления жидкого магния определялся с использованием дополнительного опытного значения предела воспламенения подвешенной частицы размером $L = 0,55$ мм при содержании кислорода в среде $n_k = 0,02$ ($T_{кр} = 925$ К). Как видно из рис. 1, 2 зависимость $T_{кр}(L)$, полученная с константами (7), ограничивает «слева» область применимости условия (6) при размере частицы $\approx 0,25$ мм.

Если учитывается испарение металла для жидкого магния, то при $\nu = 0,5$

$$K_* = 0,56 \cdot 10^{14} \text{ кг}^{0,5}/(\text{м}^{0,5} \cdot \text{с}), E/R = 36\,000 \text{ К}.$$

В этом случае расчетная зависимость проходит практически через всю совокупность опытных данных для подвешенных частиц, т. е. совпадает с зависимостью, полученной по условию (6). Таким образом, для расчетного описания имеющихся опытных данных потребовалось заключение, что влияние испарения на критические условия воспламенения твердого магния несущественно. При воспламенении жидкого металла опытные данные могут быть удовлетворительно обобщены как с учетом, так и без учета испарения. Однако нужно учесть, что подтвержденное в [13] предположение о слабом влиянии испарения — вследствие высоких скоростей окисления паров — для жидкого магния оправдывается

даже в большей степени, чем для твердого (у жидкого больше скорость испарения и выше температура поверхности образца). Это дает основание для предпочтения схеме без учета испарения с соответствующими кинетическими константами (7).

С константами для жидкого магния строились расчетные кривые зависимости предела воспламенения от размера частиц для реальных условий ограниченного времени пребывания частиц в потоке ($T = \text{const}$) и изменении температуры среды, окружающей частицу ($T = \text{var}$). В первом случае предельным считался режим, в котором расчетное время индукции оказывалось равным времени пребывания частицы в потоке (≈ 50 мс). Как видно из рис. 1, I расчетная зависимость хорошо согласуется с опытными данными. Во втором случае (для простоты принималось $T = T^* - at$) в расчете отыскивалось минимальное значение температуры газа в месте ввода частицы (T^*) и в месте их воспламенения на пределе ($T_{кр}$). Расчетная зависимость $T_{кр}(L)$, нанесенная на рис. 1, 3, качественно подобна опытной, но отличается количественно, главным образом вследствие неточности аппроксимации зависимости $T(t)$ (в действительности $T \approx T^* - at^{1/n}$) и меньшей точности измерения предела в случае $T = \text{var}$.

Сопоставим полученное значение энергии активации со значениями, имеющимися в литературе. При низкотемпературном окислении пластин магния получено $E/R = (10 \div 25) \cdot 10^3$ К [7], при окислении твердого порошкообразного магния это значение выше: $E/R = 36\ 000$ К [15] и близко к найденному в настоящей работе³. $E/R = 9\ 000$ К [1] и $19\ 000$ К [2] найдены расчетной обработкой опытных данных по пределам воспламенения одиночных частиц без учета испарения металла. По данным [1] в [11] с учетом испарения $E/R = 22\ 500$ К. Если учесть высказанное выше обоснованное опытом предположение о том, что пределы воспламенения частиц в [1, 2] занижены и тем сильнее, чем крупнее частицы⁴, то станет ясно, что указанные энергии активации нуждаются в уточнении. Значение $E/R = 71\ 000$ К получено обработкой опытных данных по пределам воспламенения частиц без учета изменения скорости окисления при «переходе» частицы через точку плавления магния и поэтому некорректно. Результаты данной работы позволяют рекомендовать для твердого магния $E/R = 34\ 000$ К, для жидкого — $15\ 000$ К. При расчете пределов воспламенения не нужно учитывать потери тепла на испарение металла.

Авторы выражают благодарность А. С. Мочаловой за участие в некоторых экспериментах.

Ленинградский политехнический
институт

Поступила в редакцию
8/VI 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. H. M. Cassel, J. Liebman. Comb. and Flame, 1959, 3, 4.
2. H. M. Cassel, J. Liebman. Comb. and Flame, 1963, 7, 1.
3. М. А. Гуревич и др. ФГВ, 1969, 5, 3.
4. Е. А. Золотарь, Е. С. Озеров. ФГВ, 1973, 9, 4.
5. Е. С. Озеров, И. И. Скворцов. ФГВ, 1971, 7, 2.
6. А. В. Лыков. Теплообмен. Справочник. М., «Энергия», 1972.
7. О. Кубашевский, Б. Гопкинс. Окисление металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1965.
8. Ю. Р. Эванс. Коррозия и окисление металлов. М., «Металлургия», 1962.
9. П. Кофстад. Высокотемпературное окисление металлов. М., «Мир», 1969.
10. E. A. Gulbransen. Trans. Electrochem. Soc., 1946, 87, 598.

³ $E/R = 24\ 000$ К получено в [15] обработкой данных в неизотермическом режиме начального периода окисления и поэтому не может считаться достоверным.

⁴ Для самых крупных начинает сказываться ограниченность времени пребывания частиц в потоке.

11. М. А. Гуревич, А. М. Степанов. ФГВ, 1968, 4, 2.
12. Б. И. Хайкин, В. Н.Bloшенко, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1970, 10, 4.
13. Г. И. Сиркунен. Канд. дис. ЛПИ им. М. И. Калинина. Л., 1974.
14. И. И. Иоффе, Л. М. Письмен. Инженерная химия гетерогенного катализа. Л., «Химия», 1972.
15. E. S. Freeston, C. Cambell. Trans. Faraday Soc., 1963, 59, 481.
16. Г. К. Ежовский, А. С. Мочалова и др.— В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ АЛЮМИНИЯ И ЦИНКА В ВОЗДУХЕ

М. Е. Деревяга, Л. Н. Стесик, Э. А. Федорин

Процессы воспламенения и горения алюминия исследовались сравнительно широко. Однако имеющиеся экспериментальные данные не позволяют в полной мере описать эти процессы. Это объясняется тем, что из-за методических трудностей при исследовании сравнительно высокотемпературных процессов воспламенения и горения алюминия измерялись немногие количественные характеристики и часто косвенным образом. В частности, при использовании методик на основе газовых горелок, трековых установок, печей, модельных двигателей и т. д. вместо температуры частицы в момент воспламенения рассматривалась температура окружающей газовой смеси. Закономерности саморазогрева частицы металла могут быть получены с достаточной надежностью только при замере изменения температуры частицы.

В основе использованной в данной работе методики лежит измерение температуры образца металла в период его разогрева, воспламенения и горения с помощью термопар. Воспламенение образцов алюминия проводилось с применением метода индукционного нагрева, обеспечивающего возможность разогревать образцы до высоких температур ($\sim 2400^\circ\text{C}$). Исследовались также процессы воспламенения и горения цинка. Поскольку основные особенности высокотемпературного окисления алюминия и цинка совпадают, можно ожидать аналогии в характере протекания их воспламенения и горения. Однако эти процессы реализуются у цинка при существенно более низких температурах. Это дало возможность проводить исследования в случае цинка как в условиях индукционного нагрева, так и при разогреве в горячем окислительном газовом потоке, что позволило сопоставить результаты, полученные двумя методами.

Для опытов использовались сферические образцы цинка ($2\div 3$ мм) и алюминия ($3\div 4$ мм) чистотой 99,8 и 99,5% соответственно. В исходном состоянии образцы были покрыты окисной пленкой, образовавшейся при комнатной температуре. Исследования проводились при разогреве образцов в индукторе (при обдуве их холодным газом) и в потоке горячего газа, продуваемого через трубчатую электрическую печь.

Схема опытов в условиях индукционного нагрева описана в [1]. Для проведения опытов в горячем окислительном газовом потоке использовалась трубчатая электрическая печь марки Т-40/600 с диаметром рабочего пространства 4 и длиной 75 см, установленная вертикально. Максимальная рабочая температура ее составляла 1200°C , что позволяло получать такие же температуры газового потока. Окисляющий газ подавался от баллона и был направлен снизу вверх. Верхняя часть печи закрывалась вкладышем из кварцевого стекла с отверстиями для выхода газа и ввода образца. Исследуемый образец, подвешенный на термопаре, вводился в печь на расстоянии 10 см от торца.