

воспламенению предшествует разрушение окисной пленки, сопровождающееся резким повышением яркости свечения частицы;

воспламенение происходит на отдельном участке поверхности, от которого пламя распространяется по всей частице со скоростью, зависящей от размера последней;

в пламени горячей частицы отчетливо выражены три зоны, отличающиеся по яркости свечения, появление которых, по-видимому, обусловлено диффузионным механизмом горения;

горение частиц алюминия сопровождается образованием на ее поверхности ярко светящихся «островков», предположительно состоящих из окиси алюминия, и выбросом с поверхности частицы шариков различного размера.

Авторы выражают признательность научным сотрудникам ИОА СО АН СССР М. Ф. Небольсину и В. И. Букатому за помощь при выполнении опытов и научному сотруднику ИХФ АН СССР Б. И. Хайкину за ценные советы и внимание к работе.

*НИИ прикладной математики
и механики при ТГУ*

*Поступила в редакцию
24/II 1975*

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Ф. Похил, А. Ф. Беляев и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М., «Наука», 1972.
2. Б. М. Злобинский, В. Г. Иоффе, В. Б. Злобинский. Воспламеняемость и токсичность металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1972.
3. В. В. Недин, О. Д. Нейков и др. Взрывоопасность металлических порошков. Киев, «Наукова думка», 1971.
4. А. А. Раздобреев, В. И. Букатый. Изв. вузов СССР, Физика, 1973, 3.
5. Гетерогенное горение. Сборник. М., «Мир», 1967.
6. J. L. Pringle. J. Electrochim. Soc., 1970, 117, 3, 385.
7. Р. Фридман, А. Мачек.— В сб. Гетерогенное горение. М., «Мир», 1967.
8. М. Я. Ген, Ю. В. Фролов, Т. А. Вербжицкая, В. С. Сторожев.— В сб.: Процессы горения в химической технологии и металлургии. Азакан, 1973.
9. В. В. Пантелеев, А. А. Янковский. ЖПС, 1965, 3, 350.
10. М. К. Чун, К. Роуз. J. Appl. Phys., 1970, 41, 614.

УДК 536.46

К ВОСПЛАМЕНЕНИЮ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

А. И. Григорьев, И. Д. Григорьева

Вопрос о расчете критических условий воспламенения небольшой частицы металла наиболее подробно и ясно был рассмотрен в работе [1], где предложена система уравнений, описывающих прогрев металла в потоке нагретого окислителя с учетом нарастания на поверхности металла окисной пленки, диффузия окислителя в которой лимитирует весь процесс окисления:

$$1/3(c_{pr} \cdot dT/dt) = Q_p \cdot dh/dt - \lambda/2r \cdot Nu(T - T_0),$$

$$dh/dt = k_n C_{ок}^m / h^n \cdot \exp(-E/RT), \quad (1)$$

$$\text{при } t=0 \quad T=T_n; \quad h=h_n,$$

Здесь T — температура частицы, усредненная по объему, T_0 — температура окружающей среды, r — радиус частицы, λ — коэффициент теплопроводности среды, ρ — плотность металла, c — удельная теплоемкость металла, Q — тепловой эффект реакции на единицу веса окисла, умноженный на отношение плотностей окисла и металла, h — толщина окисной пленки, $C_{\text{ок}}$ — концентрация окислителя, m — порядок реакции по окислителю, E — энергия активации, k_n — предэкспонент в соответствующем законе окисления, n — показатель, определяющий зависимость скорости окисления от толщины пленки (при $n=0$ металл окисляется по линейному закону, при $n=1$ — по параболическому, при $n=2$ — по кубическому и т. п.).

Система уравнений (1) записывается в безразмерном виде

$$\begin{aligned} d\theta/d\tau &= 1/z^n \cdot \exp[\theta/(1+\beta\theta)] - \theta/\varkappa, \\ dz/d\tau &= 1/z^n \cdot \exp[\theta/(1+\beta\theta)], \end{aligned} \quad (2)$$

при $\tau=0$ $\theta = -\theta_n$; $z = 1/\gamma$.

Здесь $\theta = E/RT_0^2 \cdot (T - T_0)$, $\theta_n = E/RT_0^2 \cdot (T - T_n)$,

$$z = h/r \cdot 3QE/cRT_0^2, \quad 1/\gamma = h_n/r \cdot 3QE/cRT_0^2,$$

$$\tau = t \left(\frac{3QE}{cRT_0^2} \right)^{n+1} \frac{k_n C_{\text{ок}}^m}{r^{n+1}} \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right), \quad (3)$$

$$\varkappa = \left(\frac{3QE}{cRT_0^2} \right)^{n+1} \frac{c\rho}{3\lambda} \frac{k_n C_{\text{ок}}^m}{r^{n+1}} \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right),$$

$$\beta = RT_0/E.$$

Система (2) содержит четыре безразмерных параметра: γ , \varkappa , θ_n , β , однако, как показывается в [1], при $\gamma \gg 1$, $\beta \ll 1$ критические условия воспламенения частицы металла определяются в основном параметром \varkappa и слабо зависят от остальных. Критические значения \varkappa для $n=1$ и 2 рассчитаны на ЭВМ.

Защитные окисные пленки во время предпламенного разогрева могут изменять свою структуру, переходя из одной структурной модификации в другую с соответствующими изменениями законов окисления. В этом случае среднее за время предпламенного разогрева значение n может оказаться дробным. Дробные законы окисления могут появиться также за счет нечистоты сжигаемого металла.

В этой связи представляется полезным рассчитать критические условия воспламенения частицы металла при дробных законах окисления. Математически задача будет выглядеть так же, как и для целочисленных законов окисления, т. е. определяться системой (2). Результаты численных расчетов на ЭВМ для $z_n = 0,01$, $\beta = 0,1$, $\theta_n = 0$ представлены на рис. 1. По оси ординат отложены критические значения параметра \varkappa , а по оси абсцисс — значения показателя n , определяющего закон окисления. На рис. 2 нанесены кривые зависимости $\varkappa_{\text{кр}}$ от начальной толщины окисной пленки для различных n . Безразмерная начальная толщина окисной пленки отложена по оси абсцисс.

На рис. 2 видна слабая зависимость критических условий воспламенения от начальной толщины окисной пленки при законах окисления, близких к линейному, и более сильная зависимость критических условий воспламенения от начальной толщины окисной пленки при законах окисления, близких к параболическому.

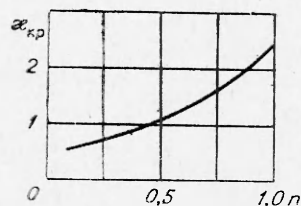


Рис. 1.

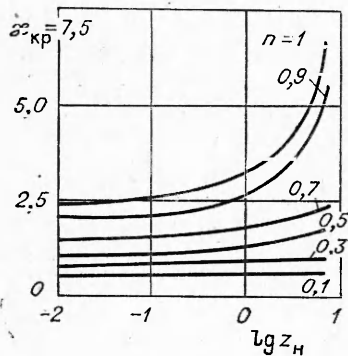


Рис. 2.

Подтверждением наличия у некоторых металлов средних дробных законов окисления может служить, согласно (3), экспериментально зафиксированная зависимость времени предпламенного разогрева частицы металла от ее размера: $\tau \sim r^k$, где k — дробное число. Такие зависимости известны. Так, для бериллия $\tau \sim d^{2.5}$, для бора $\tau \sim d^{1.65}$ [3].

Помимо обсуждения возможности средних дробных законов окисления представляется полезным остановиться подробнее на влиянии теплопотерь на излучение при расчете воспламенения металлических частиц. Для этого перепишем первое уравнение системы (1).

$$1/3(c\rho \cdot dT/dt) = Q_p(dh/dt) - (\lambda Nu/2r)(T - T_0) - \varepsilon\sigma(T^4 - T_*^4), \quad (4)$$

где ε — коэффициент излучения; σ — постоянная Стефана-Больцмана; T_* — температура среды, с которой происходит теплообмен излучением. В переменных (3), если $T_* = T_0$, уравнение (4) перепишется в виде

$$d\theta/d\tau = 1/z \cdot \exp\{\theta/(1+\beta\theta)\} - \theta/\kappa - k[(1+\beta\theta)^4 - 1]/\kappa, \quad (5)$$

где

$$k = (2\varepsilon\sigma ET_0^2/R\lambda Nu)r. \quad (6)$$

В работе [1] авторы предполагают не учитывать теплопотери на излучение частиц при $k \ll 1$. Приводится численный пример: при $E = 50$ ккал/моль, $T_0 = 2300$ К, $Nu = 2$, $\lambda = 2.4 \cdot 10^{-4}$ ккал/(см·с·град), $r_0 = 15$ мкм и $\varepsilon = 0.4$ параметр $k = 0.45$. На этом основании считается, что при воспламенении таких частиц влияние теплопередачи излучением носит поправочный характер даже при сравнительно высоких температурах. Это не совсем ясно, так как частица воспламеняется при $\theta \approx 3$. Принимая $\beta \approx 0.1$, получим, что теплопотери на излучение составляют 28% от теплопотерь на теплопроводность. Такие поправки желательно учитывать, тем более, что для более крупных частиц поправка будет возрастать пропорционально размеру.

Функцию $[(1+\beta\theta)^4 - 1]$ в различных интервалах температур можно хорошо аппроксимировать более простыми функциями. Так, на участке $\theta \in [0 \sim 1.5]$ при $\beta = 0.1$ функция $[(1+\beta\theta)^4 - 1]$ может быть с хорошей точностью заменена первым ее членом разложения в биномиальный ряд — $4\beta\theta$. Такой заменой можно пользоваться для металлов, окисляющихся по законам, близким к линейному, а также для расчета критических условий воспламенения частиц металлов со значительными начальными толщинами окисной пленки (для которых характерны небольшие разогревы на пределе воспламенения).

Для металлов, окисляющихся по законам, близким к параболическому, и для небольших начальных толщин окисной пленки функцию $[(1+\beta\theta)^4 - 1]$ можно заменять на $l\beta\theta$ с $l \in [4; 6]$ в зависимости от величины разогрева на пределе воспламенения. С ростом l увеличивается ошибка от предлагаемой замены.

Заменив $[(1+\beta\theta)^4 - 1]$ на $l\beta\theta$, получим:

$$\begin{aligned} d\theta/d\tau &= 1/z \cdot \exp\{\theta/(1+\beta\theta)\} - \theta/\Omega, \\ dz/dt &= 1/z \cdot \exp\{\theta/(1+\beta\theta)\}. \end{aligned} \quad (7)$$

При $t=0$ $z=z_0$; $\theta=\theta_0$.

Здесь

$$\Omega = \kappa / (1 + k/\beta). \quad (8)$$

С математической точки зрения записанные уравнения формально совпадают с уже решенной задачей (2), только вид критического параметра в данном случае иной.

Из выражения (8) видно, что теплотери на излучение будут незначительными, если параметр k мал по сравнению с $1/\beta$.

Критические условия воспламенения частицы металла, записанные в виде $\Omega = \text{const}$, где Ω определяется из (8), позволяют в явной форме учесть теплотери на излучение. Из (3), (6), (8) видно, что критическая температура воспламенения является функцией размера частицы, причем с увеличением размера эта зависимость усиливается. Из этого, в частности, следует, что полученная в экспериментах независимость критической температуры воспламенения алюминия от размера [2—4] говорит о том, что алюминий в этих экспериментах окислялся по дробному закону, немного более слабому, чем параболический.

*Комсомольский-на-Амуре
вечерний политехнический
институт*

*Поступила в редакцию
14/X 1974*

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. И. Хайкин, В. Н. Блошенко, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1970, 5, 4.
2. Ю. В. Фролов, П. Ф. Похил, В. С. Логачев. ФГВ, 1972, 8, 2.
3. П. Ф. Похил, А. Ф. Беляев и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах, М., «Наука», 1972.
4. Г. Н. Маркштейн, 1963, РТК, 1, 3.

УДК 662.581

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАЖИГАНИЯ БЕЗГАЗОВЫХ СИСТЕМ ВОЛНОЙ ГОРЕНИЯ

В. И. Ермаков, А. Г. Струнина, В. В. Барзыкин

Теоретическое изучение основных закономерностей зажигания и следующих за ним нестационарных процессов горения безгазовых систем, поджигаемых горящим воспламенителем, проведено в работе [1].

В данной работе излагаются результаты экспериментального исследования этих закономерностей. Зажигание безгазовых систем волной горения экспериментально не изучалось. Экспериментальных работ по изучению процессов нестационарного горения известно очень мало и проведены они в основном на газифицирующихся системах типа пороха Н [2—4]. Такое положение объясняется значительными трудностями, возникающими при исследовании нестационарных процессов горения. В первую очередь это относится к переходным режимам от зажигания к горению и с одного режима горения на другой. Изучение же перехода от зажигания к горению безгазовых систем осложняется дополнительными трудностями, связанными с возможностью возникновения автоколебательных режимов горения [5, 6].

Выбор системы. Изучение процессов зажигания безгазовых систем волной горения проводилось на термитных составах. Термиты относят-