

ОЧАГОВОЕ ЗАЖИГАНИЕ СЛОЯ ПОРОШКА МЕТАЛЛА

*Е. В. Черненко, П. М. Кришеник,
Т. П. Ивлева, В. И. Розенбанд
(Черноголовка)*

Необходимость изучения процесса зажигания порошков тугоплавких металлов внутренним источником связана с определением чувствительности порошков металлов к различным тепловым воздействиям (искры электрического и механического происхождения, разогрев инородных включений и т. д.) и установлением надежных правил пожарной безопасности при их изготовлении, хранении и использовании на всех стадиях производств порошковой металлургии.

Специфика очагового зажигания насыпных порошков металлов в отличие от ранее изученного очагового воспламенения гомогенных конденсированных систем [1, 2] заключается в сложном законе окисления (торможение химической реакции нарастающим слоем продукта на частицах металла) и существенной роли в процессе воспламенения диффузии и фильтрации газообразного окислителя в слое порошка через поры между отдельными частицами металла.

Постановка задачи. При теоретическом изучении закономерностей воспламенения насыпных порошков металлов внутренним источником в зависимости от таких параметров, как температура, размер источника, давление и концентрация окислителя в газовой фазе, пористость и коэффициенты фильтрации и диффузии в порошке и т. п., используется следующая модель. В центре слоя порошка металла находится очаг размером R_m , который в начальный момент времени имеет температуру T_0 . Очаг окружен слоем порошка металла радиусом R_0 с начальной температурой T_{10} . Система (очаг и слой порошка) находится в газовой среде, характеризующейся постоянным давлением p_{20} и относительной массовой концентрацией окислителя a_{20} с температурой, равной начальной температуре порошка металла. Задан коэффициент теплоотдачи с поверхности порошка в окружающую среду. В процессе реакции, инициированной внутренним очагом и идущей на поверхности частиц металла, окислитель вырабатывается, температура в слое порошка увеличивается, что приводит к возникновению массового потока газа. В центре системы ($r=0$) заданы адиабатические условия по температуре, на границе очаг — порошок металла ($r=R_m$) — сопряженные граничные условия по температуре, на границе порошок металла — газовая среда ($r=R_0$) — граничные условия третьего рода с учетом переноса тепла за счет фильтрации газа.

Система уравнений, описывающая эту модель, имеет вид: уравнение энергии для очага при $0 < r < R_m$

$$c_0 \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{1}{r^m} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^m \frac{\partial T}{\partial r} \right) + I; \quad (1)$$

уравнение химической кинетики [3] при $R_m < r < R_0$

$$\frac{d\eta}{dt} = W = k_0 (\bar{\rho}_1 \bar{a}_1)^N \frac{e^{-E/RT_1}}{e^{\alpha_0 \eta}} \quad (\eta = 1: W = 0); \quad (2)$$

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} = \frac{1}{r^m} \frac{\partial}{\partial r} (r^m \rho_1 v_\phi) - \mu_{10} \rho_M^0 W; \quad (3)$$

уравнение диффузии

$$\frac{\partial (\rho_1 a_1)}{\partial t} = \frac{1}{r^m} \frac{\partial}{\partial r} (r^m \rho_1 a_1 v_\phi) - \mu_{10} \rho_M^0 W + \frac{1}{r^m} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^m D_1 \rho_1 \frac{\partial a_1}{\partial r} \right), \quad (4)$$

$$\text{где} \quad D_1 = D_{01} \rho_1^{v_1} T_1^{v_2}; \quad (5)$$

уравнение энергии для слоя порошка металла

$$\begin{aligned} & \left\{ c_1 \rho_1 \left[a_1 + \frac{c_2}{c_1} (1 - a_1) \right] + c_M \rho_M^0 (1 - \eta) + c_{ок} \rho_M^0 \mu_{11} \eta \right\} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \\ & = \lambda_1 \frac{1}{r^m} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^m \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \rho_M^0 W [Q + (c_1 + \mu_{10} c_M - \mu_{11} c_{ок}) T_1] - \\ & - \rho_1 c_1 a_1 + \frac{c_2}{c_1} (1 - a_1) v_\phi \frac{\partial T_1}{\partial r}; \end{aligned} \quad (6)$$

уравнения состояния

$$p_{11} = \frac{\rho_1 R T_1}{m_1} a_1 \frac{1}{\Pi}, \quad (7)$$

$$p_1 = \rho_1 R T_1 [a_1 + m_1 (1 - a_1) / m_2] / m_1 \Pi; \quad (8)$$

уравнение фильтрации (закон Дарси)

$$v_\phi = \frac{K_r}{\mu_r} \frac{\partial p_1}{\partial r}, \quad (9)$$

$$\text{где} \quad \mu_r = a_0 + b_0 T_1. \quad (10)$$

Начальные и граничные условия:

$$t = 0: T = T_0, T_1 = T_{10}, p_1 = p_{20}, a_1 = a_{20}, \eta = \eta_M;$$

$$r = 0: \frac{\partial T}{\partial r} = 0;$$

$$r = R_M: T = T_1, \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r}, \frac{\partial a_1}{\partial r} = 0, \frac{\partial p_1}{\partial r} = 0;$$

$$r = R_6: p_1 = p_{20}, a_1 = a_{20}, \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = -c_1 \left[a_1 + \frac{c_2}{c_1} (1 - a_1) \right] v_\phi \cdot \\ \cdot (T_1 - T_{20}) \rho_1 - \alpha (T_1 - T_{20}).$$

Здесь $\eta = (1 - \rho_M / \rho_M^0)$ — глубина выгорания металла; ρ_M^0, ρ_M — исходное и текущее содержание металла в единице объема; T, T_1 — температура очага и порошка металла; $c_0, c_M, c_{ок}, c_1, c_2$ — теплоемкость очага, металла, окисла, окислителя и инертного газа соответственно; ρ_0, ρ_1 — плотность очага и газа; λ, λ_1 — теплопроводность очага и порошка металла; W — скорость химической реакции; k_0 — предэкспоненциальный множитель; E — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная; a_1 — относительная массовая концентрация окислителя; α — коэффициент, характеризующий величину торможения скорости реакции нарастающим на частицах металла слоем продукта; N — показатель степени зависимости скорости реакции от концентрации окислителя; v_ϕ — скорость фильтрации; K_r — коэффициент газопроницаемости; μ_r — вязкость газа; a_0 и b_0 — величины, определяющие зависимость вязкости газа от температуры; μ_{10}, μ_{11} — стехиометрические коэффициенты; D_1 — коэффициенты диффузии; v_1, v_2 — величины, характеризующие зависимость коэффициента диффузии от плотности и температуры газа; Q — тепло-

вой эффект реакции на единицу массы металла; p_{11} , p_1 — давление окислителя и суммарное давление газа; Π — коэффициент пористости.

При математической постановке задачи предполагалось, что исходный металл и продукт реакции — тугоплавкие соединения, не плавящиеся в процессе реакции между металлом и газообразным окислителем, размеры пор макроскопические, фильтрация осуществляется по закону Дарси, изменением пористости в ходе реакции пренебрегалось.

Последний член в уравнении (1) определяет вид внутреннего источника. При $I=0$ очаг мгновенный, т. е. в начальный момент времени внутреннее тело нагрето до высокой температуры и дополнительного тепловыделения в нем не происходит. При $I = \text{const} \neq 0$ — постоянный источник (в единицу времени в единице объема очага выделяется постоянное количество тепла). В связи с многопараметричностью системы уравнений задача решалась численно на ЭВМ в размерном виде.

Мгновенный очаг. При расчете задачи выбраны следующие значения начальных данных, соответствующие кинетическим и теплофизическим характеристикам окисления порошка титана в кислороде: $E = 49500$ кал/моль, $k_0 = 4,3 \cdot 10^{14}$ см³/(моль · с), $N = 1$, $\alpha_0 = 61$ [3], $\eta_n = 0,01$, $\Pi = 0,77$, $K_r = 2,18 \cdot 10^{-11} \div 2,18 \cdot 10^{-14}$ см² [4], $R = 2$ кал/(моль · град), $Q = 225$ ккал/моль, $D_{01} = 1,1 \cdot 10^{-10}$ моль/(см · град²), $\nu_1 = -1$, $\nu_2 = 3/2$, $c_m = 9,12$ кал/(моль · град), $c_{ок} = 15,6$ кал/(моль · град), $a_0 = 9,07 \cdot 10^{-8}$ г/(см · с), $b_0 = 4 \cdot 10^{-10}$ г/(см · с · град), $c_1 = c_2 = 5$ кал/(моль · град), [5], $\rho_m^0 = 2,2 \cdot 10^{-2}$ моль/см³, $\lambda_1 = 10^{-2}$ кал/(см · с · град), $\alpha = 10^{-3}$ кал/(см² · с · град) [6], $T_{10} = 300$ К, $m = 1$, т. е. в расчетах принималось, что образец имеет форму бесконечного цилиндра. Для внутреннего очага принято, что $c_0 = 0,5$ кал/(г · град), $\rho_0 = 7$ г/см³, $\lambda = 10^{-2}$ кал/(см · с · град).

На рис. 1, а представлены профили температуры, глубины выгорания и скорости газа по образцу в одни и те же моменты времени, полученные расчетом на ЭВМ. Начальное давление чистого окислителя (кислорода) $p_{20} = 1$ атм. Очаг имеет начальную температуру 2000 К, $R_m = 0,29$ см. Радиус всего образца до границы с газовой фазой $R_0 = 0,8$ см.

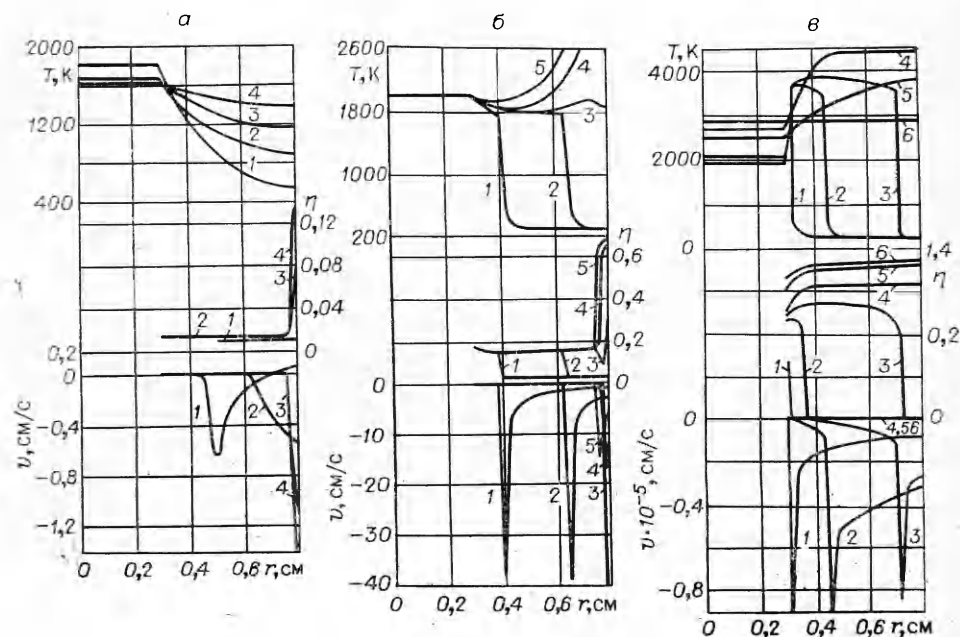


Рис. 1. Профили температуры T , глубины выгорания η и скорости газового потока v в образце при зажигании порошка металла в кислороде.

t , с: а) 1 — 0,991, 2 — 1,99, 3 — 2,84, 4 — 4,42; б) 1 — $2,88 \cdot 10^{-2}$, 2 — $9,4 \cdot 10^{-2}$, 3 — $1,22 \cdot 10^{-1}$, 4 — $2,88 \cdot 10^{-1}$, 5 — $3,77 \cdot 10^{-1}$; в) 1 — $6,52 \cdot 10^{-3}$, 2 — $1,53 \cdot 10^{-2}$, 3 — $3,12 \cdot 10^{-2}$, 4 — $1,46 \cdot 10^{-1}$, 5 — 3,86, 6 — 10,3.

Видно, что в момент контакта очага с порошком металла возникает волна выгорания металла, которая (неизотермический режим превращения) распространяется к поверхности порошка. Большое недогорание металла ($\eta_n = 0,01$, после прохождения волны — $0,012$) обусловлено малым начальным количеством окислителя в порах между отдельными частицами порошка и слабой скоростью подвода окислителя к волне за счет фильтрации. Отрицательная скорость газа вызвана выгоранием окислителя в слое порошка и соответствует подводу газа от внешних слоев порошка к внутренним. Положительные скорости связаны с термическим расширением газа. При этом газ стремится выйти из образца, причем движение направлено к границе порошок — газовая фаза.

На рис. 1, б показана картина развития процесса зажигания при $p_{20} = 25$ атм. Считалось, что зажигание имело место, если в образце устанавливался распространяющийся к поверхности незатухающий фронт горения. С увеличением давления общий характер развития процесса не изменяется. Однако в этом случае волна превращения, идущая от очага к поверхности слоя порошка, становится более ярко выраженной. Температура и глубина выгорания в ней значительно увеличиваются, тогда как время, за которое она достигает какого-либо определенного слоя порошка, значительно сокращается. Изломы на температурных профилях (см. рис. 1, б, кривые 1, 2) показывают границу между реакционным и инертным профилем. При давлении 25 атм возникает ситуация, обусловленная малой скоростью фильтрации, когда до прихода волны неизотермического превращения от очага к поверхности на поверхности образуется вторая волна, движущаяся навстречу первой (см. рис. 1, б, кривая 3).

Для более детального исследования процесса зажигания проведен безразмерный критериальный анализ задачи. В результате получены характерные времена: тепловой релаксации $i_{*T} = R_0^2 c_{11} \rho_{11} / \lambda_1$, фильтра-

$$\begin{aligned}
 \text{ции } i_{*f} &= \frac{R_0^2 \mu_r}{p_{20} K_r} = \frac{R_0^2 m_{11} \mu_r \Pi}{\rho_{10} T_{20} K_r R}, \text{ диффузии } t_{*d} = \bar{R}_0^2 / D_1, \text{ химической реакции} \\
 t_{*p} &= \frac{e^{\alpha_0 \eta_n} R T_*^2 c_{11} \rho_{11} e^{-E/RT_*}}{\rho_{10}^0 k_0 Q \rho_{10} E}. \text{ За } T_* \text{ принимается температура очага.}
 \end{aligned}$$

В зависимости от соотношения этих характерных времен возможно протекание процесса в кинетическом режиме ($i_{*p} \gg i_{*f}$, а при наличии инертного разбавителя в газовой фазе $i_{*p} \gg i_{*d}$), когда лимитирующей стадией развития процесса является не подвод окислителя, а скорость химической реакции, либо в фильтрационном ($t_{*p} \ll t_{*f}$), либо при наличии газов в диффузионном ($t_{*p} \ll t_{*d}$) режимах.

Приведенные картины развития процесса зажигания на рис. 1, а, б соответствуют фильтрационному режиму. В кинетическом режиме (см. рис. 1, в) глубина выгорания и температура, достигаемые в образце, значительно возрастают, причем после выхода волны неизотермического превращения на поверхности порошка весь порошок металла горит равномерно по всему профилю. Некоторое падение температуры вблизи поверхности очага объясняется тем, что очаг забирает на себя часть тепла, выделяемого в результате химической реакции. В диффузионном режиме так же, как и в фильтрационном, наблюдаются малые температуры и глубины выгорания в образце при наличии больших положительных скоростей газового потока, что является следствием теплового расширения инертного газа.

На рис. 2 представлена зависимость критического размера очага (наименьший размер очага, при котором возможно воспламенение) от его температуры, рассчитанная для случая $p_{20} = 10$ атм, $R_0 = 3$ см. Кривая 2 соответствует кинетическому режиму зажигания. Кривая 1 построена по данным работы [8], в которой рассматривалось зажигание внутренним очагом слоя химически реагирующего вещества для реакции нулевого порядка без учета фильтрации и диффузии. При этом при-

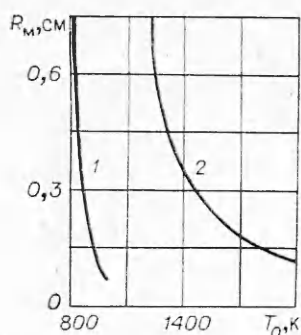


Рис. 2. Зависимость критического размера очага от его температуры. Окислитель — кислород.

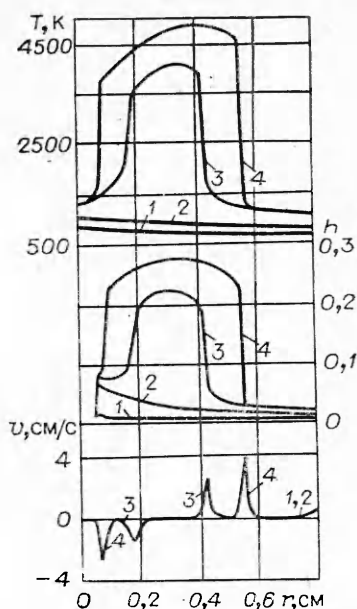
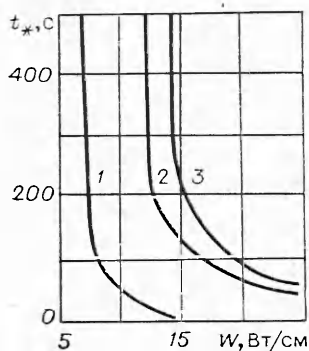


Рис. 3. Профили температуры глубины выгорания и скорости газового потока при $p_{20} = 1$ атм.
 $t, c: 1 - 1,84 \cdot 10^2, 2 - 3,84 \cdot 10^2, 3 - 3,861 \cdot 10^2, 4 - 3,862 \cdot 10^2.$

Рис. 4. Зависимость времени задержки зажигания от мощности источника ($R_m = 0,05$ см, $R_0 = 0,8$ см) при зажигании на воздухе (1, 3) и в кислороде (2).

$\lambda_1, \text{ кал}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{град}): 1 - 10^{-3}, 2, 3 - 10^{-2}.$

веденные выше кинетические параметры нормировались на случай реакции нулевого порядка, согласно данным [8]. В кинетическом режиме критические условия зажигания не зависят от толщины слоя порошка (расчет проводился для $R_0 \geq 0,8$ см). При зажигании в фильтрационном режиме, при малых начальных давлениях окислителя, недостаточных для протекания процесса только за счет окислителя, находящегося в порах, размер слоя оказывает значительное влияние на критические условия. При больших R_0 волна неизотермического превращения может затухнуть, не дойдя до поверхности порошка.

Таким образом, учет сложного закона окисления, а также фильтрационных и диффузионных затруднений подвода окислителя приводит к значительному изменению критических условий зажигания, что обуславливает необходимость учета этих факторов.

Постоянный очаг. При расчетах принималось, что начальная температура очага, слоя порошка металла и внешней газовой среды одинакова. Начальные данные при исследовании задачи зажигания постоянным очагом совпадали с теми, что были выбраны для мгновенного очага, кроме значений $c_0 = 0,16$ кал/(г · град) и $\rho_0 = 1,76$ г/см³.

На рис. 3 приведены профили температуры, глубины выгорания и скорости газового потока в одни и те же моменты времени при зажигании внутренним постоянным источником радиусом 0,05 см, при внешнем размере цилиндрического слоя порошка металла 0,8 см. Мощность, выделяемая на единицу длины источника, $W_0 = 12,7$ Вт/см, газовая среда — кислород с начальным давлением 1 атм. В начальные моменты времени идет прогрев порошка металла за счет поступающего от внутреннего источника тепла. При этом наблюдаются незначительные глубины выгорания вблизи очага, и газ, находящийся в порах (между частицами металла), при нагревании расширяется и выводится из образца (см. рис. 3, 1, 2). В последующие моменты времени температура в слое

порошка возрастает как за счет тепла от внутреннего очага, так и за счет химической реакции. Воспламенение наступает на некотором расстоянии от очага, так как очаг в момент развития активной химической реакции забирает на себя часть тепла. Появляются две волны горения, движущиеся в противоположные стороны. При этом идет догорание материала между двумя фронтами горения. Распространяющиеся волны как бы толкают перед собой газ, что обусловлено его тепловым расширением (см. рис. 3, 3, 4).

В задачах с непрерывным источником тепла определяющим параметром является критическая мощность источника $W_{0\text{кр}}$, ниже которой воспламенение не происходит. На рис. 4 приведена зависимость времени задержки зажигания в среде кислорода и воздуха от мощности источника, $p_{20} = 1$ атм. Видно, что с ее увеличением время задержки зажигания плавно уменьшается. При разбавлении окислителя инертным газом качественный характер развития процесса зажигания остается неизменным. На $W_{0\text{кр}}$ существенно влияют также теплофизические свойства порошка. Так, например, уменьшение λ_1 приводит к снижению $W_{0\text{кр}}$, поскольку тепло от очага концентрируется в более узком слое порошка.

При расчетах задачи на ЭВМ получено, что с увеличением размера внутреннего источника $W_{0\text{кр}}$ возрастает. Ниже приведены значения $W_{0\text{кр}}$ в зависимости от R_m при $p_{20} = 10$ атм, $R_0 = 0,8$ см ($\lambda_1 = 10^{-2}$ кал/(см · с · град), $\rho_m^0 = 2,2 \cdot 10^{-2}$ моль/см³):

R_m , мм	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$W_{0\text{кр}}$, Вт/см	5,70	6,05	6,50	7,15	7,74	8,32

Эксперимент. Экспериментальная установка для исследования закономерностей зажигания слоя порошка металла внутренним источником аналогична описанной в [6]. В капсулу из латунной сетки засыпался порошок металла. В центре капсулы устанавливалась нагреваемая электрическим током нихромовая нить в кварцевом капилляре. Мощность, выделяемая из нихромовой нити, регулировалась автотрансформатором. Наружный диаметр кварцевого капилляра составлял 0,8 или 1,3 мм. В экспериментах использовались капсулы длиной 20 и диаметром 15 мм. Коэффициент теплоотдачи с ее поверхности в окружающую газовую среду задавался скоростью обдувающего газового потока. В качестве объектов исследования выбраны порошки магнийтермического и электролитического титана.

На рис. 5, 1, 2 приведены зависимости времени задержки зажигания от мощности источника при двух значениях диаметра кварцевого капилляра. Как и в расчетах задачи на ЭВМ, экспериментально получено, что с увеличением диаметра источника $W_{0\text{кр}}$ возрастает. Это объясняется тем, что при одной и той же мощности источника на единицу длины поступающее тепло при большом диаметре капилляра распределяется по большей площади порошка титана и, следовательно, порошок у поверхности кварцевого капилляра нагревается за счет источника до меньших температур.

Термопарные измерения показали, что временная зависимость перепада температур между поверхностью кварцевого капилляра и внешней поверхностью образца может быть трех характерных видов (рис. 6). При диаметре кварцевого капилляра 1,3 мм и $W_0 = 2,14$ Вт/см в среде воздуха эта зависимость представляет собой гладкую кривую (см. рис. 6, 3), которая постепенно выходит на стационарный уровень. В образце устанавливается постоянный градиент температуры, обусловленный равенством в единицу времени тепловыделения от внутреннего источника и теплоотвода с поверхности в окружающую среду. При $W_0 = 3,5$ Вт/см (см. рис. 6, 2) наблюдается максимум на кривой, который связан с поступлением тепла от химической реакции окисления титана в прогретых слоях порошка вблизи источника. Поскольку температура порошка титана недостаточно велика, чтобы ускорение реакции

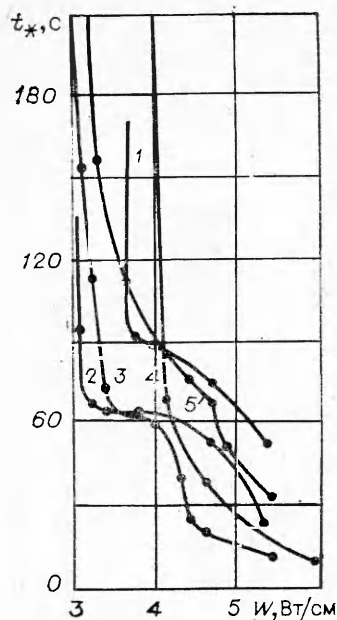


Рис. 5. Зависимость времени задержки зажигания от мощности источника.

1 — $d=1,3$ мм, воздух, $v_r=13,8$ м/с, порошок магнийтермический; 2 — $d=0,8$ мм, воздух, $v_r=13,8$ м/с, порошок магнийтермический; 3 — $d=1,3$ мм, кислород, $v_r=13,8$ м/с, порошок магнийтермический; 4 — $d=0,8$ мм, воздух, $v_r=13,8$ м/с, порошок электролитический; 5 — $d=1,3$ мм, кислород, $v_r=5,9$ м/с, порошок магнийтермический.

при одинаковой мощности источника значительно меньше, что качественно хорошо согласуется с расчетом (см. рис. 4, 2, 3). С ростом скорости газового потока, обдувающего образец, теплоотдача с поверхности образца увеличивается [6] и $W_{0\text{кр}}$ возрастает. Так, при $v_r=5,9; 11,5; 13,8$ и $23,5$ см/с $W_{0\text{кр}}$ равна соответственно 3,2; 3,5; 3,6 и 3,7 Вт/см. Зависимость t_* от W_0 при двух различных скоростях газового потока приведена на рис. 5, 1, 5. Видно, что почти при всех мощностях источника (больших критической) t_* больше при меньшей скорости газового потока. Пересечение кривых 1 и 5 в двух точках объясняется тем, что изменение скорости газового потока двояко влияет на процесс зажигания. С одной стороны, рост скорости потока приводит к увеличению теплоотдачи с поверхности образца в окружающую среду, ухудшая его воспламенение, с другой — эффективная продувка газа повышает концентрацию кислорода в образце, способствуя его воспламенению.

В опытах по исследованию влияния марки порошка титана использовались два порошка, отличные по способу приготовления. Несмотря на то, что по фракционному составу порошок магнийтермического титана значительно крупнее электролитического, удельная поверхность первого значительно выше. Массовое содержание фракции менее 40 мкм в порошке магнийтермического титана 30,3%, а в порошке электролитического — 54,2%, удельная поверхность первого 4,38, а второго 2,24 м²/г [7]. Исследования порошков под электронным микроскопом показали, что порошок электролитического титана состоит из отдельных гладких частиц размером ≈ 30 мкм, тогда как порошок магнийтермического титана состоит из частиц значительно меньшего размера (≤ 5 мкм), которые собраны в конгломераты размером ~ 100 мкм. Это различие по форме частиц (а поскольку способ производства порошков различен, то возможно и по химическому составу) приводит к тому, что процесс зажигания существенно зависит от марки порошка титана (см. рис. 5, 2, 4).

Из рис. 5 видно, что с увеличением мощности внутреннего источника, начиная с определенной мощности, наблюдается резкое уменьше-

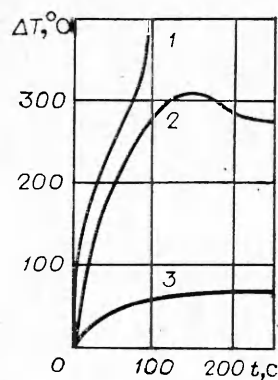


Рис. 6. Зависимость перепада температур между поверхностями кварцевого капилляра и образца от времени для магнийтермического титана, $v_r=13,8$ м/с. W_0 , Вт/см: 1 — 3,9, 2 — 3,5, 3 — 2,4.

из-за увеличения температуры преобладало над торможением за счет нарастания окисной пленки, химическая реакция затухает и устанавливается стационарный режим. При мощностях источника, больших критической, температура в слое порошка достигает значительных величин за счет поступающего от источника тепла, а, так как наибольшая температура создается в слое порошка, близком к поверхности капилляра, воспламенение наступает вблизи поверхности источника, что и фиксируется дифференциальной термопарой (см. рис. 6, 1).

При замене воздушной среды на кислород $W_{0\text{кр}}$ уменьшается (см. рис. 5, 1, 3) и t_*

ние времени задержки зажигания. Этот эффект наблюдается как при зажигании порошка титана на воздухе, так и в чистом кислороде. Резкое снижение t_* с увеличением W_0 , как и в случае зажигания нагретым газом [6], можно объяснить сменой механизма зажигания. При малых мощностях источника воспламенение образца происходит в результате того, что теплоприход за счет реакции окисления (при наличии окисной пленки на частицах металла) начинает превышать теплоотвод в окружающей среду. При больших W_0 в результате более высокой скорости нарастания температуры в образце, а следовательно, и более быстрого нарастания окисной пленки, возникают большие механические напряжения как в самой окисной пленке, так и на границе между металлом и слоем продукта. Под действием этих напряжений происходит растрескивание окисной пленки и воспламенение образца.

Косвенным подтверждением существования двух механизмов зажигания порошка титана может служить и тот факт, что эффект резкого снижения t_* с увеличением W_0 на порошке электролитического типа не обнаружен. Механические напряжения в окисной пленке и на границе металл — слой продукта приводят к значительному растрескиванию окисной пленки в местах контактов отдельных частиц в конгломератах порошка магнийтермического титана, поэтому смена механизмов зажигания на этом порошке более выражена. В расчетах этот эффект немонотонного снижения t_* не наблюдается, так как в задаче не заложено условие растрескивания окисной пленки под действием механических напряжений.

Экспериментальные и теоретические результаты качественно хорошо согласуются между собой. Однако их количественное сопоставление затруднено ввиду недостаточной точности определения теплофизических, кинетических и фильтрационно-диффузионных параметров. Тем не менее значение $W_{0\text{кр}}$, полученное экспериментально, всего примерно в 2 раза ниже $W_{0\text{кр}}$, полученной в расчетах. Все это может свидетельствовать о применимости рассмотренной теоретической модели процесса очагового зажигания слоя порошка металла.

Поступила в редакцию 4/X 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Мержанов, В. В. Барзыкин, В. Т. Гонтковская. Докл. АН СССР, 1963, 148, 2.
2. А. Г. Мержанов. О критических условиях теплового очага разогрева. Препринт ОИХФ АН СССР. Черноголовка, 1968.
3. В. А. Грива, В. И. Розенбанд.— В кн.: Проблемы технологического горения. Т. 1. Черноголовка, 1981.
4. В. И. Розенбанд, В. А. Чичев, Л. Ф. Афанасьева. ФГВ, 1976, 12, 1.
5. Н. Б. Варгафтик. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Физматгиз, 1963.
6. Л. Ф. Афанасьева, Е. В. Черненко, В. И. Розенбанд.— В кн.: Проблемы технологического горения. Т. II. Черноголовка, 1981.
7. В. А. Олишевец, В. М. Селиванова.— В кн.: Проблемы технологического горения. Т. II. Черноголовка, 1981.
8. У. И. Гольдшлегер, К. В. Прибыткова, В. В. Барзыкин. ФГВ, 1973, 9, 1.

МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ФРОНТОВ ЛЕСНОГО ПОЖАРА

Г. А. Доррер
(Красноярск)

В работах последних лет, посвященных описанию закономерностей горения при лесных пожарах [1—5], достаточно подробно изучено установившееся движение прямолинейного в плане фронта пожара, распро-