

ПОВЕРХНОСТНОЕ ОЧАГОВОЕ ЗАЖИГАНИЕ СЛОЯ ПОРОШКА МЕТАЛЛА В КИСЛОРОДЕ

*В. Ф. Аристов, В. В. Барзыкин, П. М. Кришеник,
В. И. Розенбанд
(Черноголовка)*

Очаговому воспламенению гомогенных конденсированных веществ посвящен ряд работ [1—4]. Специфика очагового зажигания насыпных порошков металлов в газообразном окислителе заключается в сложном законе окисления порошков металлов, связанном с торможением реакции слоем образующегося продукта и существенной ролью в процессе зажигания фильтрации окислителя через слой порошка.

Зажигание слоя порошка металла внутренним источником (одномерная задача) с учетом этих факторов рассматривалась в [5]. Однако в постановке задачи [5] источник зажигания находится внутри слоя порошка далеко от поверхности раздела с окислителем, поэтому фильтрационный подвод кислорода в прогретую зону затруднен. Вследствие этого при атмосферном давлении кислорода невозможно распространение волны горения даже от источника зажигания с температурой более 1700°C. Распространение волны горения в слое порошка титана наблюдалось только при больших давлениях кислорода (порядка 10 атм), когда кислорода, находящегося в порах между отдельными частицами металла, достаточно для обеспечения горения. В производственных условиях загорание слоя порошка возможно при существенно более низких температурах очагов и при атмосферном давлении. Это связано с тем, что, как правило, загорание слоя происходит в результате образования не внутреннего, а поверхностного очага. Например, одним из наиболее распространенных источников воспламенения порошков в производственных условиях являются искры трения механического происхождения [6], т. е. попавшие на поверхность порошка металла раскаленные частицы. Поверхностное очаговое зажигание слоя порошка металла экспериментально исследовано в [6, 7]. В [7] слой порошка металла зажигался раскаленным диском, а в [6] — потоком раскаленных частиц, образующихся при трении стальных поверхностей. Получено [7], что при атмосферном давлении воздуха слой порошка титана загорается уже при температурах поджигающего диска 650—700°C. Большое отличие от расчета по модели [5] величины критической температуры очага (более чем на 1000°C) и давления кислорода (примерно на 10 атм) свидетельствует о существенной специфике поверхностного очагового зажигания по сравнению с зажиганием внутренним очагом.

Изложенное свидетельствует о важности рассмотрения поверхностного очагового зажигания слоя порошка металла.

При постановке задачи приняты во внимание следующие соображения: 1) модель рассматриваемого процесса не может быть одномерной, так как существенно различны условия тепло- и массообмена в направлениях вверх от очага (в газообразный окислитель), вниз (в глубь слоя порошка) и в стороны (в зоны порошка, близкие к границе раздела слоя порошка и окислителя), 2) принятая модель должна обеспечивать количественное сопоставление с экспериментом. В результате постановка

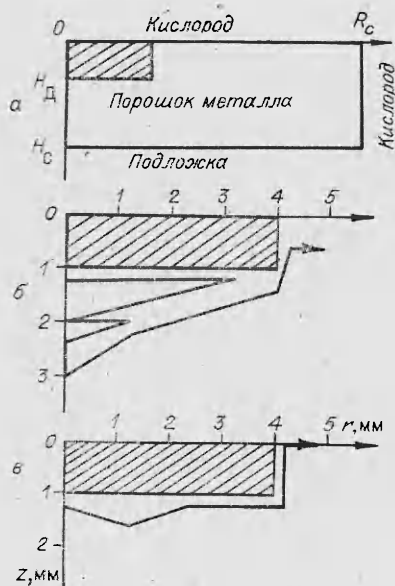


Рис. 1. Модель задачи о зажигании слоя порошка металла поверхностным очагом (а), изменение местоположения точки максимальной температуры с течением времени (направление перемещения показано стрелкой) (б) и изменение местоположения точки максимальной глубины превращения металла (в) (заштрихованная область — поджигающий диск).

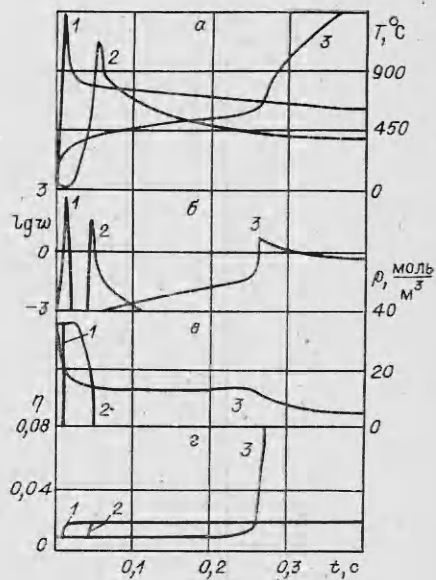


Рис. 2. Зависимости температуры (а), скорости окисления порошка металла (б), концентрации кислорода (в) и глубины превращения металла (г) от времени.

1—3 — кривые, соответствующие точкам с координатами $r=0, z=1,2; r=0, z=2,8; r=4, z=0$ соответственно.

задачи приняла следующий вид.

В начальный момент времени тепловой очаг в виде инертного, газонепроницаемого диска с радиусом основания R_d , высотой H_d и температурой T_0 внедряется на глубину H_d в слой порошка металла с радиусом R_c , высотой H_c и температурой T_n . Вследствие цилиндрической симметрии достаточно рассмотреть процесс в полуплоскости, проходящей через ось диска (рис. 1, а). Порошок находится на газонепроницаемой инертной подложке. Форма поджигающего тела такая же, как в экспериментах [7]. Очаг в виде диска позволяет исследовать зависимость критических условий зажигания от формы поджигающего тела (путем изменения отношения диаметра диска к его высоте).

При записи системы уравнений использовались следующие предположения: а) перенос газообразного окислителя в порошке происходит по закону Дарси, б) давление окислителя на границе раздела со слоем порошка считается постоянным и равным начальному, в) в ходе процесса зажигания частицы металла не плавятся, пористость слоя порошка металла и его коэффициент газопроницаемости не изменяются, температура газа внутри слоя равна температуре металлических частиц, г) температура газа вне слоя равна начальной, д) окисление частиц металла на начальных стадиях происходит по логарифмическому закону [8]. Соответствующая система уравнений имеет следующий вид:

Для порошка металла: уравнение энергии

$$[\rho_r \rho_r + \epsilon_m \rho_m (1 - \eta) + c_{ор} \rho_m \eta L] \frac{\partial T}{\partial t} = \rho_m w Q + \lambda \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] - \rho_r c_r \left(v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right);$$

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho_r}{\partial t} = - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_r v_r) - \frac{\partial}{\partial z} (\rho_r v_z) - l \rho_m w;$$

уравнение химической кинетики

$$w = \frac{d\eta}{dt} = \frac{k\rho_r^N l^{1-\delta} \eta^{-\delta}}{l^{\delta\eta}}, \quad \text{при } \eta = 1 \quad w = 0;$$

уравнение фильтрации (закон Дарси)

$$v_r = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad v_z = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z},$$

где $\mu = a + bT$; уравнение состояния окислителя

$$\rho_r = \Pi m / RT.$$

Для поджигающего диска

$$c_d \rho_d \frac{\partial T_d}{\partial t} = \lambda_d \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T_d}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_d}{\partial z^2} \right).$$

Начальные условия:

$$t = 0: T = T_n, T_d = T_0, p = p_0, \eta = \eta_0,$$

граничные условия:

$$\begin{aligned} z = 0, \quad 0 \leq r \leq R_d: \quad \lambda_d \frac{\partial T_d}{\partial z} &= \alpha_1 (T_d - T_n), \\ z = 0, \quad R_d < r \leq R_c: \quad p = p_0, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial z} &= \alpha_1 (T - T_n) + \\ &+ c_r \rho_r v_z (T - T_n); \\ 0 \leq z \leq H_d, \quad r = R_d: \quad \frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad T = T_d, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial r} &= \lambda_d \frac{\partial T_d}{\partial r}, \\ 0 \leq z \leq H_c, \quad r = R_c: \quad p = p_0, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial r} &= \alpha_1 (T - T_n) + \\ &+ c_r \rho_r v_r (T - T_n); \\ z = H_c, \quad 0 \leq r \leq R_c: \quad \frac{\partial p}{\partial z} = 0, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial z} &= -\alpha_2 (T - T_n); \\ z = H_d, \quad 0 \leq r \leq R_d: \quad \frac{\partial p}{\partial z} = 0, \quad T = T_d, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial z} &= \lambda_d \frac{\partial T_d}{\partial z}; \\ 0 \leq z \leq H_d, \quad r = 0: \quad \frac{\partial T_d}{\partial r} &= 0; \\ H_d < z \leq H_c, \quad r = 0: \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial r} &= 0. \end{aligned}$$

Здесь $c_r, c_m, c_{ок}, c_d$ — теплоемкости окислителя, металла, окисла металла, поджигающего диска; ρ_r, ρ_m, ρ_d — плотности газа, металла, диска; λ_d, λ — теплопроводности диска, слоя порошка металла; T_d, T — температура диска, порошка металла; T_0, T_n — начальная температура диска, порошка металла; η — глубина выгорания металла, которая определяется как $1 - \rho_m^T / \rho_m$, где ρ_m — исходное содержание металла в единице объема; ρ_m^T — текущее содержание металла в единице объема; w, Q — скорость и тепловой эффект химической реакции; E — энергия активации; k — предэкспоненциальный множитель; δ — коэффициент, характеризующий торможение скорости реакции нарастающим слоем продукта; N — коэффициент, характеризующий зависимость скорости реакции от концентрации окислителя в порах слоя порошка; K — коэффициент газопроницаемости слоя; μ — динамическая вязкость окислителя; m — молекулярный вес окислителя; a, b — численные коэффициенты, описывающие зависимость вязкости от температуры; p — давление окислителя; v_r, v_z — соответствующие компоненты скорости фильтрации; R — универсальная газовая постоянная; Π — пористость слоя порошка; L — количество молей окисла, образующегося при окислении 1 моля металла; l — количество молей

окислителя, расходуемое при сгорании 1 моля металла; α_1 — коэффициент теплоотдачи в газ; α_2 — коэффициент теплоотдачи в подложку.

При выборе численных значений параметров имелась в виду необходимость количественного сопоставления результатов численного решения уравнений с экспериментом [7]. Поэтому в расчетах использовались параметры, соответствующие порошку магниевотермического титана ТУ 10-0, 7-77 № 6, зажигание которого исследовалось в [7]. Средний размер частиц этого порошка $5 \cdot 10^{-5}$ м, удельная поверхность $S = 1,75$ мг/г.

Кинетические константы реакции окисления порошка титана определяли по максимальному разогреву навески порошка на установке, аналогичной используемой в [9]. Коэффициент теплопроводности слоя λ и коэффициент теплоотдачи в кислород α_1 рассчитывали по формулам, полученным в [10, 11]. Для контроля эти величины определяли и экспериментально. Коэффициент теплоотдачи α_1 измеряли в диапазоне температур 300—600°C аналогично [9], а λ — при 100—300°C путем регистрации установившегося распределения температур в порошке, заключенном в цилиндрическую капсулу из латунной сетки. На оси цилиндра хромовой нитью накаливания в кварцевом капилляре выделялась постоянная мощность, а теплоотвод с боковой поверхности цилиндра в поток кислорода происходил с известным коэффициентом теплоотдачи. Полученное удовлетворительное соответствие между экспериментальными и расчетными значениями позволило использовать приведенные формулы для определения средних значений α_1 и λ в диапазоне температур 0—1300°C.

Коэффициент теплоотдачи в подложку α_2 находим из численного решения сопряженной задачи о теплообмене между двумя дисками большого диаметра со свойствами порошка металла и подложки соответственно. Его рассчитывали по величине градиента температур в зоне, близкой к границе между пластинами и находящейся в диске с меньшим коэффициентом теплопроводности. Коэффициент газопроницаемости слоя выражается формулой Козени

$$K = \frac{\Pi^3}{2S\rho_m^2(1-\Pi)^2m}$$

Значения остальных параметров брались из справочной литературы [12, 13] средними для температурного диапазона 0—1300°C. Для сопоставления с [7] использовали следующие значения параметров, соответствующие стальному поджигающему диску и указанному порошку титана на медной подложке в атмосфере кислорода:

$$\begin{aligned} c_r &= 31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{град)}, c_m = 29 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{град)}, \\ C_{\text{ок}} &= 70 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{град)}, c_d = 0,64 \text{ Дж/(г} \cdot \text{град)}, \\ \lambda_d &= 58,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)}, \lambda = 0,2 \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)}, \\ T_n &= 300 \text{ К}, \eta_0 = 0,01, Q = 9,4 \cdot 10^5 \text{ Дж/моль}, E = 17,6 \cdot 10^4 \text{ Дж/моль}, \\ R &= 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{град)}, k = 10^8 \text{ м}^3\text{/моль} \cdot \text{с)}, \delta = 33, N = 1, \\ K &= 2,4 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2, a = 9,2 \cdot 10^{-6} \text{ кг/(м} \cdot \text{с)}, b = 4 \cdot 10^{-8} \text{ кг/(м} \cdot \text{с} \cdot \text{град)}, \\ p_0 &= 0,1 \text{ МПа}, \Pi = 0,9, l = L = 1, \alpha_1 = 42 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{град)}, \\ \alpha_2 &= 10^3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{град)}. \end{aligned} \quad (1)$$

Результаты численного счета. Задача решалась в размерном виде на ЭВМ. Цель численного счета — получить качественную картину зажигания порошков тугоплавких металлов (на примере титана), проверить используемую математическую модель процесса путем сопоставления с экспериментами [6, 7], получить зависимости температуры зажигания от формы и размеров поджигающего тела, от диаметра и высоты слоя порошка. Под температурой зажигания слоя понималась минимальная температура поджигающего диска, при которой волна горения рас-

пространяется по слою порошка металла. Следует отметить, что используемые численные данные близки по значению к параметрам распространенных титановых порошков, производимых магниевотермическим способом. Например, значения энергии активации и предэкспонента совпадают с этими параметрами для магниевотермического титана, приводимыми в [14].

При решении приведенной выше системы уравнений получено, что зажигание слоя порошка металла поверхностным очагом носит сложный, существенно неоднородный характер.

На рис. 1, б, в и 2 показана качественная картина зажигания слоя порошка металла поверхностным очагом. Конкретная форма кривых, изображенных на этих рисунках, соответствует температуре диска 700°C , близкой к температуре зажигания (680°C). На рис. 1, б, в траектории перемещения максимумов температуры и глубины выгорания приводятся по результатам счета с пространственным шагом $0,2$ мм и шагом по времени $0,001$ с. Это сделано из соображений наглядности, так как при уменьшении шагов по пространству и времени увеличивается число точек, в которых в какие-либо моменты времени находился максимум температуры или глубины выгорания металла, соответственно возрастает число линий, соединяющих эти точки, и рисунки становятся труднопринимаемыми, хотя направление перемещения максимумов не изменяется.

Вследствие цилиндрической симметрии области порошка металла, расположенные под диском вблизи его оси, прогреваются наиболее быстро, поэтому здесь наблюдается первоначальное зажигание порошка металла и быстрое увеличение температуры и скорости химической реакции (максимумы на кривых 1 на рис. 2, а, б). В результате имеющийся в порах между частицами этой зоны кислород быстро выгорает, и глубина выгорания металла η увеличивается незначительно (см. кривые 1 на рис. 2, в, г). Затем прогреваются зоны порошка под диском дальше от его оси и зоны, близкие к оси с большей координатой z , максимум температуры смещается в сторону увеличения координат r или z (см. рис. 1, б). При горении этих зон порошка наблюдается аналогичная картина (см. рис. 2, 2). Глубины выгорания невелики из-за трудностей фильтрационного подвода кислорода. Траектория смещения максимума глубины выгорания не совпадает с траекторией максимальной температуры, так как скорость окисления металла в слое зависит не только от температуры, но и от концентрации кислорода. После выхода волны горения в слой порошка, близкие к поверхности, в них наблюдается устойчивое возрастание температуры и глубины выгорания (см. рис. 2, 3).

Уменьшение плотности газа на границе раздела слоя с кислородом вызвано тепловым расширением кислорода при постоянном его давлении. Последующее снижение скорости химической реакции связано с выгоранием металла и торможением реакции слоем образующегося на частицах порошка металла окисла. При дальнейшем распространении волны горения максимум глубины выгорания движется вдоль поверхности раздела слоя и атмосферы кислорода (см. рис. 1, в), так как здесь наибольшая плотность кислорода. При этом максимум температуры перемещается на некотором расстоянии от поверхности (см. рис. 1, б). Это связано с теплоотдачей в газ от поверхности порошка и с охлаждением приповерхностных зон потоком холодного кислорода, движущегося из атмосферы в глубь слоя порошка.

Качественная картина движения кислорода в слое порошка металла дается на рис. 3. Конкретный вид кривых соответствует тем же условиям, что и рис. 1, 2, но $T_0 = 1000^{\circ}\text{C}$. При этой температуре изменения скоростей фильтрации более ярко выражены, хотя качественная картина процесса сохраняется. Видно, что вначале окислитель выходит из слоя порошка (рис. 3, 1) вследствие подъема давления в слое, вызванного нагреванием газа в порах. После выхода волны горения на поверхность направление движения газа сменяется на противоположное и теперь

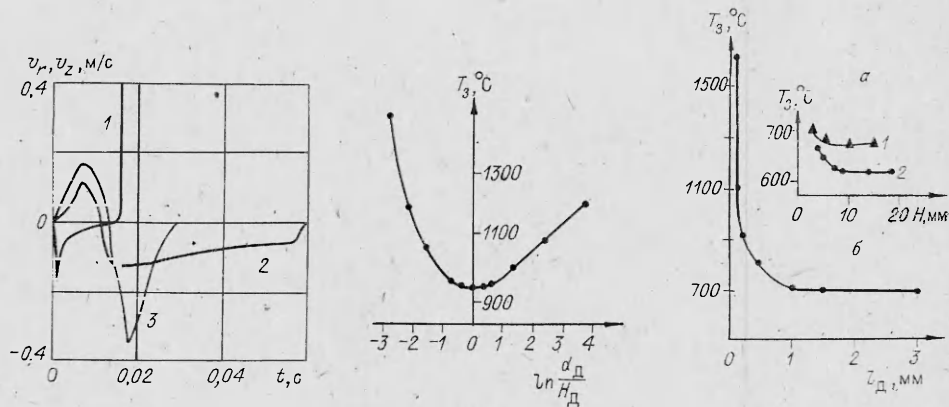


Рис. 3. Зависимость скорости фильтрации кислорода от времени.

1 — z -компонента скорости в точке (4,1; 0); 2,3 — v_r и v_z в точках (3,9; 1,2). Положительная считается скорость, совпадающая по направлению с соответствующей осью координат.

Рис. 4. Зависимость температуры зажигания от отношения диаметра к высоте диска при постоянной его массе, равной 0,1 мг (диск стальной), высота слоя 7 мм.

Рис. 5. Зависимость температуры зажигания от толщины слоя порошка титана (а) и от размера поджигающего диска (б).

а) поджигающий диск — стальной, $a_{\text{т}} = 10$ мм, $H_{\text{д}} = 3$ мм, подложка — медная пластина; 1 — эксперимент [7], 2 — численный счет; б) $l_{\text{д}} = d_{\text{д}} = H_{\text{д}}$, $H_{\text{с}} = 7$ мм.

кислород поступает из атмосферы в порошок. В узких приповерхностных слоях скорость движения газа достигает больших величин (несколько метров в секунду). В зонах порошка под диском вначале также преобладает расширение газа (рис. 3, 2, 3), затем по мере его выгорания начинается подвод окислителя из соседних зон. После воспламенения в соседних зонах порошка подвод кислорода практически прекращается и скорость фильтрации близка к нулю.

Такая картина процесса зажигания (см. рис. 1—3) наблюдается при $T_0 > T_3$ (T_3 — температура зажигания) и в диапазоне значений $0,1 < p < 1$ МПа, $d_{\text{д}}/H_{\text{д}} > 0,1$, наиболее интересных с точки зрения исследования пожароопасности слоев металлических порошков в производственных условиях. Остальные параметры изменялись в диапазоне значений, обычных для порошков титана в состоянии свободной засыпки в атмосфере кислорода и для металлических поджигающих дисков:

$$\begin{aligned} c_{\text{д}} &= 0,1 \div 0,7 \text{ Дж}/(\text{г} \cdot \text{град}), \lambda_{\text{д}} = 10 \div 400 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{град}), \\ \lambda &= 0,1 \div 0,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{град}), E = 15 \cdot 10^4 \div 20 \cdot 10^4 \text{ Дж}/\text{моль}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$d_{\text{д}} = 10^{-4} \div 10^{-2} \text{ м}, H_{\text{д}} = 10^{-4} \div 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}, k = 10^6 \div 10^9 \text{ м}^3/(\text{моль} \cdot \text{с}),$$

$$K = 0,5 \cdot 10^{-14} \div 5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2, \Pi = 0,6 \div 0,9, \alpha_1 = 10 \div 100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}),$$

$$\alpha_2 = 10 \div 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{г}).$$

Изменение этих параметров в указанных диапазонах не отражается на качественной картине процесса. Отклонения наблюдаются при $d_{\text{д}}/H_{\text{д}} < 0,1$ или $p > 1$ МПа, а также при $T < T_3$.

При $d_{\text{д}}/H_{\text{д}} < 0,1$ зажигание приповерхностных зон происходит раньше зон под диском. Это связано с более высокой теплоотдачей с поверхности (в газовую атмосферу) по сравнению с отдачей тепла из зон под диском. Однако при диаметре диска много меньше его высоты этот эффект компенсируется тем, что через боковую поверхность диска проходит основная часть теплового потока. При давлениях выше 1 МПа кислорода, содержащегося в порах между частицами слоя порошка металла, достаточно для поддержания горения, и фильтрационный подвод окислителя не играет существенной роли. Зажигание в этом случае происходит в кинетическом режиме (условия зажигания определяются

кинетическими параметрами и практически не зависят от K). При $0,1 < p < 1$ МПа невозможно однозначно определить, в каком режиме (фильтрационном или кинетическом) протекает процесс зажигания порошка металла в слое поверхностным очагом. Это вызвано тем, что в зоны порошка под диском подвод окислителя сильно затруднен и горение протекает в фильтрационном режиме. В слоях, близких к границе раздела порошка и окислителя, давление кислорода на стадии зажигания практически не изменяется и горение идет в кинетическом режиме.

Интересно проследить за явлениями, происходящими в слое порошка металла при последовательном увеличении начальной температуры поджигающего диска. При низких температурах происходит только прогрев и последующее остывание слоя, загорания нигде не наблюдается. При некоторой температуре загорается порошок под диском, однако после выгорания кислорода в порах между частицами горение затухает, а тепла диска и тепла, образовавшегося при горении части порошка под диском, не хватает на поджигание приповерхностных зон слоя порошка с дальнейшим распространением пламени. Эта температура названа температурой локального зажигания $T_{л}$. Затем, при $T_{з}$ после вспышки порошка под диском следует вспышка приповерхностных зон с последующим распространением волны горения по слою. Возможен также и случай, когда зажигаются приповерхностные зоны в непосредственной близости к диску, но дальше пламя не распространяется. Соответствующая температура обозначена $T_{л}^*$ — температура локального зажигания приповерхностных зон. В указанном диапазоне параметров разность $T_{з} - T_{л}^* \gg T_{з} - T_{л}^*$ и $T_{л}^*$ близка к $T_{з}$.

Все приведенные выше результаты относились к случаю, когда возможность распространения волны горения по слою определяется свойствами источника зажигания и не зависит от высоты и диаметра слоя порошка ($H_c > 3 \div 7$ мм, $d_c > 40$ мм). С практической точки зрения важно определить зависимость температуры зажигания от размеров слоя, а также от формы и размеров поджигающего диска. При исследовании зависимости $T_{з}(d_c)$ наиболее интересна величина диаметра слоя, при которой $T_{з}$ не зависит от d_c . Это необходимо, например, для выбора размера навески порошка в экспериментах.

В производственных условиях при сушке порошков или при образовании слоя путем оседания пыли на какой-либо поверхности, слой порошка металла имеет большой диаметр и сравнительно небольшую высоту. Для описания этого случая при численном решении системы уравнений определялся d_c , при котором на начальной стадии распространения волны горения от поджигающего диска температура боковой поверхности слоя близка к начальной, а скорость фильтрации близка к нулю.

Получено, что в диапазоне параметров (2) $T_{з}$ не зависит от диаметра слоя при $d_c > 4$ см. Влияние формы диска при постоянной его массе на температуру зажигания слоя показано на рис. 4. Качественный вид этой кривой сохраняется в диапазоне параметров (2). Повышение температуры зажигания с ростом $\left| \ln \frac{d_{л}}{H_{л}} \right|$ объясняется увеличением поверхности диска (в результате его тепловой запас расходуется на нагрев большего количества порошка и он прогревается до более низких температур). Одновременно растет доля прогреваемого диском порошка, к которому затруднен фильтрационный подвод кислорода (вследствие удаленности от границы раздела слоя порошка и кислорода).

Для описания возможного загорания порошка в производственных условиях на стадии хранения (большая высота слоя) определялась высота слоя, при дальнейшем увеличении которой минимальные температура и масса диска, необходимые для зажигания слоя, не изменяются. Изображенные на рис. 5, а зависимости соответствуют расчету с начальными данными (1) и эксперименту [7]. Видно, что наблюдается хорошее

совпадении экспериментальных и расчетных значений T_z , а также высоты слоя порошка (примерно 7 мм), начиная с которой температура зажигания перестает зависеть от высоты слоя. При этом материал подложки не влияет на T_z . Для небольших дисков ($d_d = H_d = 10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-4}$ м) T_z перестает зависеть от его высоты при $H_c > 3$ мм. Это значение хорошо соответствует данным [6], где при зажигании порошка титана других марок потоком стальных искр получено, что при $H_c > 2$ мм результаты зажигания не зависели от толщины слоя. Из сопоставления значений H_c , при которых T_z перестает зависеть от H_c , полученных для дисков разной высоты, следует, что удобнее пользоваться не общей высотой слоя, а расстоянием от нижнего основания диска до подложки $H_c - H_d$. Это понятно из физических соображений, так как влияние подложки сказывается посредством тепловода от диска в подложку через слой порошка размером $H_c - H_d$.

В [6] температура искр изменялась за счет применения разных марок стали, при трении которой об абразив получаются искры. Из этих данных следует, что критическая температура зажигания электролитического титана потоком искр сталей при $H_c = 2$ мм составляет 1100—1200°C. Гидридокальциевый титан при той же высоте слоя воспламеняется при температуре менее 1100°C. К сожалению, в [6] не приводятся данные о размере искр, образующихся при трении стального образца абразивом. В [15] отмечается, что обычно размеры образующихся при трении стальных искр лежат в диапазоне от нескольких микрон до 0,1—0,5 мм. Таким образом, наблюдается соответствие по величине температуры зажигания между результатами [6] и численным счетом, представленными на рис. 5, 6 (для дисков с $d_d = H_d \leq 0,5$ мм значения T_z при $H_c = 2 \div 3$ и 7 мм совпадают). Полученное на примере слоя порошка титана хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных свидетельствует о применимости предложенной модели для описания процесса зажигания поверхностным очагом слоев порошков тугоплавких металлов, окисляющихся по гетерогенному механизму.

Поступила в редакцию 3/IV 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Мержанов, В. В. Барзыкин, В. Т. Гонтковская. Докл. АН СССР, 1963, 148, 2, 380.
2. А. Г. Мержанов. Comb. Flame, 1967, 11, 3, 201.
3. У. И. Гольдшлегер, К. В. Прибыткова, В. В. Барзыкин. ФГВ, 1973, 9, 1, 119.
4. У. И. Гольдшлегер, В. В. Барзыкин, Т. П. Ивлева. ФГВ, 1973, 9, 5, 733.
5. Е. В. Черненко, П. М. Кришеник, Т. П. Ивлева и др. ФГВ, 1984, 20, 1, 4.
6. В. А. Олишевец, В. М. Селиванова, В. А. Невгод.— В кн.: Предупреждение внезапных воспламенений и взрывов газодисперсных систем. Киев: Наукова думка, 1975.
7. Л. Ф. Афанасьева, Е. В. Черненко, В. И. Розенбанд.— В кн.: Проблемы технологического горения. Черноголовка, 1981.
8. К. Хауффе. Реакция в твердых телах и на их поверхности. М.: ИЛ, 1962.
9. Е. В. Черненко, В. Г. Грива, В. И. Розенбанд. ФГВ, 1982, 18, 5, 20.
10. Г. Н. Дульнев, Ю. П. Заричняк. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974.
11. В. Х. Мак-Адамс. Теплопередача. М.: Metallurgizdat, 1961.
12. Т. Рид, Д. Праусниц, Т. Шервуд. Свойства газов и жидкостей. Л.: Химия, 1982.
13. Краткий справочник физико-химических величин/Под. ред. К. П. Мищенко, А. А. Равдель. М.—Л.: Химия, 1965.
14. А. С. Бай, Д. И. Лайнер и др. Окисление титана и его сплавов. М.: Metallurgia, 1970.
15. А. И. Розловский, И. С. Ройзен и др.— В кн.: Охрана химических предприятий от пожаров и взрывов. НИИТЭХИМ, 1961.