

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ПОРИСТОЙ ПЛАСТИНЫ МЕТАЛЛА В ГАЗЕ

Е. В. Черненко, Т. А. Ивлева, В. И. Розенбанд, В. В. Барзыкин

(Черноголовка)

Воспламенение пористых металлических образцов в газе — сложное макрокинетическое явление, включающее в себя несколько одновременно протекающих элементарных процессов (химическое взаимодействие реагентов, транспорт газообразного окислителя в зону реакции, теплопередача), взаимодействие которых определяет характерные черты явления в целом. В отличие от хорошо изученного теоретически фильтрационного горения пористых металлических образцов в газе [1, 2] процесс их воспламенения мало исследован. В частности, не рассмотрен вопрос о влиянии давления и состава окислительной среды, роли фильтрации и т. д. Изучение этих вопросов и является целью данной работы.

При теоретическом изучении закономерностей воспламенения пористых металлических образцов в газообразном окислителе рассматривалась следующая модель. Пористая пластина металла толщиной L с начальной температурой T_{10} приведена в контакт с газообразным окислителем, имеющим температуру T_{20} . В порах содержится некоторое начальное количество окислителя, пропорциональное внешнему давлению. В процессе реакции, идущей на поверхности зерен металла, окислитель вырабатывается, что приводит к появлению массового потока окислителя из газа в пластину за счет фильтрации или диффузии (при наличии смеси газов в объеме). На поверхности $x=L$ существуют адиабатические условия по температуре и давлению (массовая скорость потока окислителя равна нулю). На поверхности раздела пластины и газа ($x=0$) заданы условия сопряженного теплообмена, т. е. равенство температур, потоков тепла и массы. Вследствие симметричности эта задача аналогична задаче о воспламенении пористой пластины металла толщиной $2L$, приведенной в контакт с газообразным окислителем. Математическое описание фильтрационного воспламенения сводится к системе дифференциальных уравнений переноса тепла и вещества в газе и в пористой среде с нелинейными источниками, отражающими экзотермическое превращение реагентов:

Пластина ($0 \leq x \leq L$):

$$\frac{d\eta}{dt} = W = \frac{\bar{k}_n \exp(-E/RT)}{\eta^n} p_{11}^N, \quad \eta \geq 1, \quad W = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(\rho_1 v_\Phi) - \mu \rho_m^0 W, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho_1 d_1)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho_1 d_1 v_\Phi)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_1 \rho_1 \frac{\partial d_1}{\partial x} \right) - \mu \rho_m^0 W, \quad (3)$$

$$\left\{ \rho_1 c_1 \left[d_1 + \frac{c_2}{c_1} (1 - d_1) \right] + c_m \rho_m^0 \left(1 + \frac{\mu c_1}{c_m} \eta \right) \right\} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \\ = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} - \rho_1 c_1 \left[d_1 + \frac{c_2}{c_1} (1 - d_1) \right] v_\Phi \frac{\partial T_1}{\partial x} + \rho_m^0 Q W, \quad (4)$$

$$p_{11} = \rho_1 / m_1 \cdot RT_1 d_1, \quad (5)$$

$$p_1 = \rho_1 RT_1 / m_1 \cdot [d_1 + m_1 / m_2 \cdot (1 - d_1)], \quad (6)$$

$$v_\Phi = -k_\Phi \cdot \partial p_1 / \partial x, \quad (7)$$

$$p_{21} = p_1 - p_{11}, \quad (8)$$

$$D_1 = D_{01} \rho_1^{v_1} T_1^{v_2}. \quad (9)$$

Газ ($-\infty < x < 0$):

$$\partial \rho_2 / \partial t = -\partial / \partial x \cdot (\rho_2 v) \quad (10)$$

$$\partial (\rho_2 d_2) / \partial t = -\partial (\rho_2 d_2 v) / \partial x + \partial / \partial x \cdot (D_2 \rho_2 \cdot \partial d_2 / \partial x) \quad (11)$$

$$\rho_2 c_1 \left[d_2 + \frac{c_2}{c_1} (1 - d_2) \right] \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) - \rho_2 c_1 \left[d_2 + \frac{c_2}{c_1} (1 - d_2) \right] v \frac{\partial T_2}{\partial x}, \quad (12)$$

$$p_{12} = \frac{\rho_2 R T_2}{m_1} d_2, \quad (13)$$

$$\rho_2 = \frac{p_2 m_2}{R T_2 \left[d_2 + \frac{m_1}{m_2} (1 - d_2) \right]}, \quad (14)$$

$$p_{12} + p_{22} = p_2 = \text{const}, \quad (15)$$

$$D_2 = D_{02} \rho_2^{\nu_1} T_2^{\nu_2}. \quad (16)$$

Краевые условия:

при $x = 0$

$$T_1 = T_2, \lambda_1 \cdot \partial T_1 / \partial x = \lambda_2 \cdot \partial T_2 / \partial x, d_1 = d_2, D_1 \cdot \partial d_1 / \partial x = \\ = D_2 \cdot \partial d_2 / \partial x, v_\phi = v/k;$$

$$p_1 = p_2;$$

при $x = L$

$$\partial T_1 / \partial x = 0, \partial p_1 / \partial x = 0, \partial d_1 / \partial x = 0;$$

при $x = -\infty$

$$T_2 = T_{20}, d_2 = d_{20};$$

при $t = 0$

$$T_1 = T_{10}, T_2 = T_{20}, p_1 = p_{10} = p_2, d_1 = d_{10}, d_2 = d_{20}, \eta = \eta_0.$$

Здесь η — глубина выгорания, определяемая как $1 - \frac{\rho_m}{\rho_m^0}$, где ρ_m — те-

кущее, а ρ_m^0 — исходное содержание металла в единице объема; R — универсальная газовая постоянная; k_0 — предэкспонент; E — энергия активации; T_1, T_2 — температура пластины и газа; p_{11}, p_{12} — парциальное давление окислителя в пластине и газе; ρ_1, ρ_2 — плотность газа в пластине и газе; d_1, d_2 — относительная массовая концентрация окислителя в пластине и газе; λ_1, λ_2 — теплопроводность пластины и газа; c_m, c_1, c_2 — теплоемкость металла, окислителя и инерта при постоянном давлении соответственно; p_1, p_2 — общее давление в пластине и газе; p_{21}, p_{22} — давление инертного газа в пластине и газе; n — численный коэффициент, характеризующий зависимость скорости реакции от глубины выгорания (при $n = 0$ закон окисления линейный, при $n = 1$ — параболический, при $n = 2$ — кубический); N — численный коэффициент, характеризующий зависимость скорости реакции от давления окислителя в порах; μ_0 — стехиометрический коэффициент по окислителю; Q — тепловой эффект реакции на 1 г металла; v_ϕ — скорость фильтрации; v — скорость потока газа; k_ϕ — коэффициент фильтрации; k — пористость; m_1, m_2 — молекулярные веса окислителя и инерта; D_1, D_2 — коэффициенты бинарной диффузии системы окислитель — инертный газ в пористой пластине и в газе; ν_1, ν_2 — численные коэффициенты, характеризующие зависимость коэффициента диффузии от плотности и температуры газа.

При записи уравнений предполагалось, что исходный металл и про-

дукт реакции — тугоплавкие соединения, которые плавятся в ходе процесса, размеры пор макроскопические, фильтрация осуществляется по закону Дарси, изменением пористости в ходе реакции пренебрегалось. Изменение коэффициента фильтрации вследствие изменения вязкости газа с температурой не рассматривалось, так как решалась задача о воспламенении пластины и весь процесс протекал в относительно узком диапазоне температур. Для упрощения рассмотрения задачи в уравнениях

(1)–(16) не учтена свободная конвекция. Кроме того, как показано в [10], влияние свободной конвекции в данных условиях несущественно.

В данной работе рассматривался параболический закон окисления ($n = 1$) как наиболее общий для реакции металлов с газами [3], значения остальных численных коэффициентов: $N = 1$; $\nu_1 = -1$; $\nu_2 = 3/2$ [4]. Основные кинетические и теплофизические параметры выбирались соответствующими случаю окисления циркония в кислороде. Ввиду многопараметричности системы уравнений задача численно решалась на ЭВМ в размерном виде. Представляло интерес рассмотреть закономерности процесса зажигания в зависимости от свойств пластины и среды газообразного окислителя.

При расчете воспламенения в среде чистого окислителя (массопередача обусловлена фильтрацией) выбирались следующие начальные данные: $d_{10} = d_{20} = 1$, $L = 1$ см, $\rho_m^0 = 4,4 \cdot 10^{-2}$ моль/см³, $\eta_0 = 0,01$; $T_{10} = 300$ К, $E = 30$ ккал/моль, $k_0 = 10^{10}$ см²/(кал · с), $Q = 192$ ккал/моль, $\lambda_1 = 2 \cdot 10^{-2}$ кал/(см · с · град), $\lambda_2 = 1,5 \cdot 10^{-4}$ кал/(см · с · град), $c_1 = 7$ кал/(моль · град), $c_m = 6$ кал/(моль · град); $k_\Phi = k_r/\mu = 6,85$ см⁵/(кал · с), где $k_r = 3 \cdot 10^{-2}$ Д [5] — коэффициент газопроницаемости, $\mu = 1,84 \cdot 10^{-7}$ г/(см · с) — вязкость газа. В результате счета получены зависимости времени задержки зажигания t_* пористой пластины металла от температуры и давления окислителя (табл. 1). Начальная температура пластины значительно ниже температуры газа. Видно, что с ростом T_{20} при постоянном давлении t_* монотонно уменьшается. С увеличением давления окислителя в области низких и средних давлений при постоянной T_{20} t_* монотонно уменьшается. Возрастание t_* при больших T_{20} и давлениях, когда плотности металла и газа соизмеримы, связано с влиянием находящегося в порах газа на теплофизические свойства пластины. Увеличение средней плотности образца приводит к уменьшению его начальной температуры на поверхности раздела пластина — газ [6] и, как следствие, к более длительному времени прогрева пластины и увеличению t_* . При низких T_{20} температура на поверхности раздела в случае высоких давлений уменьшается незначительно, и некоторое увеличение времени прогрева не может компенсировать уменьшение времени реакции, обусловленное большим количеством окислителя в порах, вследствие чего t_* падает с ростом давления во всем диапазоне изменения давления.

Из приведенных в табл. 1 данных видно также, что при $p \approx 60$ атм время задержки зажигания начинает слабо зависеть от давления окислителя. Это обусловлено тем, что при этих давлениях содержащегося в порах пластины окислителя уже может оказаться достаточно для самовоспламенения пластины. Действительно, оценки показывают, что, например, для случая циркония адиабатические разогревы, обусловленные реакцией с содержащимся в порах окислителем, равны (при пористости $\approx 30\%$) 120, 350, 600, 1200° С для давлений 10, 30, 50 и 100 атм соот-

Т а б л и ц а 1
Зависимость t_* (в с) от температуры и давления

T_{20} , К	p , атм				
	1	30	60	100	1000
600	3630	1565	1005	757	627
700	2717	1086	701	550	540
850	1973	748	508	414	443
1000	1547	593	412	345	405
1200	1196	480	360	291	371

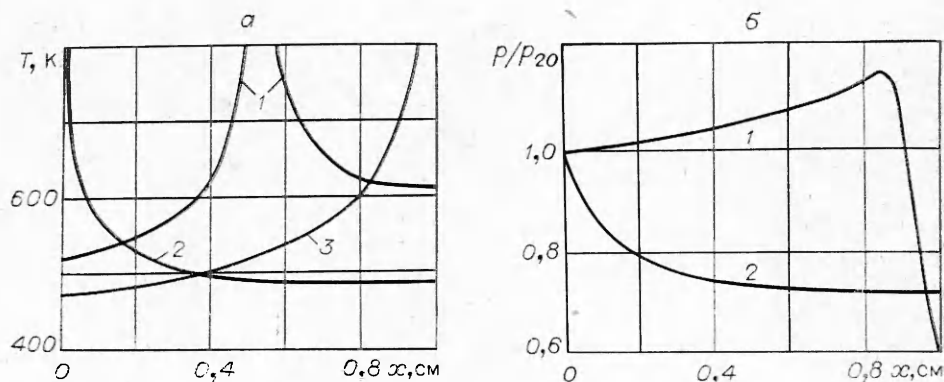


Рис. 1. Профили температур и давлений в пористой пластине металла в момент воспламенения при $T_{20}=850$ К, $L=1$ см.
 а) профили температур; p_2 равно 22 (1), 5 (2) и 60 атм (3); б) профили давлений; p_2 равно 60 (1) и 5 атм (2).

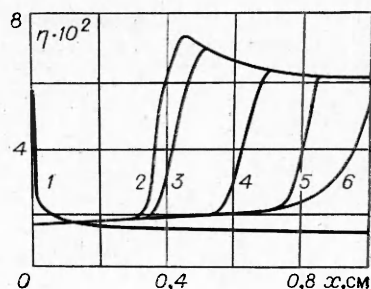
ветственно. Кроме того, возможны локальные разогревы до температур, значительно больших адиабатических вследствие фильтрации в зону разогрева окислителя из более холодных слоев пластины.

В результате счета обнаружено, что в зависимости от давления воспламенение может происходить в двух режимах — самовоспламенения и зажигания. Эти режимы отличаются друг от друга местом начала процесса (области достижения наиболее высоких температур) и соответственно видом профилей температур и давлений в пластине. Переход от самовоспламенения к зажиганию происходит с уменьшением давления. На рис. 1, а, б приведены профили температур и давлений в пластине в момент воспламенения при $T_{20}=850$ К и различных давлениях газа в окружающей среде p_{20} ($x=0$ — передняя поверхность, на которой существуют сопряженные условия теплообмена с газом, $x=1$ см — задняя поверхность с условиями адиабатичности). Благодаря хорошей теплопроводности профили температур на стадии разогрева выравниваются, а затем при развитии химической реакции при большом давлении имеет место самовоспламенение с максимумом температуры на заднем конце, при низком давлении — зажигание с максимумом температуры на переднем конце пластины.

Аналогичный вид имеет профиль давления в пластине. При малом давлении газ в порах вырабатывается, не приводя к заметному изменению профиля температуры, и реакция продолжает идти за счет окислителя, поступающего извне. В ходе реакции окислитель вырабатывается в приповерхностных слоях пластины, не доходя до задней поверхности. Наиболее благоприятные условия создаются на переднем торце, где и происходит зажигание пластины. При большом же давлении и достаточном количестве окислителя в порах из-за наиболее слабого теплоотвода на заднем торце происходит тепловой взрыв, т. е. самовоспламенение пористой пластины металла. Для того, чтобы самовоспламенение произошло, как видно из рис. 1, а, достаточно относительно небольшого давления окислителя (~ 25 атм). Полученные результаты аналогичны данным работы [7], в которой рассматривался переход от самовоспламенения к зажиганию для взрывчатых веществ при простейших теплокинетических условиях (постоянство температуры на поверхности, реакция пулевого порядка).

На рис. 2 приведены профили выгорания в пористой пластине металла в различные моменты времени при зажигании ($p=5$ атм) и самовоспламенении ($p=60$ атм). При зажигании выгорание во всей пластине достигает одной небольшой величины, к этому моменту окислителя в порах пластины почти не остается и начинается интенсивное выго-

Рис. 2. Профили глубины выгорания в пластине в различные моменты времени при $T_{20}=850$ К, $L=1$ см. 1, 6 — в момент воспламенения при $p_2=5$ и 60 атм соответственно; 3—5 — в последующие моменты времени при $p_2=60$ атм.



вание металла на поверхности за счет окислителя, поступающего извне. При самовоспламенении срыв по температуре происходит на заднем торце и по пластине начинает двигаться фронт горения в режиме неполного превращения, так как окислителя в порах пластины недостаточно для полного выгорания металла.

Для выяснения влияния фильтрации на процесс воспламенения вычислено изменение i_*/i'_* при $T_{20}=850$ К в зависимости от давления, где t_* — время задержки зажигания при приведенном выше значении k_Φ , а t'_* — при значении k_Φ на три порядка меньше, т. е. при затруднительном подводе окислителя. Результаты вычислений приведены ниже.

$p, \text{ атм}$	t_*/t'_*	$p, \text{ атм}$	t_*/t'_*
0,5	0,71	5,0	1,00
1,0	0,83	20	1,01
2,0	0,98	60	1,03

Оказалось, что сильное влияние фильтрации на t_* проявляется только в области малых давлений, при больших же давлениях с увеличением k_Φ наблюдается даже незначительный рост t_* .

Рассмотрение поведения скорости газа на поверхности раздела пластина — газ показывает, что при низких давлениях сначала существует направленный из пластины поток окислителя, связанный с тепловым расширением находящегося в порах газа. По мере развития реакции и при выработывании газа, находящегося внутри пор, в пластине создается разрежение и появляется обратный поток окислителя в пластину из объема. При этом, чем больше k_Φ , тем интенсивнее фильтрация извне и тем меньше t_*/t'_* . При больших давлениях в течение всего процесса, до самого воспламенения пластины поток газа направлен из пластины в объем. По мере развития реакции, с ростом температуры, вследствие более интенсивного теплового расширения газа в порах поток становится более интенсивным. Таким образом, в течение всего процесса существует «экранирование» пластины от внешнего окислителя и фильтрация извне не играет роли. Некоторое увеличение i_*/i'_* при больших давлениях связано в этом случае с более интенсивным тепло- и массоотводом из пластины при больших значениях k_Φ .

Непосредственно с вопросом о роли фильтрации связан вопрос о зависимости воспламенения пластины металла от ее пористости, так как изменение пористости образца приводит к существенному изменению его газопроницаемости, а следовательно, и величины k_Φ . При рассмотрении влияния плотности образцов в поставленной задаче варьировались в соответствии друг с другом следующие величины: $\rho_M^0 = (4 \div 6) \cdot 10^{-2}$ моль/см³, что соответствует изменению относительной плотности в пределах 0,6—0,9, коэффициент пористости $k = 0,4 \div 0,1$, коэффициент фильтрации $k_\Phi = 25,8 \div 0,179$. При расчете зависимости k_Φ от пористости использовалась формула Козени: $k_\Phi = k^3/2\mu \cdot S_{уд}^2 (\rho_M^0)^2$ [8], где $S_{уд}$ — удельная поверхность. Рассчитанные по этой формуле величины k_Φ хорошо совпали с экспериментально определенными значениями [5].

Таблица 2

Зависимость t_* (в с) от плотности, температуры и давления

Относительная плотность	$T_{20}=850 \text{ К, } p, \text{ атм}$			$T_{20}=700 \text{ К, } p=50 \text{ атм}$	Относительная плотность	$T_{20}=850 \text{ К, } p, \text{ атм}$			$T_{20}=700 \text{ К, } p=50 \text{ атм}$
	1	15	50			1	15	50	
0,6	1700	860	420	580	0,80	2360	1390	790	1100
0,65	1840	970	480	680	0,85	2600	1640	980	1350
0,7	2000	1080	560	790	0,90	2940	1990	1280	1750
0,75	2170	1230	660	920					

В предположении протекания реакции на поверхности отдельных зерен металла скорость реакции пропорциональна суммарной поверхности зерен S_{Σ} и концентрации окислителя в пластине c_0 . Так как $S_{\Sigma} \sim S_{\text{уд}} \cdot \rho_{\text{м}}^0 \sim (1 - k)$, а $c_0 \sim k$, то $k_0 \sim k(1 - k)$, и максимум скорости реакции окисления соответствует $k = 0,5$, т. е. пористости металла большей, чем рассматривалось. Вследствие этого, как видно из табл. 2, время задержки зажигания увеличивается с ростом относительной плотности пластины. При этом с уменьшением температуры газа при постоянном давлении наблюдается более резкое возрастание t_* с увеличением относительной плотности пластины. Чем больше давление газа, тем при большей относительной плотности становится заметным влияние плотности на t_* , что связано с большим количеством находящегося в порах окислителя и уменьшением роли внешней фильтрации.

Результаты расчетов показывают, что с увеличением η_0 — начального выгорания t_* непрерывно возрастает, причем скорость возрастания t_* из-за параболического закона окисления уменьшается с ростом η_0 . Время задержки зажигания непрерывно возрастает также с увеличением толщины пластины L , что связано с увеличением времени прогрева пластины за счет теплоприхода из газа. Вследствие уменьшения времени нагрева из-за более интенсивного теплоприхода от более сжатого газа зависимость t_* от L с увеличением давления уменьшается.

При расчете влияния состава окислительной среды на закономерности воспламенения, значения $d_{10} = d_{20}$ изменялись в интервале $1 \div 0,05$, что соответствует разбавлению среды инертным газом до 95%. Теплофизические параметры инертного газа брались соответствующими параметрам аргона. На рис. 3 приведена зависимость t_* от относительной концентрации кислорода в газовой среде. Видно, что в отличие от горения [2], когда даже незначительное разбавление окислителя инертным газом приводит к резкому снижению скорости процесса и прекращению

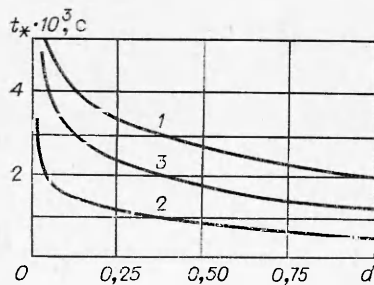


Рис. 3. Зависимость t_* от относительной концентрации окислителя в объеме.

1, 2 — $T_{20}=850 \text{ К, } p_2=1$ и 50 атм соответственно; 3 — $T_{20}=600 \text{ К, } p_2=50 \text{ атм}$.

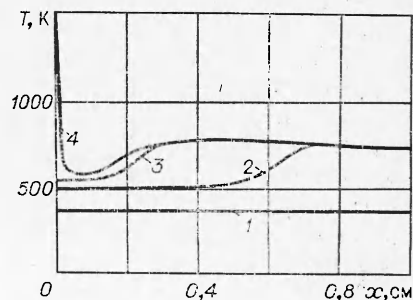


Рис. 4. Профили температур в пористой пластине металла при $T_{20}=600 \text{ К, } p_2=50 \text{ атм, } d_0=0,5$ в последующие моменты времени.

горения, воспламенение возможно при сильном разбавлении окислителя инертным газом. Это обусловлено более низкими по сравнению с температурами горения температурами воспламенения и поверхностным характером самого процесса. Наиболее резкая зависимость t_* от d_0 наблюдается в области низких d_0 . В этих условиях из-за уже имеющегося в порах и подведенного фильтрацией извне инертного газа общее давление газа в порах практически равно внешнему и процесс переходит из фильтрационного режима в диффузионный, характеризующийся низкой скоростью массопереноса. Чем выше давление газа, тем при более низких d_0 начинается заметное влияние разбавления, что связано с наличием большого количества собственного окислителя, находящегося в порах.

Критическая относительная концентрация окислителя (наименьшая относительная концентрация окислителя, при которой возможно воспламенение пластины) с уменьшением температуры несколько возрастает и слабо зависит от давления. Это является следствием того, что при диффузионном переносе диффузионный поток пропорционален $D\rho$ и, так как $D \sim \rho^{-1} \cdot T^{3/2}$, скорость подвода окислителя диффузией не зависит от давления газа и уменьшается с падением температуры. При сильном разбавлении окислителя возможно воспламенение пластины с двух торцов.

На рис. 4 показаны профили температуры в пластине в последующие моменты времени. Воспламенение произошло на заднем торце и до того, как фронт горения дойдет до переднего торца, происходит воспламенение на переднем торце пластины, после чего два фронта горения начинают двигаться навстречу друг другу. Такой характер процесса связан с выработыванием окислителя в порах по мере продвижения фронта горения при относительно невысоких разогревах, обусловленных низкой начальной концентрацией окислителя. За счет диффузии окислитель поступает извне и наибольшая его концентрация будет на переднем торце пластины, где и происходит вторичное воспламенение уже прогретой за счет теплоотдачи от первого фронта области пластины.

Приведенные выше теоретические результаты позволяют сделать вывод о том, что при некоторых небольших давлениях находящегося в порах соответственного окислителя достаточно для воспламенения образца. В этом случае нет необходимости в подводе окислителя фильтрацией извне, и с учетом достаточно высокой теплопроводности пористого металлического образца можно считать, что на всей внутренней поверхности пластины (поверхности отдельных зерен) реакция идет при однородных тепловых и концентрационных условиях.

В работе [9] для непористой пластины и в [10] для пористой пластины в условиях, когда скорость фильтрации много больше скорости реакции и фильтрация не лимитирует процесс воспламенения, получено критическое условие воспламенения для аналогичной теплокинетической постановки (параболический закон окисления, условия адиабатичности на одном конце пластины и сопряженный теплообмен на границе с газом). Легко показать, что в случае достаточного количества внутреннего окислителя и при отсутствии фильтрации критическое условие воспламенения может быть получено аналогичным образом и будет иметь вид

$$T_*^4 e^{E/RT_*} = \frac{\gamma_* E^2 Q^2 (k_0 p_{20}) (L \cdot \rho_M^0)^2 z^2}{2R^2 (\lambda \rho c)}, \quad (17)$$

где T_* — критическая начальная температура (начальные температуры пластины и газа считаются равными, при $T_0 \geq T_*$ всегда имеет место воспламенение); λ , ρ , c — теплофизические параметры газа; z — количество окисла, образующегося на 1 г металла; $\gamma_* = 1,85$ — критический параметр, определяющий условия воспламенения (при $\gamma > \gamma_*$ имеет место воспламенение, при $\gamma < \gamma_*$ — стационарный режим). Поскольку $\rho \sim p_{20}$, из (17) сразу вытекает, что при достаточно больших давлениях, когда применима рассматриваемая модель, величина T_* не зависит от давления.

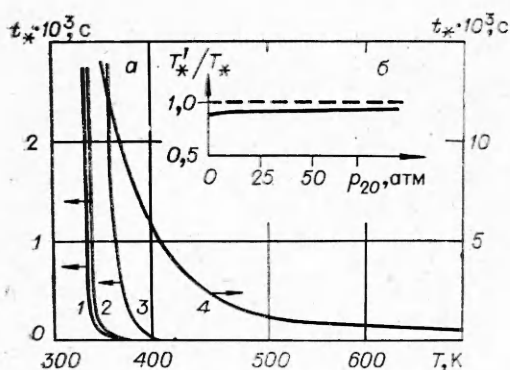


Рис. 5. Зависимость t_* от T_{20} (а) и T_*'/T_* от p_{20} (б).
 p , атм: 1 — 100, 2 — 50, 3 — 1, 4 — 100
 $(T_{10}=300 \text{ К})$.

Этот результат подтверждается данными численного счета (рис. 5, а) и эксперимента [11]. Для однородности температурного профиля в пластине необходимо, чтобы $t_r \ll t_p$, где $t_r = L^2/\chi_r$ — время тепловой релаксации пластины (χ_r — коэффициент температуропроводности), а $t_p = e^{E/RT'}/(k_0 p_{20})$ — характерное время химической реакции при некоторой масштабной температуре T' . За T' в качестве верхней оценки можно взять величину максимальной адиабатической температуры, достигаемой за счет реакции металла с окислителем, находящимся в порах.

Тогда, например, для пластины циркония с $\rho_m^0 = 4 \text{ г/см}^3$, величина L , при которой можно пренебречь температурными градиентами в ходе реакции, будет равна 0,1, 0,2 и 1 см для $p = 30, 25$ и 20 кг/см^2 соответственно. На рис. 5, б, построена зависимость отношения T_*'/T_* , полученной по формуле (17), к T_* , полученной из численного решения задачи для различных p_{20} (определенных по срыву кривой $t_*(T)$ на рис. 5, а). Видно, что это отношение достаточно близко к единице (в пределах 15%) во всем диапазоне давлений. При низких давлениях совпадение T_*' с T_* несколько хуже, но и здесь они достаточно близки, что обусловлено слабым влиянием фильтрации при достаточно длительных процессах в околокритической области, когда окислитель успевает подводиться извне. Хотя формула (17) получена в предположении равенства начальных температур газа и пластины (гипергольное воспламенение), она применима и в случае $T_{20} \neq T_{10}$, так как величина T_* слабо зависит от начального перепада температур между пластиной и газом (см. рис. 5, а) [5].

Приведенные выше теоретические результаты, касающиеся закономерностей воспламенения пористой пластины металла, качественно хорошо согласуются с экспериментальными результатами, полученными при изучении воспламенения образцов циркония в кислороде под давлением [11], что подтверждает справедливость рассматриваемой теоретической модели.

Поступила в редакцию
 27/XI 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. А. П. Алдушин, А. Г. Мержанов, Б. И. Хайкип. Докл. АН СССР, 1974, 245, 3.
2. А. П. Алдушин, Б. С. Сеплярский. Теория фильтрационного горения пористых металлических образцов. Препринт. Черноголовка, ОИХФ АН СССР, 1977.
3. П. Кофстад. Высокотемпературное окисление металлов. М., Мир, 1969.
4. Н. Б. Варгафтик. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1963.
5. В. И. Розенбанд, В. А. Чичев, Л. Ф. Афанасьева. ФГВ, 1976, 12, 1.
6. А. В. Лыков. Теория теплопроводности. М., Высшая школа, 1967.
7. А. Г. Мержанов, В. Г. Абрамов, В. Т. Гонтковская. Докл. АН СССР, 1963, 148, 1.
8. А. Ф. Беляев, В. И. Боболев и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М., Наука, 1973.
9. В. И. Розенбанд. ФГВ, 1974, 10, 2.
10. В. И. Розенбанд, Л. Ф. Афанасьева. Порошковая металлургия, 1978, 6.
11. Е. В. Черненко, В. И. Розенбанд, В. В. Барзыкин. ФГВ, 1979, 15, 4.