

УДК 536.46

Калинчак В.В., Черненко А.С., Рачинский Б.Е.

*Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова
кафедра теплофизики*

Особенности взаимовлияния высокотемпературных процессов окисления и испарения частиц летучих металлов

В рамках модели приведенной пленки с учетом стефановского течения проведен анализ кинетики окисления и испарения частицы летучего металла (в качестве предмета исследования взят магний). Впервые получены аналитические выражения для скоростей испарения и окисления частицы летучего металла, позволяющие провести анализ влияния размера и температуры на скорости испарения и окисления частиц летучих металлов, определить поверхностные концентрации газообразных компонентов и их профили в пределах приведенной пленки. Определена роль диффузионно-кинетического отношения в процессах окисления и испарения.

Описание тепломассообмена, определяющего воспламенение частиц летучих металлов, базируется на механизме реакции окисления, который чрезвычайно сложен и зависит от испарения и окисления металла. Отличительной чертой летучих металлов является небольшие температуры плавления по срав-

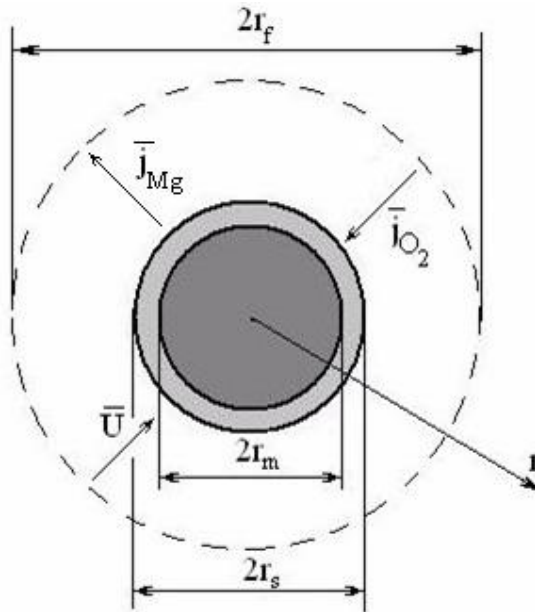


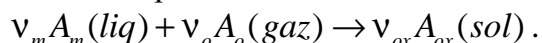
Рис. 1 Металлическая частица, покрытая слоем пористого окисла толщиной h , где $2r_s = 2r_m + 2h$, $2r_s = d$, $2r_m = d_m$.

нению с температурами плавления окислов. Окислы летучих металлов являются пористыми и не способны изолировать поверхность металла от окисления и не препятствовать испарению металла.

Известно значительное количество теоретических и экспериментальных работ [1 – 4], посвященных исследованию воспламенения частиц летучих металлов, в которых предлагался ряд моделей воспламенения, основанных на предположении об определяющей роли гетерогенной поверхностной реакции в обеспечении срыва теплового равновесия без совместного учета стефановского течения, диффузионно-кинетического отношения и испарения летучего металла.

В данной работе, основываясь на этих представлениях, проведем анализ процессов массообмена и скоростей окисления и испарения на примере частицы магния с учетом стефановского течения, возникающего при поверхностных химических и фазовых превращениях вещества, при различных температурах и диаметрах частицы.

Примем, что летучий металл расходуется (рис.1) в экзотермической химической реакции с образованием пористого оксида:



Критерий Пиллинга-Бедворса в этом случае $P_b < 1$. Это означает, что окисел не оказывает диффузионного сопротивления движения кислорода к зоне реакции.

Из уравнения химической реакции следует, что изменение массы исходных компонентов и продуктов реакции связаны:

$$-\frac{1}{v_o M_o} \frac{\partial m_o}{\partial t} = -\frac{1}{v_m M_m} \frac{\partial m_m}{\partial t} = \frac{1}{v_{ox} M_{ox}} \frac{\partial m_{ox}}{\partial t} . \quad (2)$$

Скорость гетерогенной химической реакции по окислителю определим как скорость изменения массы окислителя, рассчитанную на единицу реакционной поверхности частицы. Предположим, что химическая реакция протекает на внутренней поверхности оксидного слоя частицы и скорость химической реакции по окислителю W_{os} прямо пропорциональна концентрации окислителя:

$$W_{os} = -\frac{1}{4\pi r_m^2} \frac{\partial m_o}{\partial t} = k \rho_{gs} C_{os} , \quad (3)$$

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad \rho_{gs} = \rho_{g0} \frac{T_0}{T} .$$

Используя (2) и (3) определим скорость химической реакции по металлу W_m и оксиду W_{ox} , соответственно:

$$W_m = -\frac{\rho_m}{4\pi r_m^2} \frac{\partial V_m}{\partial t} = \frac{v_m M_m}{v_o M_o} k \rho_{gs} C_{os} , \quad W_{ox} = \frac{\rho_{ox}}{4\pi r_m^2} \frac{\partial V_{ox}}{\partial t} = \frac{v_{ox} M_{ox}}{v_o M_o} k \rho_{gs} C_{os} , \quad (4)$$

$$V_m = \frac{4}{3} \pi r_m^3 , \quad V_{ox} = \frac{4}{3} \pi \left((r_m + h)^3 - r_m^3 \right) .$$

Из (4) следует, что отношение объема образующегося оксида металла к объему металла, израсходованного на образование оксида, равно известному критерию Пиллинга-Бедвордса:

$$-\frac{\partial V_{ox}}{\partial V_m} = \frac{v_{ox} M_{ox} \rho_m}{v_m M_m \rho_{ox}} = P_b.$$

A_o, A_m, A_{ox} – окислитель, металл и окисел соответственно; v_o, v_m, v_{ox} – стехиометрические коэффициенты; M_o, M_m, M_{ox} – молярные массы окислителя, металла и соединения оксидного слоя, кг/моль; m_m, m_{ox}, m_o – массы металла, оксида, окислителя, ρ_m, ρ_{ox} – плотности металла и оксида, ρ_{gs} – плотность газа (воздуха) на поверхности частицы; h – толщина оксидного слоя; r_m – радиус металлического ядра, r_s – радиус частицы с окислом; C_{os} – относительная массовая концентрация кислорода на поверхности частицы; k – константа химической реакции; E – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; T – температура частицы; T_{gs} – температура газа на поверхности частицы.

Уменьшение радиуса металлического ядра с течением времени, определяется общей скоростью израсходования металла в процессах окисления и испарения. Используя (4), получим дифференциальное уравнение для уменьшения радиуса металлического ядра:

$$\frac{\partial r_m}{\partial t} = - \left(\Omega_m \frac{\rho_{gs}}{\rho_m} k C_{os} + \frac{W_{ev}}{\rho_m} \right), \quad r_m(t=0) = r_{m,b}, \quad (5)$$

$$W_{ev} = - \frac{1}{4\pi r_m^2} \left(\frac{\partial m_m}{\partial t} \right)_{ev}.$$

Здесь величину W_{ev} назовем скоростью испарения, как скорость изменения массы металла за счет испарения с единицы поверхности металлического ядра.

Увеличение толщины оксидного слоя определяется скоростью нарастания оксида в процессе окисления, которая в свою очередь зависит от скорости уменьшения радиуса металлического ядра. Используя (4) и (6), получим:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \Omega_{ox} \frac{\rho_{gs}}{\rho_{ox}} k C_{os} \left(\frac{r_m^2}{(r_m + h)^2} + \frac{1}{P_B} \left(1 - \frac{r_m^2}{(r_m + h)^2} \right) \right) + \frac{W_{ev}}{\rho_m} \left(1 - \frac{r_m^2}{(r_m + h)^2} \right), \quad (6)$$

$$h(t=0) = h_b.$$

$\Omega_m = \frac{v_m M_m}{v_o M_o}$, $\Omega_{ox} = \frac{v_{ox} M_{ox}}{v_o M_o}$ – массовые стехиометрические коэффициенты; r_{mb} ,

h_b – начальные размер металлического ядра частицы и толщина оксида. Для относительно тонких пленок $h \ll r_m$ уравнение (6) значительно упрощается

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \Omega_{ox} \frac{\rho_{gs}}{\rho_{ox}} k C_{os}, \quad h(t=0) = h_b.$$

Влияние естественной и вынужденной конвекции на теплообмен частицы учитывается приведенной пленкой, относительная толщина которой уменьшается с ростом относительной скорости движения газовой фазы

$$\delta = \frac{r_f - r_s}{r_s} = \frac{2}{Nu - 2}. \quad (7)$$

Критерий Нуссельта Nu является функцией от чисел Рейнольдса Re и Прандтля Pr :

$$Nu = 2 + 0.6Re^{1/2} Pr^{1/3},$$

$$Re = \frac{\omega d}{\nu_g} + \sqrt{0.5Gr}, \quad Gr = \frac{gd^3 |T - T_g|}{\nu_g^2 T_0}, \quad \nu_g = \frac{\lambda_g}{c_g \rho_g} Pr, \quad c_g = c_{g0} + 0.18(T_* - T_0),$$

$$\rho_g = \rho_{g0} \frac{T_0}{T_*}, \quad \lambda_g = \lambda_{g0} \left(\frac{T_*}{T_0} \right)^n, \quad D_g = \frac{\lambda_g}{c_g \rho_g}, \quad T_* = \frac{T_{gs} + T_{g\infty}}{2},$$

ω – относительная скорость движения, м/с; ν_g – кинематическая вязкость окружающей среды, м²/с, c_g – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К), ρ_g , λ_g , D_g – плотность, коэффициенты теплопроводности газа и диффузии окислителя в газе; T_* – характерная температура, при которой определяются свойства газа.

Сила трения, действующая при движении на частицу со стороны газа, зависит от появления или исчезновения газовых масс на ее поверхности. Если газовые массы появляются на поверхности частицы в результате парообразования, то сила трения уменьшается. В случае же окисления летучих металлов газообразный окислитель, соединяясь с металлом, превращается в пористый твердый оксид, т.е. происходит уменьшение массы газообразного компонента и как следствие возникновение стефановского течения, которое способствует переносу окислителя к поверхности частицы и увеличивает коэффициент лобового сопротивления частицы. При падении расплавленной частицы летучего металла скорость движения относительно газа определяется согласно уравнению:

$$m \frac{d\omega}{dt} = mg - \frac{1}{2} C_D \left(1 + \frac{U_s \rho_{gs}}{\beta \rho_g} \right) \pi (r_m + h)^2 \rho_g \omega^2, \quad \omega(t=0) = \omega_b,$$

$$m = \frac{4}{3} \pi \left[\rho_m r_m^3 + \rho_{ox} \left((r_m + h)^3 - r_m^3 \right) \right], \quad C_D = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{1}{6} Re^{2/3} \right),$$

где U_s – скорость стефановского течения, знак «+» перед которой указывает на ее направление к поверхности частицы.

Для определения скорости стефановского течения необходимо совместно рассмотреть массоперенос всех газообразных компонентов в газе. При высоких температурах за счет испарения металла в окружающем газе содержатся три газообразных компонента: азот, кислород и пары металла, коэффициенты диффузии которых практически равны

$$D_O = D_N = D_m = D_g.$$

Скорость стефановского течения такова, что в любой точке газообразной среды плотность потока инертного компонента равна нулю и общее давление и концентрация остаются постоянными:

$$P = \sum p_i = const \quad \text{и} \quad C_N + C_O + C_m = 1.$$

Плотности массовых потоков газообразных компонентов на поверхности частицы определим из равенства плотностей массовых потоков компонентов и их скоростей потребления или возникновения:

$$j_N = -D_N \rho_g \left. \frac{\partial C_N}{\partial r} \right|_{r_s} - U \rho_g C_N \Big|_{r_s} = 0. \quad (8)$$

$$j_O = +D_O \rho_g \left. \frac{\partial C_O}{\partial r} \right|_{r_s} + U \rho_g C_O \Big|_{r_s} = W_{Os}. \quad (9)$$

$$j_m = -D_m \rho_g \left. \frac{\partial C_m}{\partial r} \right|_{r_s} - U \rho_g C_m \Big|_{r_s} = W_{ev} \quad (10)$$

Используя условия $D_O = D_N = D_m = D_g$ и $C_N + C_O + C_m = 1$, из (8) – (10) получим, что скорость стефановского течения определяется скоростями окисления и испарения магния:

$$j_O - j_m - j_N = U_s \rho_{gs} = W_{Os} - W_{ev} = \frac{W_{ms}}{\Omega_m} - W_{ev}. \quad (11)$$

Для определения концентраций газообразных компонентов на поверхности металлического ядра и скорости испарения и чтобы, таким образом, окончательно определить скорость стефановского течения, уравнения диффузии и неразрывности для газовой фазы представим в виде:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D \rho_g \frac{\partial C_i}{\partial r} \right) = -r^2 U \rho_g \frac{\partial C_i}{\partial r}, \quad (12)$$

$$C_i(r = r_s) = C_{is}, \quad C_i(r = r_f) = C_{i\infty} \\ r^2 U \rho_g = r_s^2 U_s \rho_{gs}. \quad (13)$$

Профили концентраций газовых компонентов находятся из решения (12) и (13) в виде зависимости безразмерной концентрации i -го компонента газовой смеси от радиальной координаты:

$$\theta = \frac{C_i - C_{is}}{C_{i\infty} - C_{is}} = \frac{\exp\left(\frac{Nu}{2} \xi\right) - \exp\left(\frac{Nu}{2} \xi_s\right)}{\exp\left(\frac{Nu}{2} \xi_f\right) - \exp\left(\frac{Nu}{2} \xi_s\right)}, \quad (14)$$

$$\xi = \frac{U_s \rho_{gs} r_s}{\beta \rho_g r}, \quad \xi_s = \frac{U_s \rho_{gs}}{\beta \rho_g}, \quad \beta = \frac{D_g Nu}{2 r_s}.$$

С учетом (9) и (11) безразмерную скорость стефановского течения представим в виде:

$$\xi_s = \frac{W_{O,s} - W_{ev}}{\beta \rho_g} = Se C_{Os} - \frac{W_{ev}}{\beta \rho_g}, \quad Se = \frac{k \rho_{gs}}{\beta \rho_g}, \quad (15)$$

где Se – число Семенова, или диффузионно-кинетическое отношение.

Подставляя (14) в (8), получим уравнение для определения поверхностной концентрации азота:

$$j_{Ns} = \beta \rho_g \xi_s \frac{C_{Ns} - C_{N\infty} \exp \xi_s}{\exp \xi_s - 1} = 0,$$

решение которого представим в виде

$$C_{Ns} = C_{N\infty} \exp \xi_s. \quad (16)$$

Выражение (16) при выполнении условия постоянства общей концентрации $C_O + C_N + C_m = 1$ и отсутствия паров вдали от частицы сведем к выражению для определения концентрации окислителя (кислорода) на поверхности частицы:

$$C_{Os} = 1 - C_{ms} - (1 - C_{O\infty}) \exp \xi_s. \quad (17)$$

Для определения скорости испарения магния подставим радиальную зависимость концентрации магния (14) в выражения для массового потока (10), что позволит найти выражение для скорости испарения магния с поверхности частицы:

$$W_{ev} = \beta \rho_g C_{ms} \frac{\xi_s}{\exp \xi_s - 1}. \quad (18)$$

Концентрацию паров магния на поверхности частицы определим согласно уравнению Клаузиуса-Клапейрона:

$$C_{ms} = \frac{M_m}{M_g} \exp \left(\frac{L}{R} \left(\frac{1}{T_{boil}} - \frac{1}{T} \right) \right).$$

Система уравнений (15), (17) и (18) позволяет определить скорость стефановского течения ξ_s , концентрацию кислорода на поверхности C_{Os} и скорость испарения W_{ev} , как функции диаметра и температуры частицы, которые входят в Se и C_{ms} .

Рассмотрим определенное приближение для нахождения концентрации кислорода и скорости испарения. Для аналитического получения решения в (18), положим $\exp \xi_s = 1 + \xi_s + \xi_s^2/2$, что справедливо для $\xi_s \ll 1$. В результате, используя (15) и приближение $(1 + \xi_s/2)^{-1} \approx 1 - \xi_s/2$ получим, что

$$W_{ev} = \beta \rho_g C_{ms} \left(1 - \frac{1}{2} Se C_{Os} \right) f_m, \quad (19)$$

где $f_m = 1 + \frac{1}{2} C_{ms}$.

Раскладывая экспоненту в (17) в ряд и ограничиваясь только двумя членами, получим, используя (15):

$$\begin{aligned} C_{Os} &= 1 - C_{ms} - (1 - C_{O\infty}) \left(1 + Se C_{Os} - \frac{W_{ev}}{\beta \rho_g} \right) = \\ &= 1 - C_{ms} - (1 - C_{O\infty}) \left(1 + Se C_{Os} - C_{ms} f_m + \frac{1}{2} C_{ms} f_m Se C_{Os} \right). \end{aligned}$$

Отсюда нетрудно определить концентрацию окислителя на поверхности частицы:

$$C_{Os} = \frac{C_{O\infty}(1 - C_{ms}f_m) - C_{ms}(1 - f_m)}{1 + Se(1 - C_{O\infty})\left(1 + \frac{1}{2}C_{ms}f_m\right)} = \frac{C_{O\infty}(1 - C_{ms} - 0.5C_{ms}^2) + 0.5C_{ms}^2}{1 + Se(1 - C_{O\infty})(1 + 0.5(C_{ms} + 0.5C_{ms}^2))},$$

и, следовательно, скорость окисления металла W_m :

$$W_{ms} = \Omega_m k \rho_{gs} \frac{C_{O\infty}(1 - C_{ms}f_m) - C_{ms}(1 - f_m)}{1 + Se(1 - C_{O\infty})\left(1 + \frac{1}{2}C_{ms}f_m\right)}. \quad (20)$$

В качестве первого приближения, т.к. $0.5C_{ms}^2 \ll 1$, выражение для концентрации кислорода C_{Os} и скорости окисления летучего металла (20) примет вид:

$$C_{Os} = \frac{C_{O\infty}(1 - C_{ms})}{1 + Se(1 - C_{O\infty})}, \quad W_{ms} = \Omega_m k \rho_{gs} \frac{C_{O\infty}(1 - C_{ms})}{1 + Se(1 - C_{O\infty})}.$$

Без учета испарения металла скорость стефановского течения определяется только скоростью окисления металла ($\xi_s = W_{ox}/\beta\rho_g = SeC_{Os}$). В этом случае выражение (17) примет вид

$$1 - C_{Os} = (1 - C_{O\infty}) \exp \xi_s.$$

После разложения экспоненты получим выражения для концентрации кислорода на поверхности и скорости окисления металла без учета испарения летучего металла:

$$C_{Os} = C_{O\infty} \frac{1}{1 + Se(1 - C_{O\infty})}, \quad W_{ms0} = \Omega_m k \rho_{gs} C_{O\infty} \frac{1}{1 + Se(1 - C_{O\infty})}. \quad (21)$$

В случае отсутствия окисления скорость стефановского течения определяется только лишь скоростью испарения летучего металла ($\xi_s = -W_{ev}/\beta\rho_g$). В этом случае решение (17) с учетом (9) в пределах приведенной пленки приведет к классическому выражению для скорости испарения:

$$W_{ev0} = \beta\rho_g \ln\left(\frac{1}{1 - C_{ms}}\right)$$

или при малости концентрации паров металла вблизи поверхности частицы

$$W_{ev0} \approx \beta\rho_g C_{ms} \left(1 + \frac{C_{ms}}{2}\right). \quad (22)$$

В таблицах 1,2 приведены значения скорости окисления и скорости испарения магния, рассчитанные по полученным формулам (19) – (22) при различных диаметрах и температурах частицы. Их анализ свидетельствует о существенном взаимовлиянии процессов испарения и окисления на поверхности расплавленной частицы летучего металла. Присутствие кислорода и паров магния вблизи поверхности частицы уменьшает скорость испарения и скорость химической реакции, соответственно.

Расчет приводился при следующих данных: $v_o = 1$, $v_m = 2$, $E = 189500$ Дж/моль, $L = 132720$ Дж/моль, $k_0 = 0.86 \cdot 10^9$ м/с, $R = 8.31$ Дж/(моль·К), $\rho_{g0} = 1.293$ кг/м³, $c_{g0} = 1005$ Дж/(кг·К), $\lambda_{g0} = 0.024$ Вт/(м·К), $T_0 = 273$ К, $T_{g\infty} = 293$ К, $T_{boil} = 1381$ К, $C_{O\infty} = 0.23$, $Nu = 2$.

Таблица 1. Скорость окисления частицы магния при учете и неучете испарения при $C_{O_\infty} = 0.23$.

T, К	d = 30 мкм		d = 300 мкм		d = 3000 мкм	
	$W_{ms}, 10^{-3}$ кг/(м ² с)	$W_{ms0}, 10^{-3}$ кг/(м ² с)	$W_{ms}, 10^{-3}$ кг/(м ² с)	$W_{ms0}, 10^{-3}$ кг/(м ² с)	$W_{ms}, 10^{-3}$ кг/(м ² с)	$W_{ms0}, 10^{-3}$ кг/(м ² с)
923	2.132	2.138	2.100	2.105	1.821	1.827
1023	20.96	21.27	18.27	18.55	7.991	8.144
1123	122.5	129.8	65.30	70.03	11.51	12.50
1223	393.2	466.5	95.07	118.44	11.08	14.00

Таблица 2. Скорость испарения частицы магния при учете и неучете окисления при $C_{O_\infty} = 0.23$.

T, К	d = 30 мкм		d = 300 мкм		d = 3000 мкм	
	$W_{ev}, 10^{-3}$ кг/(м ² с)	$W_{ev0}, 10^{-3}$ кг/(м ² с)	$W_{ev}, 10^{-3}$ кг/(м ² с)	$W_{ev0}, 10^{-3}$ кг/(м ² с)	$W_{ev}, 10^{-3}$ кг/(м ² с)	$W_{ev0}, 10^{-3}$ кг/(м ² с)
923	7.391	7.393	0.737	0.739	0.072	0.074
1023	42.37	42.47	4.16	4.25	0.386	0.425
1123	180.2	182.6	16.96	18.26	1.60	1.83
1223	621.4	648.1	58.37	64.81	5.73	6.48

Таблица 3. Скорость стефановского течения и диффузионно-кинетическое отношение при различных температурах и диаметрах частицы и $C_{O_\infty} = 0.23$.

T, К	d = 30 мкм		d = 300 мкм		d = 3000 мкм	
	ξ_{sf}	Se	ξ_{sf}	Se	ξ_{sf}	Se
923	$-2.2 \cdot 10^{-3}$	$2.2 \cdot 10^{-3}$	$2.4 \cdot 10^{-3}$	0.022	0.04	0.22
1023	$-9.9 \cdot 10^{-3}$	0.021	0.027	0.215	0.17	2.15
1123	-0.033	0.136	0.088	1.36	0.204	13.6
1223	-0.118	0.63	0.016	6.30	0.056	63.0

Таблица 4. Концентрации кислорода и паров металла на поверхности частицы при различных температурах и диаметрах частицы и $C_{O_\infty} = 0.23$.

T, К	d = 30 мкм		d = 300 мкм		d = 3000 мкм	
	$C_{Os}, \%$	$C_{ms}, \%$	$C_{Os}, \%$	$C_{ms}, \%$	$C_{Os}, \%$	$C_{ms}, \%$
923	22.90	0.27	22.55	0.27	19.56	0.27
1023	22.30	1.46	19.43	1.46	8.50	1.46
1123	19.66	5.88	10.48	5.88	1.85	5.88
1223	13.06	18.81	3.16	18.81	0.37	18.81

Для данных температур и диаметров частиц величина $\xi_s \ll 1$ (табл. 3), что позволяет использовать при дальнейшем анализе выражения (19) – (22).

Эффект взаимовлияния процессов окисления и испарения более существенный при значительной величине диффузионно-кинетического отношения, заметно наблюдаемый при высоких температурах для частиц больших размеров (рис. 2а, 2б). Уже при значениях диффузионно-кинетического отношения выше $Se > 0.2$ (табл. 3) значения скоростей испарения и окисления за счет окисления и испарения, соответственно, уменьшаются более чем на 1%. При этом существенно возрастает скорость стефановского течения ($\xi_s > 0.01$) (табл.3). На по-

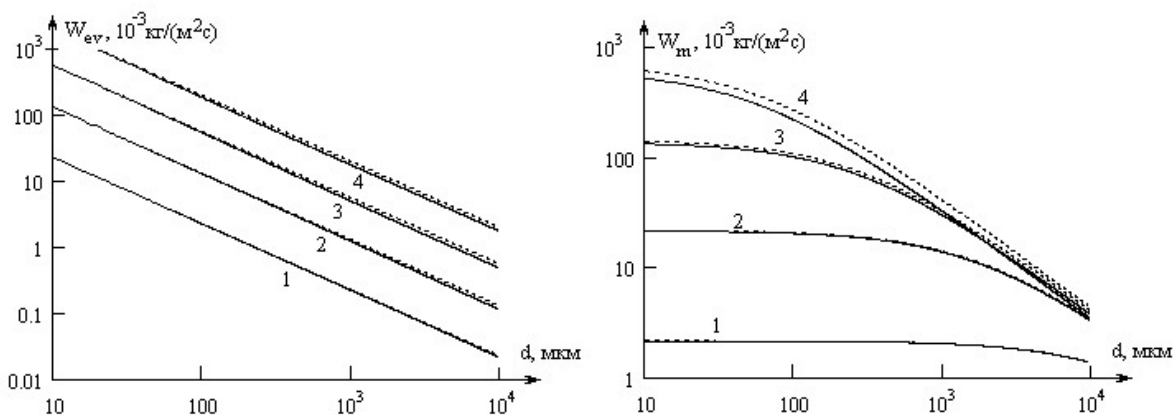


Рис. 2 Зависимости скорости испарения (а) и окисления (б) летучего металла от размера частицы с учетом (сплошная, по (19) и (20)) и без учета (пунктир, по (22) и (21)), соответственно, окисления и испарения при различных температурах частицы.

1) $T = 923 \text{ K}$, 2) $T = 1023 \text{ K}$, 3) $T = 1123 \text{ K}$, 4) $T = 1223 \text{ K}$.

верхности частицы заметно уменьшается концентрация кислорода и становится существенной концентрация паров летучих металлов (табл. 4).

Величина диффузионно-кинетического отношения определяет кинетический или диффузионный режим окисления частицы летучего металла. При низких температурах и малых диаметрах, когда $Se \ll 1$ (кинетический режим), увеличение диаметра частицы в 10 раз (от 10 до 100 мкм) слабо влияет на скорость окисления. По мере увеличения температуры и диаметра режим протекания реакции окисления смещается с кинетической в диффузионную область.

В зависимости от размера частиц стефановское течение направлено по-разному. Для больших частиц (больше 300 мкм) скорость химической реакции по кислороду, протекающая в диффузионной области, превышает скорость испарения магния. Стефановское течение направлено к поверхности частицы, приносит дополнительные массы кислорода и мешает парам магния диффундировать от поверхности. Оно способствует окислению летучего металла и препятствует его испарению.

Для малых частиц (порядка 30 мкм) химическая реакция протекает в кинетической области и ее скорость меньше скорости испарения. В этом случае стефановское течение направлено от поверхности, относит от поверхности газообразные массы, в том числе пары магния и кислород. Поэтому оно и замедляет процесс окисления летучего металла и препятствует его испарению.

Таким образом, основываясь на определяющей роли поверхностной реакции в окислении магния, получены выражения, позволившие проанализировать взаимовлияние процессов окисления и испарения магния. Показано, что при температурах частицы выше температуры плавления магния стефановское течение направлено либо от поверхности для мелких (порядка 30 мкм) либо к поверхности частицы для крупных (выше 300 мкм) частиц.

Литература:

1. Авдеев К.А., Флоров Ф.С., Борисов А.А., Флоров С.М. Модифицированная модель воспламенения магния // Физика горения и взрыва. – 2008. – Т.27. №6. – С. 47-53.
2. Федоров А.В., Шульгин А.В. Сопряженная математическая модель воспламенения образцов магния // Физика горения и взрыва. – 2006. – Т.42, №3. – С.57-63.
3. Гостеев Ю.А., Федоров А.В. Воспламенение частица магния (распределенная модель) // Физика горения и взрыва. – 1996. – Т.32, № 4. – С.5 - 11.
4. Хайкин Б.И., Блошенко В.Н., Мержанов А.Г. О воспламенении частиц металлов // Физика горения и взрыва. – 1970. – Т.6, №4. – С.474– 484.
5. Калинин В.В., Орловская С.Г., Калинин А.И., Дубинский А.В. Влияние стефановского потока на характеристики гетерогенного горения углеродной частицы в воздухе.// Инженерно-физический журнал. – 1997. – Т.70, №1. – С.146-152.

Калинчук В.В., Черненко О.С., Рачинський Б.Є.

Особенности взаимодействия высокотемпературных процессов окисления и испарения частинок летучих металлов

АНОТАЦІЯ

В рамках моделі приведеної плівки з урахуванням стефанівської течії проведений аналіз кінетики окислення і випаровування частинки летючого металу (на прикладі магнію). Вперше отримані аналітичні вирази для швидкостей випаровування і окислення частинки летючого металу, що дозволяють провести аналіз впливу розміру і температури на швидкості випаровування і окислення частинок летючих металів, визначити поверхневі концентрації газоподібних компонентів і їх профілі в межах приведеної плівки. Визначена роль дифузійно-кінетичного відношення в процесах окислення і випаровування.

Kalinchak V.V., Chernenko A.S., Rachinsky B.E.

Volatile metals' particles high temperate oxidation and evaporation processes interaction singularities

SUMMARY

In terms of reduced film model the volatile metal particle (magnesium as a subject of investigation) oxidation kinetics and evaporation analysis was carried out with Stefan flow account. For the first time evaporation and oxidation rates were obtained analytically, this enabled the analysis of size and temperature influence on volatile metal particle evaporation and oxidation rates, evaluation of gaseous components surface concentrations and their profiles along reduced film. Diffusion-kinetic ratio effect on oxidation and evaporation processes was determined.