

В.В. КАЛИНЧАК ¹⁾
А.С. ЧЕРНЕНКО ¹⁾
А.Н. СОФРОНКОВ ²⁾
Б.Е. РАЧИНСКИЙ ¹⁾

¹⁾ Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова,
Украина,

²⁾ университет Ополе,
Польша,

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.

VOLATILE METALS' PARTICLES HIGH TEMPERATURE OXIDATION AND EVAPORATION PROCESSES INTERACTION SINGULARITIES

Within the bound of given film model taking into consideration Stefan flow, the volatile metal's particle (magnesium as a subject of investigation) oxidation kinetics and evaporation analysis was carried out. For the first time analytical expressions of evaporation and oxidation rates were obtained, this makes it possible to carry out the analysis of size and temperature influence at volatile metal particles' evaporation and oxidation rate, to evaluate surface concentration of gaseous components and their profiles within the limits of given film. Diffusion-kinetic ratio role in oxidation and evaporation processes was determined.

Отличительной чертой летучих металлов является небольшие температуры плавления по сравнению 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 [1–6], 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, проведен 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:

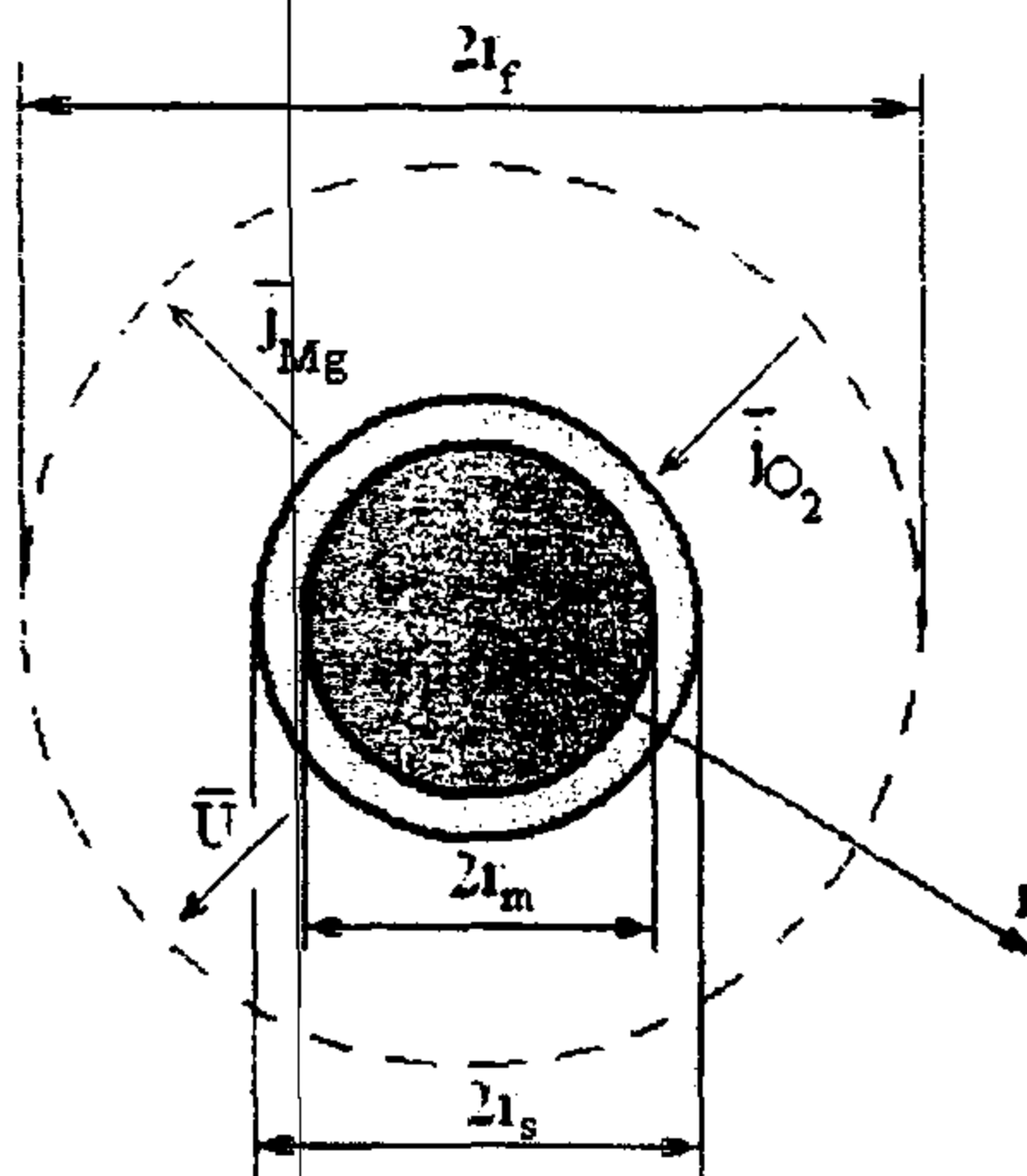


Рис. 1 Металлическая частица, покрытая слоем пористого оксида толщиной h , где $2r_s = 2r_m + 2h$, $2r_s = d$, $2r_m = d_m$

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 (1) 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:

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

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad \rho_{gs} = \rho_{gs^0} \frac{T_0}{T}.$$

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 окисла металла к объему металла, израсходованного на образование окисла, равно известному критерию Пиллинга-Бедвордса:

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

Здесь 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 (5), получим:

$$\frac{\partial r_m}{\partial t} = -\left(\Omega_m \frac{\rho_{gs}}{\rho_m} k C_{os} + \frac{W_{ev}}{\rho_m} \right), \quad r_m(t=0) = r_{m,b}, \quad (6)$$

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

Здесь $\Omega_m = \frac{v_m M_m}{v_o M_o}$, $\Omega_{ox} = \frac{v_{ox} M_{ox}}{v_o M_o}$ – массовые стехиометрические

коэффициенты; r_{mb} , h_b – начальные размер металлического ядра частицы и толщина окисла. 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 тепломассообмен 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 :

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

$$Re = \frac{\omega d}{v_g} + \sqrt{0.5 Gr}, \quad Gr = \frac{g d^3 |T - T_g|}{v_g^2 T_0}, \quad v_g = \frac{\lambda_g}{c_g \rho_g},$$

$$c_g = c_{g0} + 0.18(T_* - T_0),$$

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

ω – относительная скорость движения, м/с;

v_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.

Для определения скорости стефановского течения необходимо совместно рассмотреть массоперенос всех газообразных компонентов в газе [7]. 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:

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

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

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

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:

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

Для определения концентраций газообразных компонентов на поверхности металлического ядра и скорости испарения и, 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:

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

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

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

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

где Se – число Семенова, или диффузионно-кинетическое отношение. Подставляя (14) в (8), получим уравнение для определения поверхностной концентрации азота:

$$j_{N_s} = \beta \rho_g \xi_s \frac{C_{N_s} - C_{N_\infty} \exp(-\xi_s)}{1 - \exp(-\xi_s)} = 0,$$

решение которого представим в виде

$$C_{N_s} = C_{N_\infty} \exp(-\xi_s) \quad (16)$$

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:

$$C_{O_s} = 1 - C_{m_s} - (1 - C_{O_\infty}) \exp(-\xi_s). \quad (17)$$

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:

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

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

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

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

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

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

где $f_m = 1 + \frac{1}{2} C_{m_s}$.

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

$$C_{O_s} = 1 - C_{ms} - (1 - C_{O_\infty}) \left(1 + Se C_{O_s} - \frac{W_{ev}}{\beta \rho_g} \right) =$$

$$= 1 - C_{ms} - (1 - C_{O_\infty}) \left(1 + Se C_{O_s} - C_{ms} f_m + \frac{1}{2} C_{ms} f_m Se C_{O_s} \right).$$

Отсюда нетрудно определить концентрацию окислителя на поверхности частицы:

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

и, следовательно, скорость окисления металла W_{ms} :

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

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

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

Без учета испарения металла скорость стефановского течения определяется только скоростью окисления металла ($\xi_s = -W_{ox}/\beta \rho_g = -Se C_{O_s}$).

В этом случае выражение (17) примет вид

$$1 - C_{O_s} = (1 - C_{O_\infty}) \exp(-\xi_s).$$

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

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

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 магнезия, 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: $v_0 = 1$, $v_m = 2$, $E = 189500$ Дж/моль, $L = 132720$ Дж/моль, $k_0 = 0.86 \cdot 10^9$ м/с, $R = 8.31$ Дж/(моль·К), $\rho_{g0} = 293$ кг/м³, $c_{g0} = 1005$ Дж/(кг·К), $\lambda_{g0} = 0.024$ Вт/(м·К), $T_0 = 273$ К, $T_{g\infty} = 293$ К, $T_{boil} = 923$ К, $C_{O\infty} = 0.23$, $Nu=2$, [5].

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 значительных значениях диффузионно-кинетического отношения. 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 поверхности 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 30 до 300 мкм) слабо оказывает влияние на скорость окисления. По мере увеличения температуры и диаметра протекание реакции окисления смещается из кинетической в диффузионную область.

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 не учете окисления при $C_{O_{\infty}} = 0.23$.

Т, 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 $C_{O_{\infty}} = 0.23$.

Т, 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 $C_{O_{\infty}} = 0.23$.

Т, К	d = 30 мкм		d = 300 мкм		d = 3000 мкм	
	$C_{O_s}, \%$	$C_{ms}, \%$	$C_{O_s}, \%$	$C_{ms}, \%$	$C_{O_s}, \%$	$C_{ms}, \%$
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

В зависимости от размера частиц стефановское течение направлено поразному. Для больших частиц (больше 300 мкм) скорость химической реакции по кислороду превышает скорость испарения магния. Стефановское течения 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) скорость химической реакции 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) и 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 магнезия* // ФГВ. – 2008. – Т.27, №6. – С. 47-53.
- [2]. Фёдоров А.В., Тропин Д.А. *Математическая модель воспламенения магнезия в расширенном диапазоне параметров* // Физика горения и взрыва. – 2008. – № 5. – С. 65-7
- [3]. Федоров А.В., Шульгин А.В. *Сопряженная математическая модель воспламенения образцов магнезия* // ФГВ. – 2006. – Т.42, №3. – С.57-63.
- [4]. Гостеев Ю.А., Федоров А.В. *Воспламенение частица магнезия (распределенная модель)* // ФГВ. – 1996. – Т.32, № 4. – С.5 - 1
- [5]. Хайкин Б.И., Блошенко В.Н., Мержанов А.Г. *О воспламенении частиц металлов* // ФГВ. – 1970. – Т.6, №4. – С.474– 484.
- [6]. Ежовский Г.К., Молчанова А.С., Озеров Е.С. *Воспламенение и горение частиц магнезия* // "Горение и взрыв"(Материалы Третьего всесоюзного симпозиума по горению и взрыву). – М., изд-во "Наука". – 1972. – С. 234–240.
- [7]. Калинин В.В., Орловская С.Г., Калинин А.И., Дубинский А.В. *Влияние стефановского потока на характеристики гетерогенного горения углеродной частицы в воздухе.* // ИФЖ. – 1997. – Т.70, №1. – С.146-152.