

УДК 546.42

ISSN 1729-4428

С.Г. Орловська

Високотемпературний тепломасообмін металевих частинок з урахуванням стефанівського потоку

Одеський національний університет ім.І.І.Мечникова, Одеса, Україна, вул. Дворянська, 2,
65082, (048) 723-62-27, svetor@rambler.ru

Проведено фізико-математичне моделювання процесів високотемпературного тепломасообміну і окислення металевих частинок з урахуванням випару оксиду і стефанівської течії на поверхні. Отримано аналітичні вирази для швидкості стефанівської течії, теплових та масових потоків на поверхні частинки. В результаті проведених розрахунків виявлено закономірності впливу стефанівського потоку на основні характеристики високотемпературного тепломасообміну металеві частинки з газом.

Ключові слова: високотемпературний тепломасообмін, стефанівська течія, оксиди металів, вольфрам, молібден, запалення, потухання.

Стаття поступила до редакції 08.07.2013; прийнята до друку 15.09.2013.

Вступ

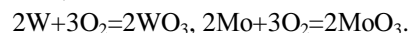
При протіканні на поверхні рідкої або твердої фази хімічних або фазових перетворень виникає гідродинамічна течія газового середовища, яка називається стефанівським потоком [1- 5]. Причиною стефанівського потоку являється виникнення градієнта парціального тиску газоподібних компонент, що оточують частинку (краплю), яка може бути або їх джерелом (у випадку випаровування, гетерогенної хімічної реакції з виникненням на поверхні газоподібних продуктів [1-3]) або їх стоком (у випадку окислення з утворенням твердого оксиду [4, 5]). В роботах [2,3] показано, що стефанівська течія може чинити істотний вплив на характеристики високотемпературного тепломасообміну вуглецевої частинки у нагрітому повітрі. В даній роботі вирішується задача про виникнення стефанівського потоку на поверхні металеві частинки, що окисляється, з урахуванням випаровування оксидної плівки з її поверхні та досліджуються закономірності впливу стефанівського потоку на характеристики горіння.

I. Фізико-математичне моделювання

Розглянемо частинку тугоплавкого металу, наприклад, вольфраму або молібдену, що знаходиться в нагрітому газі, який містить окислювач. З підвищенням температури частинки в результаті теплообміну з газом та зі стінками реакційної установки, на її поверхні починає

протікати хімічна реакція окислення з утворенням твердої оксидної плівки.

Із літературних даних [6] відомо, що основними продуктами окислення вольфраму і молібдену являються оксиди WO_3 і MoO_3 , які утворюються згідно з рівнянь:

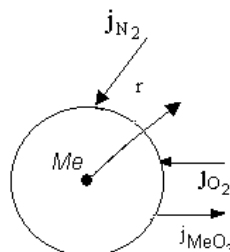


У загальному випадку, рівняння хімічної реакції для цих металів (Me) можна записати у вигляді: $2Me+3O_2=2MeO_3$.

При досягненні частинкою температури плавлення оксиду оксидна плівка переходить в рідкий стан і починає випаровуватись. У результаті протікання на поверхні частинки фазових та хімічних перетворень радіально поверхні виникає гідродинамічне переміщення компонент газового середовища - стефанівська течія.

В залежності від температури металеві частинка являється стоком для кисню, що реагує з металом, і джерелом пари оксиду. Процес окислення починається при більш низькій температурі, а потім, при досягненні температури плавлення оксидної плівки, паралельно починає протікати процес випаровування оксиду. Знайдемо швидкість стефанівської течії, яка виникає в результаті вказаних процесів.

Запишемо рівняння для густин масових потоків газоподібних компонент на поверхні металеві частинки. Масоперенос кисню O_2 ,



азоту N_2 і пари оксиду MeO_3 здійснюється дифузиею та стефанівською течією:

$$j_{MeO_3} = -D_{MeO_3} r_g \frac{\partial n_{MeO_3}}{\partial r} \Big|_s + (r_g U)_s n_{MeO_3s} = I_{MeO_3} \quad (1)$$

$$j_{O_2} = D_{O_2} r_g \frac{\partial n_{O_2}}{\partial r} \Big|_s - (r_g U)_s n_{O_2s} = W_{O_2s} \quad (2)$$

$$j_{N_2} = D_{N_2} r_g \frac{\partial n_{N_2}}{\partial r} \Big|_s - (r_g U)_s n_{N_2s} = 0, \quad (3)$$

де j_{MeO_3} , j_{O_2} , j_{N_2} – густини масових потоків пари оксиду MeO_3 , O_2 , N_2 , $\frac{\kappa \mathcal{Z}}{M^2 c}$; ρ_g – густина повітря,

$\frac{\kappa \mathcal{Z}}{M^3}$; D_{MeO_3} , D_{O_2} , D_{N_2} , \mathbf{n}_{MeO_3s} , \mathbf{n}_{O_2s} , \mathbf{n}_{N_2s} – коефіцієнти

дифузії, $\frac{M^2}{c}$, і відносні масові концентрації відповідних газових компонент, j_{MeO_3} – масова швидкість випаровування оксиду, $\frac{\kappa \mathcal{Z}}{M^2 c}$,

U_s – швидкість стефанівської течії на поверхні частинки, $\frac{M}{c}$. Для спрощення задачі будемо вважати, що

$$D_{MeO_3} = D_{O_2} = D_{N_2} = D_g.$$

Кисень дифундує до поверхні металевих частинок і витрачається в реакції окислення, швидкість якої W_{O_2s} описується параболічним законом:

$$W_{O_2s} = \frac{D}{h} r_g n_{O_2s}, \quad D = D_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (4)$$

тут: D – коефіцієнт дифузії кисню до поверхні реагування через оксидний шар, $\frac{M^2}{c}$; E – енергія

активації, $\frac{Дж}{моль}$; h – товщина оксидного шару, м.

Знайдемо швидкість стефанівської течії, використовуючи умову сталості тиску на поверхні частинки, що еквівалентно умові:

$$n_{O_2s} + n_{N_2s} + n_{MeO_3s} = 1. \quad (5)$$

Тоді

$$\frac{\partial n_{O_2}}{\partial r} = -\frac{\partial n_{N_2}}{\partial r} - \frac{\partial n_{MeO_3}}{\partial r}. \quad (6)$$

Використання рівнянь (1)-(4) і умов (5)-(6) дозволяє визначити масову швидкість газу на поверхні металевої частинки:

$$(\rho_g U)_s = I_{MeO_3} - \frac{D}{h} \rho_g n_{O_2s} \quad (7)$$

як різницю швидкостей випаровування оксиду та окислення металу. Із (7) маємо:

$$I_{MeO_3} = \rho_g U_s + \frac{D}{h} \rho_g n_{O_2s}. \quad (8)$$

Для знаходження концентрацій газоподібних компонент необхідно розв'язати рівняння дифузії та нерозривності газового середовища:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 r_g D_g \frac{\partial n_i}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial r} (n_i r_g U r^2), \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} (r_g U r^2) = 0,$$

$$i = 1, 2, 3, 1 - O_2, 2 - N_2, 3 - MeO_3,$$

з граничними умовами: $r = r_s, \sum_{i=1}^3 n_{is} = 1; r = r_\infty,$

$$\sum_{i=1}^3 n_{i\infty} = 1.$$

Рішення (9) для кисню має вигляд:

$$n_{O_2} = \frac{(n_{O_2s} - n_{O_2\infty}) \exp(-\xi) + n_{O_2\infty} \exp(-\xi_s) - n_{O_2s}}{\exp(-\xi_s) - 1}, \quad (10)$$

де $n_{O_2\infty}$ – відносна масова концентрація кисню в повітрі; X , X_s – безрозмірна швидкість стефанівської течії на відстані r від частинки і на її поверхні (r_s – радіус частинки):

$$X = \frac{U_s r^2}{D_g r}, \quad X_s = \frac{U_s r_s}{D_g} = \frac{U_s}{b}, \quad b = \frac{D_g}{r_s}. \quad (11)$$

Підставимо (10) в (2) і, враховуючи (4) та (11) отримаємо:

$$n_{O_2s} - n_{O_2\infty} \exp(-X_s) - \frac{D}{hb} \frac{n_{O_2s}}{X_s} \exp(-X_s) + \frac{D}{hb} \frac{n_{O_2s}}{X_s} = 0. \quad (12)$$

Так як $X_s \ll 1$, то $\exp(-X_s) = 1 - X_s$.

Тоді із (12) отримаємо вираз для концентрації кисню на поверхні частинки з урахуванням стефанівської течії:

$$n_{O_2s} = n_{O_2\infty} (1 - X_s) \left(1 + \frac{D}{hb} \right)^{-1}, \quad (13)$$

де $b = \frac{D_g Nu}{d}$, Nu – критерій Нусельта, d – діаметр частинки, м.

Якщо швидкість стефанівської течії $\xi_s = 0$, то отримуємо відомий вираз:

$$n_{O_2s} = n_{O_2\infty} \left(1 + \frac{D}{hb} \right)^{-1}. \quad (14)$$

Аналогічним чином можна знайти концентрацію пари оксиду біля поверхні частинки.

Знайдемо безрозмірну швидкість стефанівської течії. З урахуванням того, що $I_{MeO_3} = \rho_g \beta n_{MeO_3s}$ та використовуючи (8) маємо:

$$X_s = n_{MeO_3s} - \frac{D}{hb} n_{O_2s}. \quad (15)$$

Із (15) випливає, що швидкість стефанівської течії залежить від термокінетичних сталих окислення, товщини оксиду, температури та діаметру частинки, концентрації кисню в середовищі та концентрації пари оксиду металу біля поверхні частинки.

Підставляючи (15) в (13), отримуємо вираз для n_{O_2s} :

$$n_{O_2s} = \frac{n_{O_2\infty}(1 - n_{MeO_3s})}{1 + \frac{D}{hb}(1 - n_{O_2\infty})}. \quad (16)$$

Введемо безрозмірні поправки на стефанівську течію за рахунок хімічної реакції окислення (індекс „ox”) і за рахунок випаровування оксиду (індекс „ev”):

$$P_{sf_{ox}} = n_{O_2\infty} \frac{D}{hb}, \quad P_{sf_{ev}} = n_{MeO_3s} n_{O_2\infty}, \quad (17)$$

Тоді

$$n_{O_2s} = \frac{n_{O_2\infty} - P_{sf_{ev}}}{1 + \frac{D}{hb} - P_{sf_{ox}}}. \quad (18)$$

Без врахування стефанівської течії ($P_{sf_{ox}} = 0, P_{sf_{ev}} = 0$) приходимо до виразу (14).

Виразимо швидкість стефанівської течії через поправки (17):

$$X_s = \frac{\frac{P_{sf_{ev}}}{n_{O_2\infty}} \left(1 + \frac{D}{hb}\right) - P_{sf_{ox}}}{1 + \frac{D}{hb} - P_{sf_{ox}}}. \quad (19)$$

Без урахування випаровування оксиду для X_s маємо:

$$\xi_s = \frac{P_{sf_{ox}}}{P_{sf_{ox}} - 1 - \frac{D}{hb}}. \quad (20)$$

Знаючи концентрацію кисню, можна визначити густину хімічного тепловиділення

$$q_{ch} = Q r_g \frac{D}{h} n_{O_2s}. \quad (21)$$

Концентрацію насиченої пари металу біля поверхні частинки знайдемо як:

$$n_{MeO_3} = \frac{P_{MeO_3} M_{MeO_3}}{\rho_g R T}, \quad (22)$$

де P_{MeO_3} – тиск насиченої пари оксиду, Па; M_{MeO_3} – молярна маса оксиду, $\frac{кг}{кмоль}$.

Для тиску насиченої пари оксиду в першому наближенні можна скористатися формулою Клапейрона-Клаузіуса:

$$P_{MeO_3} = P_a \exp\left(\frac{LM_{MeO_3}}{R} \left(\frac{1}{T_{boil}} - \frac{1}{T}\right)\right), \quad (23)$$

(P_a – атмосферний тиск, Па; T_{boil} – температура кипіння оксиду при P_a , К; L – питома теплота пароутворення, Дж/кг) або відомими із літератури експериментальними залежностями. Наприклад в [7]

для температурної залежності тиску насиченої пари триоксиду вольфраму запропонована формула:

$$\lg P_{WO_3} = -\frac{29470}{T} - 0,47 \cdot 10^3 \cdot T + 11,85. \quad (24)$$

Знайдемо тепловтрати на випаровування оксиду з поверхні частинки:

$$q_{ev} = \frac{LShD_{MeO_3}}{d} \rho_g n_{MeO_3s}, \quad (25)$$

де Sh – критерій Шервуда, D_{MeO_3} – коефіцієнт дифузії парів MeO_3 в повітрі, $\frac{м^2}{с}$.

Для опису теплообміну випромінюванням між частинкою і стінками реакційної установки скористаємося законом Стефана-Больцмана:

$$q_{rad} = \epsilon s (T^4 - T_w^4), \quad (26)$$

де ϵ – коефіцієнт випромінювальної здатності оксидної плівки, T_w – температура стінок реакційної установки, К.

Знайдемо густину теплового потоку на поверхні частинки, яка визначається теплопровідністю і стефанівською течією.

$$q_{l, sf} = q_{\lambda} + q_{sf} = -\lambda \frac{\partial T_g}{\partial r} \Big|_s + C_g (\rho_g U)_s T_{gs}. \quad (27)$$

Для знаходження q_l розв'яжемо рівняння теплопровідності та нерозривності для газового середовища:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 l_g \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial r} (C_g T_g r_g U r^2),$$

$$\frac{\partial}{\partial r} (r_g U r^2) = 0. \quad (28)$$

Граничні умови: $T_g(r=r_s) = T_{gs}$; $T_g(r=r_\infty) = T_{g\infty}$, де λ_g , C_g – коефіцієнт теплопровідності та теплоємність газу, $\frac{Вт}{м \cdot К}$, $\frac{Дж}{кг \cdot К}$.

Рішення рівнянь (28) має вигляд:

$$T_g = \frac{(T_{gs} - T_{g\infty}) \exp(-x) + T_{g\infty} \exp(-x_s) - T_{gs}}{\exp(-x_s) - 1}. \quad (29)$$

Підставляючи (29) в (27), маємо:

$$q_{l, sf} = \frac{\alpha x_s [T_{gs} - T_{g\infty} \exp(-x_s)]}{1 - \exp(-x_s)}. \quad (30)$$

Так як $\xi_s \ll 1$, то

$$\exp(-x_s) \approx 1 - x_s + \frac{1}{2} x_s^2,$$

Приймаючи в (30) це до уваги, а також те, що $T_{gs} = T$, $T_{g\infty} = T_g$, для густини теплового потоку отримаємо вираз:

$$q_{l, sf} = a(T - T_g) + \frac{x_s}{2} a(T + T_g), \quad \alpha = \frac{\lambda_g Nu}{d}. \quad (31)$$

Визначивши всі масові та теплові потоки на поверхні металеві частинки, запишемо диференційне рівняння для зміни її температури з

часом:

$$\frac{1}{6} C_{Me} \rho_{Me} d \frac{\partial T}{\partial t} = q_{ch} - q_{h, sf} - q_{rad} - q_{ev}, \quad T(t=0) = T_b, \quad (32)$$

де C_{Me} , ρ_{Me} – питома теплоємність і густина металевої частинки, $\frac{Дж}{кг \cdot K}$, $\frac{кг}{м^3}$; T_b – початкова температура частинки, К.

Диференційне рівняння для часової залежності товщини оксидної плівки на поверхні частинки записується з урахуванням її зростання в процесі окислення і зменшення за рахунок випаровування:

$$\rho_{MeO_3} \frac{\partial h}{\partial t} = \Omega \frac{k}{h} \rho_g n_{O_2s} - \frac{Sh D_{MeO_3}}{d} \rho_g n_{MeO_3s},$$

$$h(t=0) = h_b, \quad (33)$$

h_b – початкова товщина оксиду, м; $\Omega = \frac{M_{MeO_3}}{M_{O_2}}$,

Γ_{MeO_3} – густина оксиду, $\frac{кг}{м^3}$.

Диференційні рівняння (32) і (33) з урахуванням

тепломасообмін і кінетику окислення металевої частинки з урахуванням випаровування оксиду та стефанівської течії на її поверхні.

II. Аналіз впливу стефанівської течії на характеристики високотемпературного окислення металевих частинок

Проведемо аналіз впливу стефанівської течії на високотемпературний тепломасообмін частинки вольфраму з урахуванням випаровування оксидної плівки. Надалі для тиску насиченої пари WO_3 будемо використовувати формулу (24). На рис. 1 представлено результати розрахунків часових залежностей T , h , dT/dt , U_{sf} для частинки діаметром $d=100$ мкм з урахуванням і без урахування стефанівської течії.

Після попадання частинки в нагрітий газ відбувається її прогрівання і перехід до високотемпературного стану. При цьому зменшення

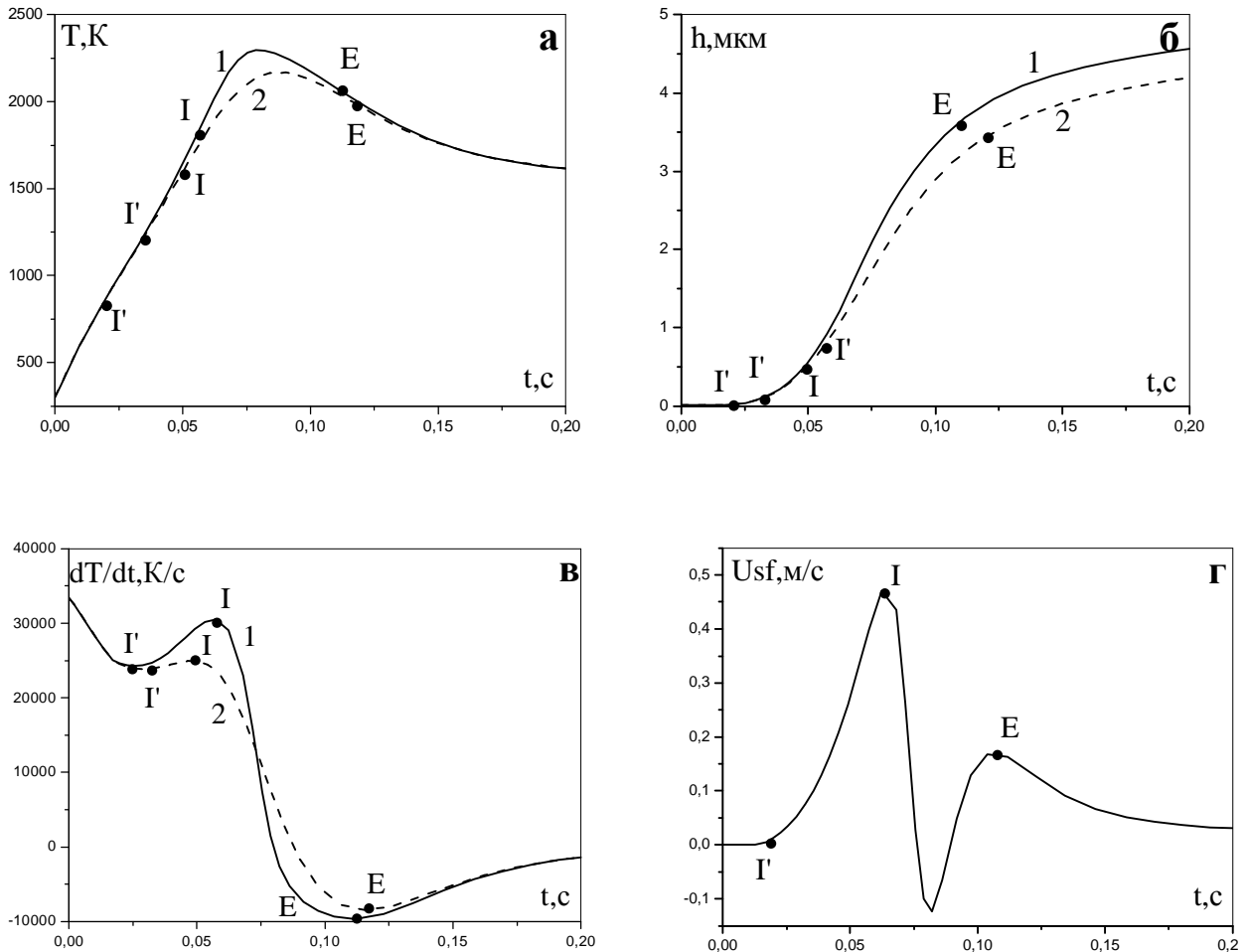


Рис. 1. Вплив стефанівської течії на високотемпературне окислення частинки вольфраму $d=100$ мкм, $n_{O_2\infty}=0,5$, $T_g=T_w=1500$ К. 1 – з урахуванням стефанівської течії; 2 – без урахування.

вищезазначених формул описують нестационарний

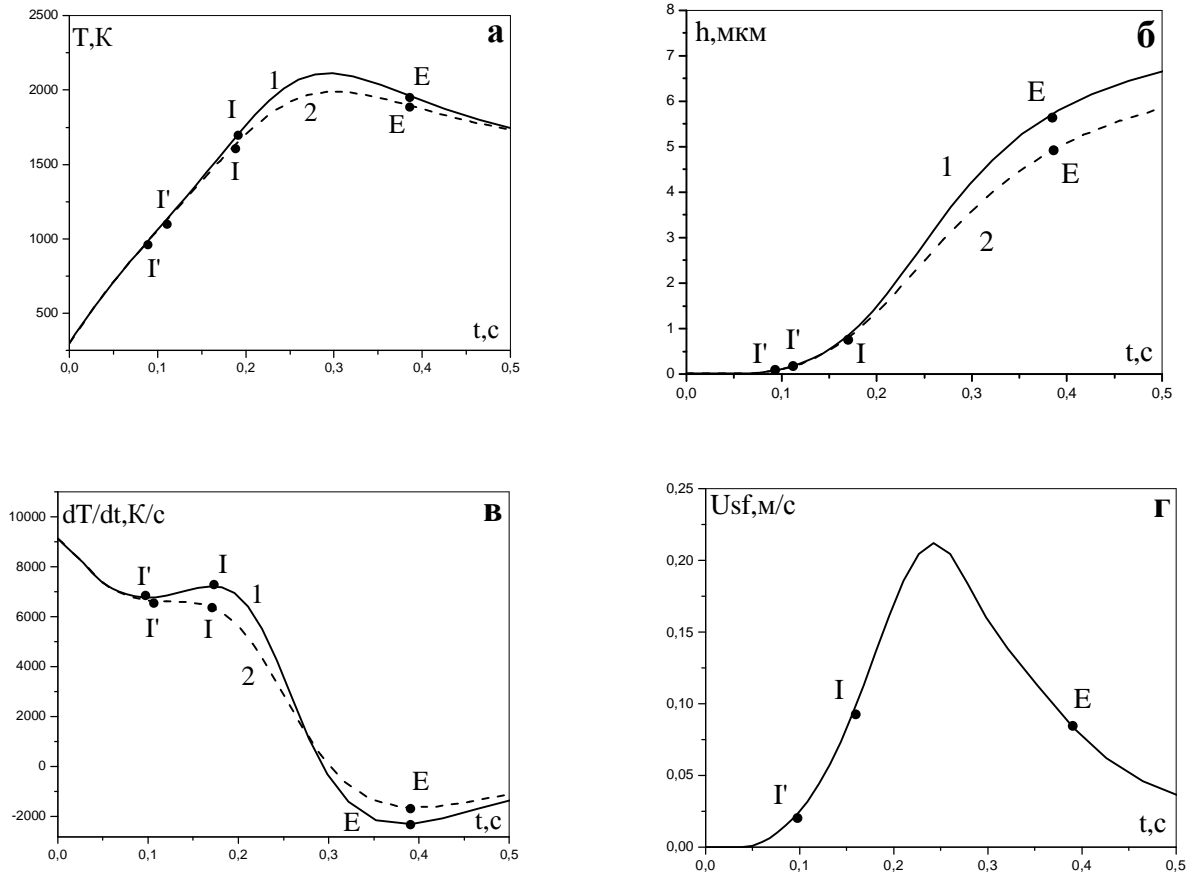


Рис. 2. Вплив стефанівської течії на високотемпературне окислення частинки вольфраму $d=200 \mu m$, $n_{O_2, \infty}=0,5$, $T_g=T_w=1500 K$. 1 – з урахуванням стефанівської течії; 2 – без урахування.

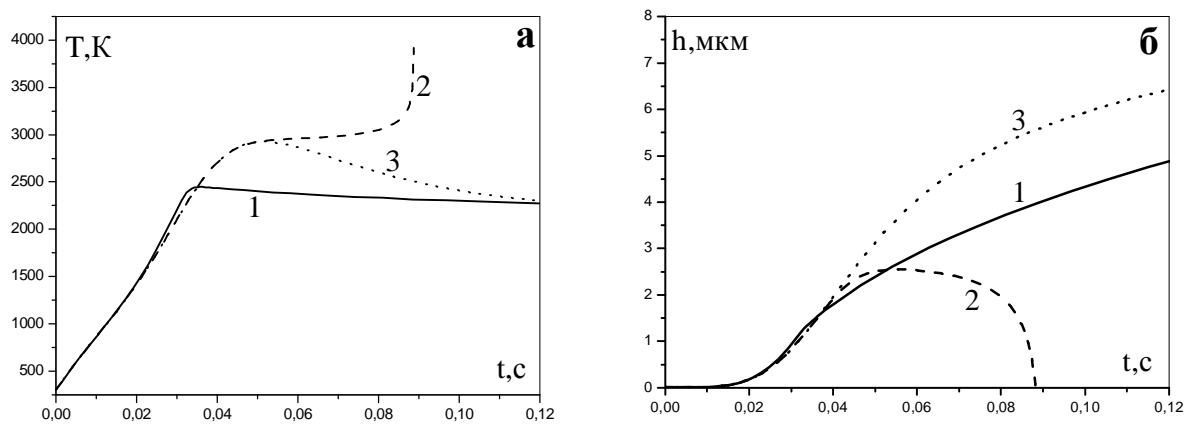


Рис. 3. Вплив випаровування і стефанівської течії на особливості високотемпературного окислення частинки вольфраму $d=100 \mu m$ при $T_g = 2000 K$, $T_w = T_g$, $n_{O_2, \infty} = 0,5$, 1 – з урахуванням стефанівської течії; 2 – без врахування стефанівської течії; 3 – без врахування випару оксиду.

часової похідної температури частинки до точки мінімуму I' $\left(\frac{dT}{dt} > 0, \frac{d^2T}{dt^2} = 0, \frac{d^3T}{dt^3} > 0 \right)$ (рис.1в) характеризує завершення інертного прогрівання частинки і початок окислення з утворенням на її

поверхні плівки оксиду. Після t_1 швидкість хімічної реакції зростає, що призводить до збільшення температури частинки. При досягненні температурою точки I (максимуму $\frac{dT}{dt}$, $\frac{dT}{dt} > 0, \frac{d^2T}{dt^2} = 0, \frac{d^3T}{dt^3} < 0$)

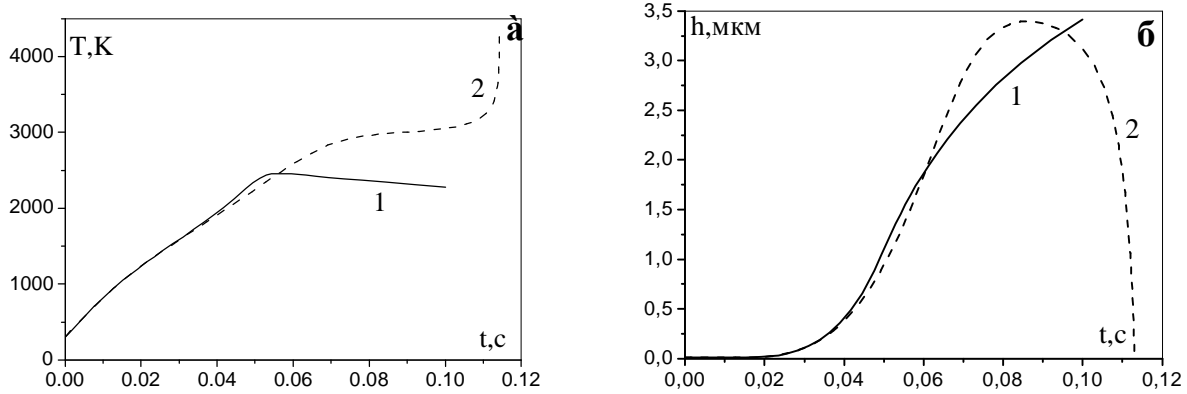


Рис. 4. Вплив стефанівської течії на часові залежності температури і товщини оксиду на поверхні частинки молибдену $d=100\text{мкм}$ при $T_g = 2000\text{K}$, $n_{O_2,\infty} = 0,5$; 1 – з урахуванням стефанівської течії; 2 – без урахування стефанівської течії.

(рис.1в), відбувається запалення частинки – перехід до високотемпературного режиму тепломасообміну. Час переходу до високотемпературного режиму (період індукції) складається з часу інертного та хімічного нагрівання частинки і визначається тривалістю процесу окислення до т.І.

Після моменту запалення температура частинки збільшується і сягає максимального значення, що відповідає умові $q_{ch} = q_{1.sf} + q_{rad} + q_{ev}$ або $\frac{dT}{dt} = 0$. Зростання товщини оксиду (рис.1б) в

високотемпературному режимі тепломасообміну призводить до зменшення швидкості окислення і, відповідно, густини хімічного тепловиділення. Коли товщина оксиду досягає критичного значення (т.Е) відбувається потухання частинки – перехід до низькотемпературного стану тепломасообміну $\left(\frac{dT}{dt} < 0, \frac{d^2T}{dt^2} = 0, \frac{d^3T}{dt^3} > 0 \right)$ (рис. 1в). Після

потухання частинка повільно окислюється, її температура наближується до температури газу, товщина оксиду на поверхні змінюється слабо. Тривалість високотемпературної стадії – час горіння визначається моментами запалення (т.І) і потухання (т. Е) частинки.

Із рис. 1 г випливає, що на стадії запалення швидкість стефанівської течії направлена до частинки, так як при не високих температурах швидкість випаровування оксиду мала. За рахунок цього тепловий потік до частинки зростає, що призводить до швидкого збільшення її температури. Потім, при високих температурах, починається інтенсивне випаровування оксиду з поверхні. Швидкість стефанівської течії зменшується і згодом змінює свій напрям на протилежний ($U_{sf} < 0$). На цьому етапі від частинки стефанівським потоком відводиться частина тепла до оточуючого газу. Температура частинки знижується більш інтенсивно,

ніж у випадку відсутності стефанівської течії (рис.1в). Однак, зі зменшенням температури спадає і швидкість випаровування. Це призводить до того, що швидкість стефанівської течії знову набуває напрямку до частинки ($U_{sf} > 0$, рис.1г) і вдруге досягає максимального значення. Потім відбувається зменшення швидкості стефанівського потоку в результаті потухання частинки при досягненні критичного значення товщини оксидної плівки (h_E). Таким чином, за даних температурних умов швидкість стефанівської течії двічі змінює свій напрям відносно частинки, що обумовлено співвідношенням між швидкостями окислення та випаровування оксиду з її поверхні. Це впливає на інтенсивність тепло – і масообміну між металевою частинкою і газом, а, отже, і на характеристики спалахування, горіння і потухання. Із рис.1 видно, що з урахуванням стефанівської течії збільшується температура горіння частинки і критичне значення товщини оксидної плівки при потуханні. Час горіння дещо зменшується.

У результаті досліджень помічено, що зі збільшенням початкового діаметру частинок вольфраму змінюється характер поведінки швидкості стефанівської течії біля поверхні частинки в високотемпературному режимі. Якщо для сто мікронної частинки, яка окислюється, швидкість стефанівського потоку змінюється, як за абсолютною величиною, так і за напрямом, то для частинки діаметром 200 мкм вона направлена тільки до її поверхні (рис.2 г), змінюючись за абсолютною величиною.

Для крупних металевих частинок процес утворення оксидної плівки переважає над процесом її випаровування і швидкість стефанівської течії завжди направлена до поверхні частинки. У цьому випадку спостерігається найбільш вагомий вплив стефанівської течії на температуру горіння (рис.2а) і

критичну товщину оксиду при згасанні частинки (h_E , рис. 2б).

Збільшення температури газу якісно змінює характер впливу стефанівської течії на характеристики високотемпературного тепломасообміну. При високих температурах газу зростає роль процесу випаровування оксидної плівки. З одного боку збільшуються тепловтрати на випаровування, з іншого – збільшується швидкість стефанівської течії, направленої від частинки. Стефанівський потік додатково відводить тепло від частинки і зменшує концентрацію кисню біля її поверхні. В результаті значно спадає температура окислення частинки (рис.3а, крива 1) і відбувається перехід до квазістаціонарного температурного стану з постійною швидкістю зростання оксидної плівки. Без урахування стефанівської течії товщина оксиду досягає максимального значення (рис.3б, крива 2) і згодом оксидний шар повністю випаровується. Температура частинки різко зростає (рис.3а, крива 2), внаслідок самоприскорення хімічної реакції за умов вільного доступу кисню до поверхні реагування. Знехтування в фізико-математичній моделі процесом випаровування оксидної плівки призводить до значного збільшення її товщини на поверхні частинки (рис.3, криві 3).

Аналогічні результати спостерігається і при окисненні частинок молібдену при високих температурах газу (рис.4). Наявність стефанівського потоку (крива 1) призводить до встановлення значно менших температур окислення. На відміну від вольфраму на поверхні частинок молібдену формуються дещо товщі оксидні покриття.

Висновки

Разроблена фізико-математична модель високотемпературного тепломасообміну і окислення металеві частинки з урахуванням випару оксиду і стефанівського потоку на її поверхні, який виникає внаслідок процесів окислення і випаровування. Доказано, що швидкість стефанівської течії визначається різницею швидкостей випару оксиду та його утворення внаслідок хімічної реакції на поверхні металеві частинки.

Встановлено, що швидкість стефанівської течії в процесі високотемпературного окислення змінює свій напрямок відносно поверхні частинки. При низьких температурах частинки вона направлена до її поверхні, при високих – від поверхні до газу, що пов'язано зі зростанням ролі випаровування оксиду з поверхні частинки.

Доказано, що стефанівський потік призводить до збільшення періоду індукції за рахунок зростання тривалості стадії хімічного розігрівання, що обумовлено більш високим значенням температури частинки в момент запалення.

Встановлено якісно різний вплив стефанівського потоку на процес окислення при високих і низьких температурах газу. При низьких температурах газу мала роль випару оксиду і стефанівська течія призводить до збільшення температури горіння частинки і критичного значення товщини оксиду, що обумовлює її згасання. При високих температурах газу з урахуванням стефанівської течії температура частинки і критична товщина оксидної плівки зменшуються.

Орловська С.Г. – кандидат фіз.-мат. наук, доцент кафедри теплофізики ОНУ ім.І.І. Мечникова.

- [1] В.Н. Блошенко, Б.Н. Хайкин, Журнал физической химии, **XLI** (12), 3010 (1967).
- [2] В.В. Калинин, С.Г. Орловская, А.И. Калинин, А.В.Дубинский, Теплофизика высоких температур, **34** (1), 83 (1996).
- [3] В.В. Калинин, С.Г. Орловская, А.И. Калинин, А.В.Дубинский, Физика горения и взрыва, **37** (4), 41 (2001).
- [4] S.G. Orlovskaya, V.V. Kalinchak and T.V. Gryzunova, 2-nd International Conference Physics of liquid matter: modern problems, Kyiv, Ukraine, 44 (2003).
- [5] С.Г. Орловская, Ф.Ф. Каримова, М.С. Шкоропода, Космический вызов XXI века. Химическая и радиационная физика, **4**, 274 (2011).
- [6] П. Кофстад. Високотемпературное окисление металлов (Мир, М. 1969).
- [7] И.С.Куликов. Термическая диссоциация соединений (Металлургия, М. 1969).

С.Г. Орловська

S.G. Orlovskaya

High Temperature Heat and Mass Transfer of Metal Particles with Account of Stefan Flow

Odessa National I.I. Mechnikov's University, Odessa, Ukraine, Dvoryanskaya 2, 65082, (048) 723-62-27, svetor@rambler.ru

High temperature oxidation of metal particles is studied numerically: heat and mass transfer is modeled with account of metal oxide evaporation and Stefan flow at the particle surface. Analytical expressions for Stefan flow velocity, heat and mass flux at the surface are developed. Effect of Stefan flow on heat and mass transfer characteristics, including critical parameters of the particle extinction is analyzed numerically.

Keywords: heat and mass transfer, Stefan Flow, metal oxides, tungsten, molybdenum, ignition, extinction.