

УДК 536.46

Копит М. Х., Копит М. М., Калінчак В. В., Черненко О. С.

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова

E-mail: nikkopyt@gmail.com

Дослідження початкової стадії окислення заліза в повітрі. Частина 2. Інтервал температур 400-625°C

Проводиться дослідження окислення заліза при утворенні тонких оксидних плівок по параболічному закону на поверхні заліза в результаті окислення в повітрі та температурах вище (400 - 550 °C) та нижче (575 – 600 °C) точки Шадрона (575 °C). Експериментальне визначення залежності товщини від часу засновано на методі виникнення на поверхні окисленої залізної пластинки кольорів «мінливості». При збільшенні товщини оксидної плівки в результаті інтерференції її колір буде послідовно змінюватися згідно ряду: жовтий, помаранчевий, червоний, пурпурний, фіолетовий і синій. Це відповідає області товщин оксидної плівки від 46 до 72 нм.

В області температур 400-550°C на поверхні заліза з'являється стійкий оксид Fe_3O_4 – магнетит. Показано лінійність залежностей $\ln h$ і $\ln t$ з тангенсами кута нахилу, рівними 0.5. Отримано значення величини енергії активації, яка є сталою і рівною $E = 43.0$ кДж/моль. На основі моделі окислення металевої пластинки, яка оснований на визначальній ролі дифузії кисню через оксидну плівку, отримано значення коефіцієнту дифузії кисню $D = 1.73 \cdot 10^{-13}$ м²/с.

В області температур 550 – 625 °C відбувається зміна константи швидкості взаємодії заліза з киснем з повітря, що пояснюється стійким утворенням в'юститу FeO . Всі ізотерми окислення можна описати лінійною залежністю в координатах $\ln h$ і $\ln t$. Показано, що показник ступеня в законі окислення при температурах нижче точки Шадрона дорівнює 2 (параболічний закон), а вище точки Шадрона зростає з ростом температури процесу згідно отриманої залежності $n = 2 + 0.008(T - 823)$.

Ключові слова: закон окислення, залізо, інтерференційна індикація, точка Шадрона.

Вступ. Процеси окислення заліза пильно привертають увагу, як дослідників, так і практиків [1]. Це викликано тим, що залізо і його сплави мають місце в найбільш масових технологічних процесах. Залізо, як один з найважливіших конструкційних матеріалів, застосовується для виробництва різного роду сталей і сплавів. Сплави заліза з вуглецем, хромом, нікелем, міддю і іншими елементами дозволяють отримувати різні сталі, які відрізняються високою жароміцністю, а також прекрасними механічними, антикорозійними, електричними і термоелектричними властивостями. Більшість виробів із заліза і його сплавів при експлуатації в умовах навколишнього середовища окислюються, а їх поверхні покриваються шаром оксидної плівки. Тому, експлуатаційні властивості, у тому числі і корозійна стійкість, залежить від здатності поверхні оксидних плівок захищати метал від руйнування.

Не дивлячись на те, що окисленню заліза і його сплавів присвячена велика кількість досліджень [2-4], до цих пір в області кінетики і термодинаміки процесів газової корозії заліза в літературі приводяться ті, що суперечать один одному зведення і узагальнення. Це пов'язано з багатьма причинами. Так, при під-

вищенні температури, в залізі відбувається зміна кристалічної структури, може здійснюватися перехід від феромагнетика до парамагнетика, але при цих переходах відбувається зміна кінетичних і термодинамічних закономірностей. Крім того, за певних умов відбувається утворення стійких оксидів: гематиту, магнетиту і вюстита.

Якщо утворення окалини відбувається на повітрі при температурах до 575°C, то в складі окалини можуть перебувати тільки два оксиду: магнетит (Fe_3O_4) і гематит (Fe_2O_3). У досліджуваній області температур 400 - 550°C найбільший інтерес представляє магнетит Fe_3O_4 , який найактивніше утворюється при цих температурах. Магнетит Fe_3O_4 існує в наступних кристалічних формах: нормальної $Fe^2 [Fe_2^{3+} O_4]$ і оберненої $Fe^3 [Fe^{2+} Fe^{3+} O_4]$. Обернена форма виникає при температурах, більших ніж 125 К, тобто при звичайних (кімнатних) температурах саме ця форма шпінелі є стійкою [1]. Обернена форма Fe_3O_4 володіє високими магнітними і електричними властивостями.

При температурах, що перевищують 570 ° С, всі раніш утворені оксиди заліза стійкі, а в окалині може виникнути ще й третій оксид - вюстит (FeO). При цьому, існує певний порядок в розташуванні шарів: найбільш бідна киснем сполука розташовується ближче до поверхні металу, а найбільш багата стикається з навколишнім середовищем.

Співвідношення шарів оксидів в атмосфері повітря становить в середньому: $FeO: Fe_3O_4: Fe_2O_3 = 100: 10: 1$. Велика товщина шару вюстита обумовлена високим значенням коефіцієнта дифузії катіонів у FeO в порівнянні з іншими оксидними шарами [2]. Збільшення частки вюститу в окалині сприяє збільшенню температури окислення, а також зниження тиску кисню [3]. Утворений при даних умовах оксидний шар характеризується постійним концентраційним градієнтом по залізу, обумовленим відмінностями в складі вюститу на границі залізо/вюстит ($Fe_{0,954}O$) і вюстит/магнетит ($Fe_{0,836}O$).

Виходячи з діаграми стану залізо - кисень [2], утворення вюститу може відбуватися при температурах, більших, ніж 575 ° С і підвищеному (в порівнянні з повітрям) парціальним тиском кисню. З цієї діаграми випливає, що в атмосфері повітря при температурі Шадрона ($t = 575$ ° С) стійким є магнетит Fe_3O_4 . Вюстит може бути отриманий в спеціальних умовах. Він метастабільний і при температурах нижче 400 °С розкладається з утворенням Fe і Fe_3O_4 [3].

Виходячи з викладеного, можна припустити, що до точки Шадрона в галузі сталого термодинамічної існування оберненого магнетиту Fe_3O_4 , окислення заліза відбувається за рахунок дифузії, при якій точці Шадрона - чисто хімічний (кінетичний) процес, а при $t > 575$ °С – дифузійно-кінетичний.

При газовій корозії заліза, разом з іншими чинниками, температура здійснює великий вплив, як на сплав оксидних плівок, що утворюються, так і на закони зростання цих плівок [2-4,6]. Підвищення температури є важливим чинником, що впливає на швидкість окислення заліза. Вплив температури на окислення металів пов'язаний з характером температурної залежності константи швидкості хімічної реакції і коефіцієнта дифузії. Обидві ці величини підкоряються експоненціальним законам, подібним до закону Арреніуса:

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right),$$

де k – константа швидкості хімічної реакції, R – універсальна газова стала, Дж/(моль·К); E – енергія активації хімічної реакції або дифузії, Дж/моль; T – абсолютна температура, К.

Таким чином, залежно від температурних умов окислення заліза можна отримати той або інший оксид. На цьому заснована, зокрема, можливість отримання на поверхні заліза шару магнетиту, що володіє магнітними властивостями, при порівняно невисокій агресивності середовища.

Метою даної роботи є детальне вивчення окислення заліза при утворенні тонких оксидних плівок на поверхні заліза при окисленні в атмосфері повітря при температурах 400- 625 °С.

Метод визначення коефіцієнта дифузії кисню в оксиді. Окислення металу відбувається за рахунок дифузії, яка є одним із наслідків теплового руху атомів в кристалічній структурі. В результаті перескоків атомів в сусідні або міжвузольні позиції відбувається їх направлене переміщення. При звичайних температурах дифузійні процеси протікають дуже поволі. Для їх прискорення необхідно нагрівати кристал. Знання коефіцієнтів дифузії кисню, як в оксиді, так і в металі, важливо для розуміння механізму окислення при різних температурах, що дає можливість встановити розподіл концентрації кисню по товщині окисленого металу. Окислення заліза відбувається за рахунок дифузії кисню, направленої всередину оксидної плівки, яка має дефіцит кисню і містить кисневі вакансії, а потім до неокисленої поверхні металу.

Розглянемо окислення заліза в області температур 400 – 550 °С. Як показали наші експерименти і експерименти інших дослідників [2-5], окислення в цій температурній області протікає по параболічному закону. Закон зростання оксидної плівки матиме вигляд:

$$h^2 = k_h \tau, \quad h = \sqrt{k_h \tau}, \quad (1)$$

де h – товщина оксидної плівки, м; k_h – параболічна стала зростання товщини плівки, м²/с; t – час, с.

По аналогії з параболічною константою зростання товщини введемо параболічну константу приросту маси на одиницю площі поверхні:

$$\left(\frac{\Delta m}{S}\right)^2 = M^2 = k_m \tau, \quad M = \sqrt{k_m \tau}, \quad (2)$$

де M – приріст маси на одиниці площі металевієї пластини, кг/м²; k_m – параболічна константа зміни приросту маси, кг²/(м⁴с). Приріст маси M фактично дорівнює масі кисню що перейшов з газу в оксид.

Враховуючи, що товщина оксидної плівки є тонкою, розподіл концентрації кисню всередині неї в процесі дифузії можна вважати лінійним. Накопичення кисню на внутрішній поверхні плівки не відбувається, тому концентрація кисню на межі метал-оксид дорівнює нулю. У стаціонарному випадку швидкість приросту маси пластини одиничної площі повинна дорівнювати густині масового потоку кисню через оксидну плівку:

$$\frac{dM}{d\tau} = -D \frac{\partial c}{\partial x} \approx D \frac{c_0}{h}, \quad (3)$$

де D – коефіцієнт дифузії кисню через оксид, $\text{м}^2/\text{с}$, c – масова концентрація кисню всередині плівки, яка є залежною від відстані x до зовнішньої поверхні оксидної плівки, $\text{кг}/\text{м}^3$; c_0 – масова концентрація кисню на зовнішній поверхні оксиду, яка приймається рівною значенню в газі, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Концентрація кисню в нагрітому повітрі (мольна частка кисню $n = 0.21$) з температурою T і тиску $P_0 = 1$ атм визначимо як

$$c_0 = \frac{n P_0 \mu_{O_2}}{RT}.$$

Підставляючи (1) і (2) в (3), отримуємо

$$\frac{dM}{d\tau} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_m}{\tau}} = D \frac{c_0}{\sqrt{k_h \tau}},$$

звідки коефіцієнт дифузії

$$D = \frac{\sqrt{k_m k_h}}{2c_0}. \quad (4)$$

З рівняння хімічної реакції $3Fe + 2O_2 = Fe_3O_4$ ясно, що маси компонентів суміші, що прореагували і утворилися, строго пов'язані між собою. Отже, і між швидкостями утворення оксиду і швидкістю зникнення кисню в реакції існує зв'язок [6]:

$$M = \frac{2\mu_{O_2}}{\mu_{ox}} \frac{d(m_{ox} / S)}{d\tau},$$

а, отже,

$$\frac{d(m_{ox} / S)}{d\tau} = \frac{\mu_{ox}}{2\mu_{O_2}} D \frac{c_0}{h}. \quad (5)$$

Тут μ_{O_2} , μ_{ox} – молярні маси кисню і оксиду, $\text{кг}/\text{моль}$; ρ_{ox} – густина оксиду, $\text{кг}/\text{м}^3$; $m_{ox} = Sh\rho_{ox}$ – маса оксиду, кг ; S – площа пластини, м^2 .

Маса ж кисню, що запасена в оксиді: $m_{O_2} = Sh\rho_{ox} \frac{2\mu_{O_2}}{\mu_{ox}}$.

Тому з (3) і (5) швидкості росту товщини оксиду і приросту маси рівні:

$$\frac{dM}{d\tau} = \frac{2\mu_{O_2}}{\mu_{ox}} D \rho_{ox} \frac{c_0}{M} \quad \text{и} \quad \frac{dh}{d\tau} = \frac{\mu_{ox}}{2\mu_{O_2} \rho_{ox}} \frac{1}{h} D \frac{c_0}{h}.$$

Звідси, після інтегрування і порівнюючи з (2) і (1), сталі окислення дорівнюють

$$k_m = \frac{4\mu_{O_2}}{\mu_{ox}} D \rho_{ox} c_0 \quad \text{и} \quad k_h = \frac{\mu_{ox}}{\mu_{O_2} \rho_{ox}} \frac{c_0}{h} D. \quad (6)$$

Порівняння їх дозволяє отримати (4).

Таблиця 1. Час появи кольорів «мінливості», що визначають товщину плівок при температурах 400 - 550°C

колір <i>h</i>	жовтий 46нм	помаранчевий 52нм	червоний 58нм	пурпурний 63нм	фіолетовий 68нм	синій 72нм
t°C	τ,сек					
400	73.0	93.3	116.0	136.9	159.5	178.8
425	54.6	69.8	86.8	102.4	119.3	133.8
450	42.6	54.4	67.7	79.9	93.1	104.4
475	34.5	44.1	54.8	64.7	75.4	84.5
500	26.6	34.0	42.3	49.9	58.1	65.2
525	21.6	27.6	34.3	40.5	47.2	52.9
550	18.0	23.0	28.6	33.8	39.3	44.1

Експериментальні дослідження в області температур 400-550 °С. Дослідження проводилися по викладеній раніше методиці [5]. Товщина оксидної плівки фіксувалася по появі кольорів «мінливості». Дослідження проводили в області температур 400-550°C. У цій ділянці температур в атмосфері повітря на поверхні заліза з'являється стійкий оксид Fe_3O_4 - магнетит, тобто визначальною стадією окислення заліза є дифузія кисню через плівку магнетиту. У цьому інтервалі температур, як вказано вище, кінетична залежність зростання товщині оксиду виникає з першого закону Фіка, коли весь кисень, що поступає в зону реакції, встигає прореагувати з металом.

Прологарифмувавши (1), отримаємо:

$$\ln k_h = 2 \ln h - \ln \tau \quad (7)$$

У табл. 1 приведені експериментальні дані появи кольорів «мінливості» в залежності від температури з кроком 25 ± 0.2 °С.

Якщо експериментальні дані табл. 1 представити в координатах $\ln h$ і $\ln \tau$, то на графіку будуть паралельні ізотерми з тангенсами кута нахилу, рівними 0.5, що добре узгоджується з моделлю чисто дифузійного зростання оксидної плівки. Константа k_h , згідно (6), пропорційна коефіцієнту дифузії, який є експоненціальною функцією енергії активації дифузії E і температури T :

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right). \quad (8).$$

Прологарифмувавши вираз (7), отримаємо:

$$\ln k_h = \ln k_{h0} - \frac{E}{RT}. \quad (9).$$

Використовуючи експериментальні дані табл. 1, визначимо значення $\ln k_h$ при різній товщині і часах утворення плівок (табл. 2), а також розрахуємо залежність коефіцієнта k_h від температури.

На рис. 2 представлені експериментальні дані залежності коефіцієнта дифузії від температури в арреніусовських координатах $\ln k_h$ від $10^3/T$. Величина енергії активації є величиною сталою і рівною $E = 43.0$ кДж/моль.

Таблиця 2. Залежність коефіцієнта k_h від температури

$t, ^\circ\text{C}$	400	425	450	475	500	525	550
$1000/T, 1/\text{K}$	1.486	1.432	1.383	1.337	1.294	1.253	1.215
$k_h, 10^{-18} \text{ м}^2/\text{с}$	29.00	38.75	49.63	61.35	79.54	97.99	117.58
$-\ln k_h$	38.08	37.79	37.54	37.33	37.07	36.86	36.68

Таблиця 3. Залежність коефіцієнтів дифузії і параболічних констант від температури окислення заліза

$t, ^\circ\text{C}$	400	435	450	475	500	525	550
$k_h, 10^{-18} \text{ м}^2/\text{с}$	29.00	38.75	49.63	61.35	79.54	97.99	117.58
$k_m, 10^{-11} \text{ кг}^2/(\text{м}^4\text{с})$	5.97	7.97	10.21	12.62	16.37	20.16	24.19
$D, 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$	1.73	2.40	3.18	4.07	5.45	6.94	8.58

Для порівняння експериментальних і теоретичних даних визначимо коефіцієнт дифузії кисню в оксиді з використанням приросту і товщини оксидної плівки заліза.

Як приклад визначимо зміну приросту і константу зростання оксиду для температури 400°C і жовтого кольору мінливості ($h = 46 \text{ нм}$, $\tau = 73.0 \text{ с}$, $k_h = 29.0 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$). Розглянемо оксид Fe_3O_4 . Його молекулярна вага 0.232 кг/моль , густина 5200 кг/м^3 . Відсоток ваги кисню в оксиді $2\mu_{\text{O}_2} / \mu_{\text{ox}} = 27.6\%$. Маса кисню, що приходить на одиницю поверхні оксидної плівки, дорівнює: $M = m_{\text{O}_2} / S = 0.276 \cdot h\rho_{\text{ox}} = 6.6 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}^2$. Параболічна константа зміни приросту:

$$k_m = \frac{M^2}{\tau} = \frac{(6.6 \cdot 10^{-5})^2}{73.0} = 5.97 \cdot 10^{-11} \text{ кг}^2/(\text{м}^4\text{с}).$$

При цьому коефіцієнт дифузії з (4) або (6) рівний

$$D = 1.73 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Експериментальні дослідження в області температур $550 - 625^\circ\text{C}$. У табл. 4 і на рис.3 представлені результати зміни товщини оксидної плівки h при окисненні заліза в атмосфері повітря в області температур $550 - 625^\circ\text{C}$. Як по-

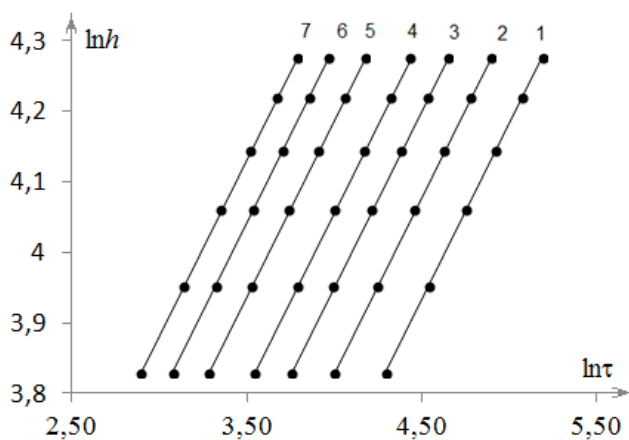


Рис 1. Залежність $\ln h$ (h в нм) від $\ln \tau$ для температур $400-550^\circ\text{C}$: 1 – 400°C , 2 – 425°C , 3 – 450°C , 4 – 475°C , 5 – 500°C , 6 – 525°C , 7 – 550°C

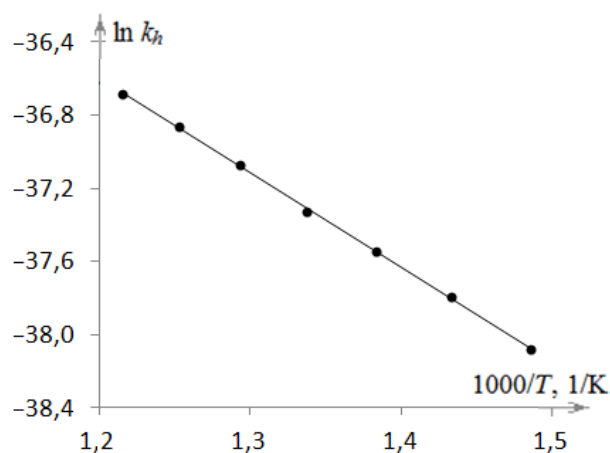


Рис. 2. Залежність коефіцієнта дифузії $\ln k_h$ від оберненої температури

Таблиця 4. Час τ (в секундах) появи інтерференційних кольорів мінливості, що визначають товщину оксидних плівок h при температурах $t = 550-625^\circ\text{C}$

h , нм	46	52	58	63	68	72
t , $^\circ\text{C}$						
550	18	23	29	34	39	44
562	16	20	26	30	35	40
574	14	17	22	26	31	35
585	11	14	18	22	26	30
600	9	12	16	19	23	26
613	8	11	15	18	21	24
625	7	10	13	16	20	23

Таблиця 5. Залежність константи швидкості показника ступеня окислення заліза від температури при появі кольорів мінливості

t , $^\circ\text{C}$	550	562	574	585	600	613	625
$-\ln k$	36.5	37.3	37.8	40.5	42.4	43.5	46.4
$k, 10^{-21}$	$13.9 \cdot 10^4$	$61.5 \cdot 10^3$	$37.3 \cdot 10^3$	2700	380	125	6.6
n	1.99	2.05	2.08	2.25	2.38	2.45	2.63

казали наші попередні дослідження, так і результати інших дослідників, в даній області температур відбувається зміна константи швидкості взаємодії заліза з киснем з повітря.

Виходячи з теорії «адсорбція-хімічна взаємодія», можна припустити, що в цій області температур відбувається зміна механізмів з дифузійного на кінетичний і з кінетичного на дифузійно-кінетичний.

Відповідно до сучасних уявлень, в гетерогенних системах процеси окислення металів починаються з адсорбції та подальшої дифузії. При адсорбції двоатомні газоподібні молекули кисню дисоціюють на атоми, тобто в разі окислення дифундують атоми кисню. В області розглянутих нами температур зростання оксидних плівок буде відбуватися по-різному. Так, в області температур до 575°C зростання плівок буде відбуватися в області дифузійного контролю, при 575°C (точка Шадрона) окислення відбувається в області кінетичного контролю і йде стійке утворення вюстіта, а після 575°C йде окислення по дифузійно-кінетичному контролю. При цьому швидкість окислення різко збільшується із зростанням температури.

При дослідженні процесу зростання оксидної плівки, як при дифузійному контролі, так і при дифузійно-кінетичному контролі, можна

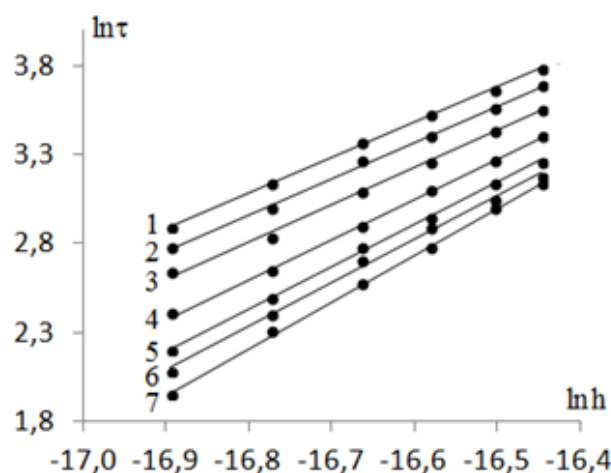


Рис 3. Залежність $\ln \tau$ від $\ln h$ (h в м) для температур $550-625^\circ\text{C}$:
 1 – 550°C , 2 – 562°C , 3 – 574°C , 4 – 585°C ,
 5 – 600°C , 6 – 613°C , 7 – 625°C

скористатися рівнянням Еванса:

$$h^n = k\tau. \quad (10)$$

Показник степеня в законі окислення легко знаходиться як кутовий коефіцієнт в залежності, отриманої після інтегрування (10):

$$\ln \tau = n \ln h - \ln k. \quad (11)$$

На рис. 3 представлені в логарифмічних координатах зростання товщини оксиду з часом. Всі ізотерми окислення можна описати лінійною залежністю, що підтверджує (11).

В табл. 5 представлені значення показника степеня в законі окислення і константи окислення при різних температурах (товщина оксиду підставлялася в метрах), отримані при обробці експериментальних даних в табл.4.

Як зазначено в роботі [7], при зростанні плівки в дифузійно-кінетичному режимі і при протіканні процесу в ізотермічних умовах, показник ступеня в рівнянні Еванса залежить від товщини плівки h і від часу τ , а його величина буде $n \geq 2$. Його збільшення можна апроксимувати залежністю

$$n = 2 + 0.008(T - 823).$$

Висновки. Таким чином, виходячи з експериментальних даних, в роботі отримані значення коефіцієнта дифузії через плівку магнетиту і визначені основні термічні константи дифузії кисню через шар оксидної плівки. Проведені розрахунки коефіцієнта дифузії з використанням лінійної зміни маси кисню, що дифундував в зразок. Показано, що закон окислення в інтервалі температур 400 – 625 °С є степенним. При температурах нижче точки Шадрона (575 °С) показник степеня дорівнює 2, що відповідає параболічному закону. При температурах вище точки Шадрона показник степеня зростає зі збільшенням температури окислення.

Література:

1. *Рябухин А. Г.* Нормальные и обращенные шпинели // Труды конференции. Современные проблемы электрометаллургии. – Челябинск, ЮУрГУ, 2001. – С. 55-58
2. *Хауффе К.* Реакция в твердых телах и на их поверхности. Ч.II. // Пер.с нем.– М.: ИЛ, 1963. – 275 с.
3. *Бенар Ж.* Окисление металлов. – Том 2. – М.: Metallurgia, 1960. – 444 с.
4. *Кофстад П.* Высокотемпературное окисление металлов: пер. с англ./ под ред. *О. П. Колчина.* – Москва: Мир, 1969. – 392 с.
5. *Копыт Н. Н. Калинин В.В. и др.* //сборник тезисов конф. «Дисперсные системы». – 2014. – С. 86-90.
6. *Kalinchak V. V. and Chernenko A. S.* High-temperature heat and mass transfer and stefan flow on the surface of preheated metal particle in cold air // High Temperature. – 2009. – Vol. 47, No. 3. – P. 415–423.
7. *Копыт Н. Н. Калинин В. В. и др.* // сборник тезисов конф. «Дисперсные системы». – 2014. – С. 91-94.

Копит Н. Х., Копит Н. Н., Калинин В. В., Черненко А. С.

**Исследование начальной стадии окисления железа в воздухе.
Часть 2. Интервал температур 400-625°C**

Проводится исследование окисления железа при образовании тонких оксидных пленок по параболическому закону на поверхности железа в результате окисления в воздухе и температуре выше и ниже точки Шадрона (575 °C). Экспериментальное определение зависимости толщины от времени основано на методе возникновения на поверхности окисленной железной пластинки цветов «побежалости». При увеличении толщины оксидной пленки в результате интерференции ее цвет будет последовательно меняться согласно ряду: желтый, оранжевый, красный, пурпурный, фиолетовый и синий. Определяется энергия активации и коэффициент диффузии кислорода через оксид. Показано, что показатель степени в законе окисления при температурах ниже точки Шадрона равняется 2 (параболический закон), а выше точки Шадрона растет с ростом температуры процесса.

Ключевые слова: закон окисления, железо, интерференционная индикация, точка Шадрона.

Kopyt N. Kh., Kopyt N. N., Kalinchak V. V., Chernenko A. S.

**Investigation of the initial stage of iron oxidation in the air.
Part 2. Temperature range 400-625 °C**

SUMMARY

Iron oxidation in the case of formation of thin oxide films on the surface of iron plates as a result of their oxidation in air by a parabolic law at temperatures above (400-550 °C) and below (575 – 600 °C) the Shadronpoint (575 °C) has been studied. Studies are performed on the experimental plant described in the first part of the article, published in this issue of the journal. The experimental determination of the thickness of the oxide film depending on time is based on the method of occurrence of "variability" colors on the surface of the oxidized iron plate. With an increase in the thickness of the oxide film its color as a result of light's interference will consistently vary according to the series: yellow, orange, red, purple, violet and blue. This corresponds to the range of the oxide film's thickness from 46 to 72 nm.

In the temperature range of 400-550 °C, a stable oxide Fe₃O₄ (magnetite) appears on the iron's surface. It was shown that the dependences $\ln h$ of $\ln t$ for all investigated temperatures are linear and have tangents of inclination angles equal to 0.5. The obtained value of the activation energy is constant and equal to $E = 43.0$ kJ/mol.

The oxygen diffusion coefficient $D = 1.73 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ was obtained according to the oxidation model of a metal plate, which is based on the determinant role of oxygen diffusion through an oxide film.

In the temperature range of 550 - 625 °C, the change in the rate of the constant of the interaction between iron and oxygen from the air is due to the stable formation of wustite FeO. All of the oxidation isotherms can be described by the linear dependence in the coordinates $\ln h$ and $\ln t$. It was shown that the index of degree in the oxidation law at the temperatures below the Shadronpoint is equal to 2 (the parabolic law), and above the Shadron point it increases with increasing temperature of the process in accordance with the obtained dependence $n = 2 + 0.008 (T-823)$.

Key words: oxidation law, iron, interference indication, Shadron point