

О.І. Нестеренко<sup>1</sup>, М.Г. Нестеренко<sup>1</sup>, В.М. Сахно<sup>2</sup>

## Кількісна оцінка внеску процесу поверхневої дифузії в масоперенесення при електрохімічному осадженні металів

<sup>1</sup>Український державний хіміко-технологічний університет, м. Дніпро, Україна, [nesko@ukr.net](mailto:nesko@ukr.net)  
<sup>2</sup>Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна, [sakhno1960@gmail.com](mailto:sakhno1960@gmail.com)

У цьому дослідженні зроблена спроба кількісно оцінити внесок процесу поверхневої дифузії в масоперенесення при електрохімічному осадженні металів. Розрахована максимальна густина центрів зародження, при якій можливо виключно дифузійне заростання суцільного шару нової фази. Розраховано час дифузійного заростання суцільного мономолекулярного шару нової фази. Проаналізовано результати незалежних експериментів по знаходженню коефіцієнтів граничної дифузії в двошаровій тонкоплівковій системі платина – нікель. Знайдено значення коефіцієнта граничної дифузії нікелю при температурі 393 К. Зроблена кількісна оцінка частки масоперенесення за рахунок поверхневої дифузії фізадсорбованих атомів відносно загального масоперенесення при електрохімічному осадженні металів. Доведено, що роль процесу поверхневої дифузії в формуванні покриття при електрохімічному осадженні металів є нехтовно малою. Показано, що це є непрямим доказом формування аморфної структури покриття при електрохімічному осадженні металу.

**Ключові слова:** поверхнева дифузія, процес зародження, коефіцієнт поверхневої дифузії, мономолекулярний шар, швидкість росту зародків нової фази, час заростання шару, електрохімічне осадження.

Подано до редакції 25.01.2022; прийнято до друку 23.05.2022.

### Вступ

У численних роботах по теорії електрохімічного осадження металів весь процес розбивається на стадії: 1) перенесення іонів металу через подвійний електричний шар; 2) утворення на поверхні металу основи нейтральних атомів металу, який осаджується; 3) поверхнева дифузія осаджених атомів по поверхні металу основи до енергетично найбільш вигідних місць (центри зародження) і росту надкритичних зародків нової фази. (Навіть у випадку однойменного металу основи новою фазою будемо називати утворення на його поверхні надкритичних зародків, які ростуть, перекидають один одного і перетворюються в суцільний шар).

Поверхнева дифузія є окремою стадією в ланцюжку послідовних стадій масоперенесення. Здавалося б, що будучи самою повільною, поверхнева дифузія буде лімітувати весь процес електрохімічного

осадження, а, як наслідок, буде визначати всю кінетику росту нової фази. Однак, це не так хоча б з тієї причини, що утворення нейтральних атомів на поверхні металу основи йде паралельно з процесом поверхневої дифузії атомів, які були фізадсорбовані раніше. Крім того, якби шар нової фази заростав у результаті тільки поверхневої дифузії, то він був би в більшому ступені близький до кристалічної структури тому, що це енергетично найбільш вигідно для атома, який дифундує на поверхні. У той же час, експериментально було встановлено [1, 2], що при електрохімічному осадженні шар нової фази має аморфну структуру, яка згодом може перетворюватись в кристалічну під дією теплових флуктуацій.

Тому можна стверджувати, що процес поверхневої дифузії не є лімітуючим. Проте необхідно знати: наскільки значною є частка масоперенесення, яке здійснюється поверхневою дифузійною.

На сьогодні кількісної оцінки кінетики поверхневої дифузії при температурах менших  $0,3 T_{пл}$  немає. Немає і методики відповідного розрахунку. Задача ускладнюється відсутністю даних по коефіцієнтам поверхневої дифузії при температурі електрохімічного осадження металів. Тому в чинному дослідженні зроблена спроба:

- 1) розробити алгоритм розрахунку масоперенесення в процесі поверхневої дифузії;
- 2) прогнозувати величину коефіцієнта поверхневої дифузії при температурі електрохімічного осадження металів;
- 3) оцінити внесок поверхневої дифузії в процес масоперенесення при електрохімічному осадженні металів.

## I. Дифузійне заростання шару нової фази

Поява зародків нової фази і їхнє розростання відбувається [3] у поперечному напрямку уздовж міжфазної границі при відсутності нормального росту. При великих градієнтах концентрацій [4] існує заборона нормального росту зародка за межі критичної товщини. Таким чином, зародки нової фази ростуть тільки уздовж поверхні осадження і не ростуть у напрямку перпендикулярному останній.

Залежність частини  $X$  поверхні, яку покривають (займають) зародки нової фази, від часу  $t$  повинна описуватись рівнянням Колмогорова-Аврамі [5]:

$$X = 1 - \exp[-kNt^n], \quad (1)$$

Тут  $k$  - коефіцієнт, що визначається швидкістю росту зародків нової фази;  $N$  - концентрація центрів зародження;  $n$  - показник Аврамі, що визначається розмірністю системи і характером розподілу центрів зародження.

Будемо вважати, що центри зародження розподілені випадково, зародки мають форму круга, швидкість росту  $G$  кожного зародка постійна, а міжфазна границя двовимірна. У цьому випадку, як показано в [6], рівняння Колмогорова-Аврамі приймає вигляд:

$$C(t) = \exp(-N\pi G^2 t^2), \quad (2)$$

тобто показник Аврамі  $n = 2$ .

Нехай ступінь заростання нової фази перевищує 99 % площі всієї поверхні. Тоді рівняння (2) запишеться  $\exp(-N\pi G^2 t_3^2) = 0,01$ . Або, після логарифмування:

$$N\pi G^2 t_3^2 = 4,605, \quad (3)$$

Тут  $t_3$  - час повного заростання шару нової фази в результаті поверхневої дифузії.

Визначимося з порядком величини концентрації центрів  $N$  зародження. Для того, щоб можна було говорити про поверхневу дифузію, як результат випадкового блукання атомів по міжфазній поверхні,

необхідно, щоб мінімальний дифузійний шлях був довжиною хоча б порядку 20 міжатомних відстаней кристалічної ґратки металу [7].

Звідси випливає, що середня відстань між центрами сусідніх зародків повинна бути не менш ніж:

$$\bar{\lambda} \geq 40\delta, \quad (4)$$

Тут  $\delta$  - міжатомна відстань (параметр кристалічної ґратки).

Якщо концентрація центрів зародження дорівнює  $N$ , то в середньому на один центр приходить площа поверхні  $1/N$ . А це значить, що середня відстань між центрами:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{N}}, \quad (5)$$

Тоді з (4) і (5) маємо:

$$N \leq \frac{1}{\bar{\lambda}^2} = \frac{1}{1600\delta^2}$$

Якщо взяти  $\delta = 5 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ , то максимальна густина  $N_{max}$  центрів зародження, при якій можливо виключно дифузійне заростання суцільного шару нової фази, буде дорівнювати:

$$N_{max} = 2,5 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}, \quad (6)$$

Далі, з одного боку, дифузійний шлях (величина [7] порядку  $\sqrt{Dt_3^2}$ ), відповідно до приведених вище міркувань, дорівнює половині середньої відстані між центрами зародків -  $\bar{\lambda}/2$ .

З іншого боку, якщо швидкість росту  $G$  зародків є сталою, то за час  $t_3$  (час повного заростання суцільного шару нової фази в результаті поверхневої дифузії) міжфазна границя в середньому пройде шлях  $Gt_3$ , який теж дорівнює половині середньої відстані між центрами зародків -  $\bar{\lambda}/2$ . Тоді можна записати:

$$Gt_3 = \sqrt{Dt_3^2}, \quad (7)$$

Підставимо (7) в (3) і врахуємо (6). Тоді маємо  $N_{max}\pi Dt_3 = 4,605$ .

Звідси для часу дифузійного заростання суцільного шару нової фази остаточно маємо:

$$t = \frac{4,605}{\pi N_{max} D}, \quad (8)$$

Тут  $D$  - коефіцієнт поверхневої дифузії.

Згідно (8), час дифузійного заростання суцільного шару нової фази тим більше, чим менше густина центрів зародження і чим менше коефіцієнт поверхневої дифузії.

## II. Оцінка величини коефіцієнта поверхневої дифузії

При об'ємній дифузії [8] атоми переміщуються тільки через дефекти (обмін місцями, вакансії, міжвузелля) по механізму випадкових блукань. Погранична дифузія аналогічна "...вуличному руху на вулиці, яка обмежена нерухомими стінками..." [8]. Поверхнева дифузія обмежена тільки поверхнею, по котрій вона здійснюється. Як показано в [8], коефіцієнти об'ємної дифузії  $D_v$ , дифузії по границям зерен  $D_B$  і поверхневої дифузії  $D_F$  повинні задовольняти нерівності  $D_v < D_B < D_F$ .

Фішер [9], зробивши ряд допущень, що спрощують розгляд, вивів для опису поверхневої дифузії рівняння:

$$C = C^0 \frac{\exp\left(-\sqrt{\frac{4D_v}{\pi t}}\right)}{\sqrt{\delta D_B}} \cdot x \cdot \operatorname{erf} \frac{x}{\sqrt{D_v t}}$$

Тут  $C^0$  - середнє значення концентрації в момент  $t = 0$ ;  $C$  - концентрація атомів, які продифундували за час  $t$ ;  $\delta$  - товщина поверхневого дифузійного шару.

У припущенні, що  $\delta = 5 \cdot 10^{-10}$  м (на поверхні утворюється мономолекулярний шар) була проведена оцінка, яка показала, що коефіцієнт граничної дифузії може перевищувати коефіцієнт об'ємної дифузії в  $10^5$  разів.

Методом Оже-спектроскопії [10], при безпосередньому вимірюванні кількості речовини, що накопичилася на вільній поверхні плівки в процесі дифузійного відпалу, були визначені коефіцієнти дифузії в двошаровій тонкоплівковій системі Pt - Ni. Відповідно моделі, що була прийнята в [10], дифузія нікелю з одного шару в інший протікає по границям зерен з наступним більш прискореним розподілом дифузанта на вільній поверхні. У цьому випадку рішення для поверхневої концентрації компонента має вигляд:

$$1 - \bar{C}_{s0} = \exp\left(\frac{k' \delta}{2\delta'} \cdot \frac{l}{L} \cdot \frac{\bar{D}_B \tau}{l^2}\right).$$

Тут  $\bar{C}_{s0}$  - середня поверхнева концентрація компонента, що дифундує;  $\bar{D}_B$  - середній коефіцієнт граничної дифузії компонента;  $\tau$  - час відпалу зразка при постійній температурі;  $l$  - товщина шару матеріалу, в якому досліджується дифузія;  $L$  - розмір зерна;  $\delta'$  - товщина аналізованого шару;  $\delta$  - товщина границі зерна ( $\delta = \delta'$ ).

$$k' = C_B / C_S$$

Тут  $C_B$  - концентрація дифузанта в шарі, що досліджується;  $C_S$  - концентрація дифузанта на вільній поверхні.

Коефіцієнт об'ємної дифузії нікелю (для діапазону температур 1314 К - 1674 К) можна визначити [10] за формулою:

$$D_v = 4,9 \cdot 10^{-2} \cdot \exp\left(-\frac{55700}{RT}\right).$$

Екстраполяція цієї залежності в область температур 523 - 623 К дає величину коефіцієнта об'ємної дифузії  $D_v = 2,2 \cdot 10^{-25} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Як показали результати експерименту [10], величина коефіцієнта граничної дифузії в діапазоні температур 523 - 623 К (дивись таблицю 1) набагато перевищує величину коефіцієнта об'ємної дифузії.

Енергія активації граничної дифузії нікелю в діапазоні температур 523 - 623 К дорівнює  $Q = 41400 \text{ Дж/моль}$  [10].

**Таблиця 1**

Залежність коефіцієнта граничної дифузії нікелю від температури

$T, K$	$D_v, \text{м}^2/\text{с}$
523	$8 \cdot 10^{-18}$
573	$2 \cdot 10^{-17}$
623	$3,16 \cdot 10^{-17}$

Проведений в [11] більш детальний облік особливостей цього дифузійного експерименту дозволив одержати більш коректну формулу для розрахунку граничної дифузії:

$$D_1 = H \frac{\delta' L}{\delta} \left(\frac{D_1}{D_2} l_2 + l_1\right) \cdot \left(\frac{l_2}{l_1} + \frac{1}{1 + \frac{D_1 l_2}{D_2 l_1}}\right)$$

Тут  $H$  - величина, яка розраховується по нахилу експериментальних кривих при малих значеннях  $t$ ;  $D_1, D_2$  - коефіцієнти дифузії в першій і другій плівках, відповідно;  $l_1, l_2$  - товщини першої і другої плівок відповідно.

Розрахунок коефіцієнта граничної дифузії по цій формулі дозволив одержати наступні дані:  $D_B = 5,6 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2/\text{с}$  при 523 К.

Залежність коефіцієнта дифузії від температури по Арреніусу має вигляд:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

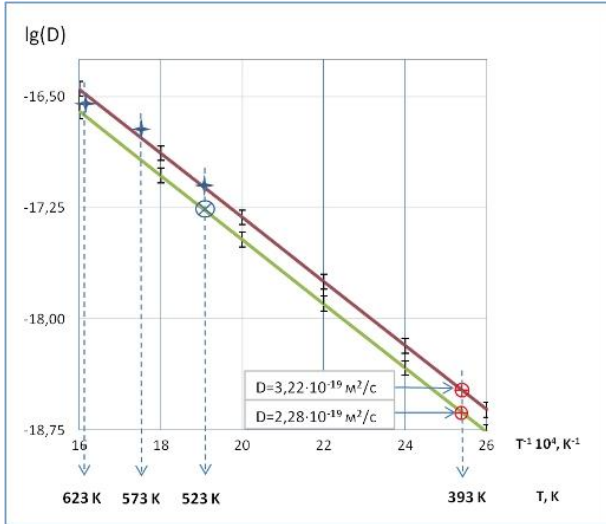
Тут  $D$  - коефіцієнт дифузії при температурі  $T$ ;  $D_0$  - коефіцієнт;  $Q$  - енергія активації;  $R$  - універсальна газова стала.

Після логарифмування рівняння Арреніуса маємо:

$$\lg D = \lg D_0 - \frac{Q \cdot \ln e}{R} \cdot \frac{1}{T}$$

Тоді в координатах  $\lg D - \frac{1}{T}$  залежність Арреніуса буде мати вид прямої.

Використаємо значення коефіцієнта граничної дифузії нікелю при температурах 523 К – 623 К, а також енергію активації граничної дифузії  $Q = 41400$  Дж/моль для кількісної оцінки коефіцієнта граничної дифузії нікелю при температурі ( $T = 393$  К) характерній для процесу електрохімічного осадження металів (рис. 1).



**Рис. 1.** Залежність граничного коефіцієнта дифузії нікелю від температури:  $\blacklozenge$  - дані [10];  $\otimes$  - дані [11];  $\oplus$  - значення екстрапольованих по [10] і [11] коефіцієнтів граничної дифузії при температурі процесу електроосадження металів ( $T = 393$  К).

Екстраполяція залежності Арреніуса в область низьких температур (393 К), проведена на основі експериментальних даних робіт [10] і [11], дає значення коефіцієнтів граничної дифузії нікелю, які дорівнюють від  $2,28 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с}$  до  $3,22 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с}$ . Ці значення і візьмемо за основу для кількісної оцінки ролі поверхневої дифузії при масоперенесенні під час електрохімічного осадження металів.

### III. Розрахунок частки масоперенесення, здійснюваного поверхневою дифузією, при електрохімічному осадженні металів

Густина електричного струму в електролітах при електрохімічному осадженні металів дорівнює:

$$j = e^+ n^+ u^+ + e^- n^- u^-$$

Тут  $e^+, e^-$  - абсолютна величина зарядів позитивного і негативного носіїв, відповідно;  $n^+, n^-$  - число позитивних і негативних носіїв заряду в одиниці об'єму, відповідно;  $u^+, u^-$  - швидкості направлено руху, які мають позитивні і негативні носії заряду під дією електричного поля відповідно.

Звідси випливає, що при електрохімічному

осадженні металів потік йонів металу створює густину струму, яка дорівнює половині густини електричного струму  $j$ . А отже, на одиниці поверхні за одиницю часу осаджується число  $n_a$  атомів металу, яке дорівнює  $n_a = \frac{j}{2e}$ . Тут  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  - величина елементарного заряду.

За час  $t$  при електроосадженні на одиниці площі метала осідає  $N_a$  атомів металу, що наноситься:

$$N_a = n_a t = \frac{jt}{2e}, \quad (9)$$

Час заростання шару нової фази визначається рівнянням (8). По приведеним у п. 2 розміруванням, шар нової фази можна вважати мономолекулярним шаром. А якщо відстань між атомами дорівнює  $\delta = 5 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ , то одиниця поверхні мономолекулярного шару буде складатися з  $N_m$  атомів, тобто:

$$N_m = \frac{1}{\delta^2} = 4 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}, \quad (10)$$

Таким чином, з (8) визначається час  $t_3$  дифузійного заростання суцільного шару нової фази на поверхні металу основи при обраній густині центрів зародження  $N \leq N_{max}$  (дивись п. 2), а також з використанням здобутого в п.3 значення коефіцієнта граничної дифузії. За цей час процесом поверхневої дифузії було перенесено  $N_m$  атомів. Величина  $N_m$  визначена в (10). Підставивши час  $t_3$  в (9) можна визначити число атомів  $N_a$ , які були осаджені за час дифузійного заростання мономолекулярного шару нової фази. У рамках формалізму чинного розгляду,  $N_m$  атомів брали участь у процесі поверхневої дифузії від місця їхнього осадження до міжфазних границь зростаючих зародків нової фази. В той же час  $(N_a - N_m)$  атомів « не брали» участі у процесі поверхневої дифузії.

Тоді частину масоперенесення, яку здійснює поверхнева дифузія при електрохімічному осадженні металів можна визначити як  $\varepsilon = \frac{N_m}{N_a}$ .

З урахуванням (8) - (10) останній вираз остаточно запишеться:

$$\varepsilon = \frac{N_m}{N_a} = \frac{1,28}{4,605} \cdot \frac{\pi ND}{j} = 0,873 \frac{ND}{j} \quad (11)$$

Як видно з (11), роль поверхневої дифузії буде зменшуватися при зменшенні густини центрів зародження нової фази і збільшенні густини електричного струму процесу електрохімічного осадження металів.

Зробимо кількісні оцінки величини  $\varepsilon$  при традиційних для процесу електрохімічного осадження густинах електричного струму і різних густинах центрів зародження нової фази. Згідно [8], коефіцієнт поверхневої дифузії при температурі ( $T = 393$  К) буде

Таблиця 2

Частка  $\varepsilon$  масоперенесення, яке здійснюється поверхневою дифузією при електроосадженні нікелю для різних густин центрів зародження нової фази і густин струму.

$N, \text{ м}^{-2} \backslash j, \text{ А/м}^2$	125	250	500	625	750
$2,5 \cdot 10^{15}$	$3,98 \cdot 10^{-4} \%$	$1,99 \cdot 10^{-4} \%$	$9,95 \cdot 10^{-5} \%$	$7,96 \cdot 10^{-5} \%$	$6,63 \cdot 10^{-5} \%$
$10^{14}$	$1,59 \cdot 10^{-5} \%$	$7,96 \cdot 10^{-6} \%$	$3,98 \cdot 10^{-6} \%$	$3,18 \cdot 10^{-6} \%$	$2,65 \cdot 10^{-6} \%$
$10^{13}$	$1,59 \cdot 10^{-6} \%$	$7,96 \cdot 10^{-7} \%$	$3,98 \cdot 10^{-7} \%$	$3,18 \cdot 10^{-7} \%$	$2,65 \cdot 10^{-7} \%$

$D < 2,28 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с}$ . Результати розрахунків по формулі (11) приведені в таблиці 2.

Залежності частки  $\varepsilon$  масоперенесення, здійсненого поверхневою дифузією, від густини струму при електроосадженні нікелю приведені на рис. 2 і являють собою гіперболи.

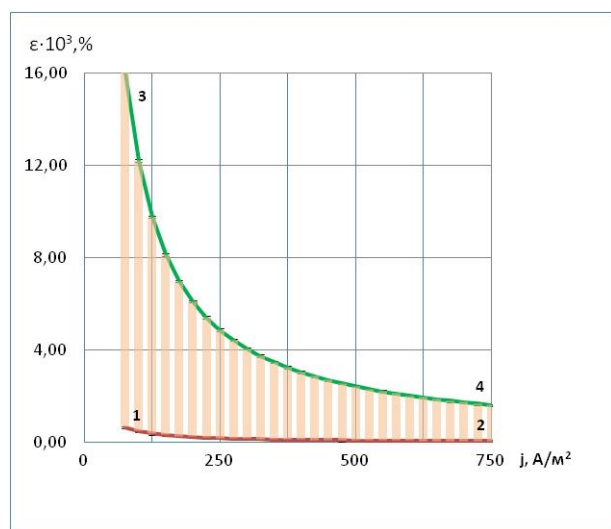


Рис. 2. Кількісна оцінка внеску процесу поверхневої дифузії в масоперенесення при електрохімічному осадженні металів.

Перша з них (крива 1-2) побудована на основі коефіцієнта дифузії  $D = 2,28 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с}$ , розрахованого в даній роботі, і показує, що частка  $\varepsilon$  поверхневої дифузії в загальному масоперенесенні при електроосадженні нікелю не перевищує  $2,1 \cdot 10^{-4} \%$ . Навіть якщо використовувати значення коефіцієнта дифузії  $D_B = 5,6 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2/\text{с}$ , отриманого в [11] для температури 523 К (крива 3-4), то значення  $\varepsilon$  не перевищує  $2,4 \cdot 10^{-3} \%$ . Область між

кривими 1-2 і 3-4 на рис. 2 являє собою область можливих значень  $\varepsilon$  у межах значень коефіцієнта дифузії від розрахункового, отриманого в даній роботі при 393 К, до свідомо завищеного (тому, що він відповідає температурі 523К), отриманого незалежно [11].

## Висновки

1. При температурі електрохімічного осадження металів роль процесу поверхневої дифузії нехтовно мала. Частина масоперенесення, яка здійснюється поверхневою дифузією, в порівнянні з загальним масоперенесенням при електрохімічному осадженні металів не перевищує величини  $\varepsilon \leq 2,5 \cdot 10^{-3} \%$ .

2. Значення коефіцієнта граничної дифузії нікелю при температурі 393 К лежить в інтервалі від  $2,28 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с}$  до  $3,22 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с}$ .

3. Як впливає з пп. 1-2 чинних висновків, формування покриття при електрохімічному осадженні металу відбувається зі швидкостями, які значно перевищують швидкості дифузійних процесів при цій температурі. Але ж саме дифузійне зростання нової фази створює упорядковану (кристалічну) структуру. Тому, нехтовно мала роль дифузійних процесів може бути одним з доказів формування аморфної структури покриття при електрохімічному осадженні металу.

**Нестеренко О.І.** - професор кафедри енергетики, д.ф.-м.н.;

**Нестеренко М.Г.** - к.ф.-м.н., доцент кафедри програмного забезпечення інформаційно-вимірювальної техніки,;

**Сахно В.М.** - к.ф.-м.н., доцент кафедри вищої математики та фізики.

- [1] B.B. Damaskin, O.A.Petriy, G.A.Tsirlina, Electrochemistry (Chemistry, Moscow, 2006).
- [2] T.A. Tochitsky, L.V. Nemtsevich, A.E. Dmitrieva, Single Component Adsorption on Solid Surface with Consideration of Its Deformation, The Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 7, 91 (2010).
- [3] V.S. Antonyuk, G.S. Timchik, Yu.Yu. Bondarenko, Yu.I. Kovalenko, M.O. Bondarenko, R.P. Gaidash, Coatings in instrument making: monograph (NTUU "KPI", Kyiv, 2016).
- [4] A.M. Gusak, A.O. Bogatyrev, Initial stage of the reactive diffusion: some new results, Physics of Metals and Advanced Technologies, 16(9), 28 (1994); <https://doi.org/10.15407/mfint>.
- [5] S.V. Divinskii, L.N. Larikov, Self-diffusion in ordered intermetallic compounds with the L 1 (2) structure, Physics of Metals and Advanced Technologies, 19(9), 14 (1997); <https://doi.org/10.15407/mfint>.

- [6] G.V Lutsenko, A.M. Gusak, Model of formation of an initial layer of an intermediate phase, *Physics of Metals and Advanced Technologies*, 22(4), 62 (2000); <https://doi.org/10.15407/mfint>.
- [7] Ya.E. Geguzin, *Diffusion zone* (Science, Moscow, 1979).
- [8] K. Hauffe, *Reactions in solids and on their surfaces* (Publishing house of Foreign Literature, Moscow, 1962).
- [9] J.C. Fisher, Calculation of Diffusion Penetration Curves for Surface and Grain Boundary Diffusion, *Journal of Applied Physics*, 22, 74 (1951); <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.1699825>.
- [10] S. M. Voloshko, A. M. Shalayev, O.A. Yakubtsov, Diffusion of Ni and Pt in a Two-Layer Thin-Film System, *Metallofizika* 10(1), 109 (1988); <https://doi.org/10.15407/mfint>.
- [11] S.M. Voloshko, A.M. Gusak, A.M. Shalayev, Elementary theory of grain-boundary interdiffusion in a thin two-layered film, *Physics of metals and metallography* 69(3), 73 (1990).

A.I. Nesterenko<sup>1</sup>, N.G. Nesterenko<sup>1</sup>, V.N. Sakhno<sup>2</sup>

## Quantitative Estimate of the Contribution of the Surface Diffusion Process to Mass Transfer during Electrochemical Deposition of Metals

<sup>1</sup>*Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine, [nesko@ukr.net](mailto:nesko@ukr.net)*

<sup>2</sup>*Dniprovsk State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine, [sakhno1960@gmail.com](mailto:sakhno1960@gmail.com)*

In this study, an attempt was made to quantify the contribution of the surface diffusion process to mass transfer during electrochemical deposition of metals. The maximum density of nucleation centers is calculated, at which only diffuse overgrowth of a continuous layer of a new phase is possible. The time of diffusion overgrowth of a continuous monomolecular layer of a new phase is calculated. The results of independent experiments on the determination of boundary diffusion coefficients in a two-layer platinum-nickel thin-film system are analyzed. The value of the boundary diffusion coefficient of nickel at a temperature of 393 K was found. The part of mass transfer due to surface diffusion of physically adsorbed atoms in relation to the total mass transfer during electrochemical deposition of metals has been quantified. It is proved that the role of the surface diffusion process in the formation of the coating during electrochemical deposition of metals is insignificant. It is shown that this is an indirect proof of the formation of an amorphous coating structure during electrochemical deposition of metal.

**Key words:** surface diffusion, nucleation process, surface diffusion coefficient, monomolecular layer, growth rate of nucleus of a new phase, layer overgrowth time, electrochemical deposition.