

12. Антонюк В.С. Залишкові напруження в вакуум-плазмових покриттях TiN, (TiAl)N, (TiC)N / В.С. Антонюк, О.Б. Сорока, А.В. Рутковський, В.І. Мірненко // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – Луганськ, 2004. – № 7(77) (Частина 2). – С. 206–210.
13. Teixeira V. Residual stress and cracking in thin PVD coatings / V. Teixeira // Vacuum. – 2002. – V. 64, № 3-4. – С. 393–399.
14. The interrelationship between internal stress, processing parameters and microstructure of physically vapour deposited and thermally sprayed coatings / D.S. Rickerby, G. Eckold, K.T. Scott / Thin Solid Films. – 1987. – V. 154, № 1-2. P. 125–141.
15. Пат. 101477030 CN. G01N19/04. Measuring method for residual stress in coating / Binshi Xu, Xiancheng Zhang, Haidou Wang; Yixiong Wu. – № 200810055923.1 ; заявл. 02.01.2008 ; опубл. 08.07.2009.
16. Пат. UA №28383: GO 1L1/06. Спосіб визначення структурних і температурних складових залишкових напружень в покриттях / Антонюк В.С., Сорока О.Б., Клименко С.А., Копейкіна М.Ю. – № u200707507 ; заявл. 04.07.2007 ; опубл. 10.12.2007
17. А.с. 1805307. G01L1/00. Способ определения остаточных напряжений в полосовых заготовках / Колмогоров Г.Л. – № 4888114/28 ; заявл. 06.12.1990 ; опубл. 30.03.1993 ; Бюл. № 12.

Рецензія/Peer review : 5.11.2015 р.

Надрукована/Printed :4.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Капун В.Г.

УДК 669.1:537.5

І.М. ПАСТУХ, В.В. ЛЮХОВЕЦЬ
Хмельницький національний університет

ВНУТРІШНІ ЛОКАЛЬНІ ВИНЯТКИ ПОВЕРХНІ, АЗОТОВАНОЇ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ

Кваліфіковані типи локальних винятків поверхні, розглянуто їх вплив на концентрацію електричного поля та її зміну як фактор нерівномірності результатів модифікації. Введено критерій концентрації поля, вирішена аналітична задача взаємозв'язків геометрії поверхні та параметрів електричного поля. Досліджено вплив розмірів внутрішніх локальних винятків на концентрацію електричного поля. Результати досліджень можуть бути використані для точного визначення розподілу густини струму по поверхні як параметра технологічного режиму.

Ключові слова: азотування, тліючий розряд, поверхня, внутрішні локальні винятки.

I.M. PASTUKH, V.V. LUHOVEC
Khmelnitsky National University

INSIDE LOCAL EXCEPTIONS OF SURFACE NITRIDING BY GLOW DISCHARGE

The kinds of local exceptions of surface are qualified. Their influence on the concentration of the electric field and its change as a factor of the uneven modification results is considered. The criterion of concentration field is established. Analytical problem of relationship of surface geometry and parameters of the electric field is solved. The influence of the internal local exceptions size to the concentration of the electric field is investigated. The research results can be used for accurately determination of the current density distribution on the surface as a parameter of technological regime. The proposed analytical apparatus can be used for calculating the parameters of the electric field concentration in a glow discharge, which is used for the surface modification of metal parts.

Keywords: nitriding, glow discharge, surface, internal local exceptions.

Вступ

Розподіл густини струму по металевій поверхні, яка модифікується азотуванням в тліючому розряді, відіграє суттєву роль насамперед як параметр режиму, котрий відноситься до групи енергетичних характеристик технології. Наявність локальних винятків поверхні – як зовнішніх у вигляді гострих ребер, виступів, тощо, так і внутрішніх, що мають форму пазів, отворів – призводить в цих місцях до концентрації поля і густини струму. В свою чергу локальне підвищення передачі енергії, яке характерне для локальних винятків, обумовлює більш інтенсивне порівняно з рештою поверхні її нагрівання. Негативні наслідки подібного ходу процесу можуть призвести до місцевого перегрівання поверхні, відтак – до відпуску, зниження фізико-механічних показників модифікованої деталі. До подібних же наслідків призводить також більша порівняно з іншою частиною поверхні швидкість нагрівання садки.

Теоретичні основи взаємодії електричного поля із зовнішніми локальними винятками поверхні розглянуті в [1, 2]. Стосовно питань, пов'язаних з теорією внутрішніх локальних винятків поверхні, там же наводяться тільки самі загальні відомості про них та основні принципи вирішення задачі. З цієї причини головною метою цієї роботи є розробка аналітичних основ взаємодії електричного поля з внутрішніми локальними винятками поверхні. При цьому в якості моделі вибрано найбільш загальний варіант – внутрішній локальний виняток клиновидної форми. Пази прямокутного перетину, отвори відносно малого діаметра становлять окремих, більш простий варіант прийнято до розгляду схеми.

Постановка завдання

Як зазначалось вище, в найбільш ускладненому варіантові внутрішні локальні винятки поверхні, що призводять до суттєвої концентрації електричного поля, мають форму клиновидного паза (рис. 1), причому розміри його, особливо ширина на вході, порівнянні з шириною області катодного падіння (ОКП). В залежності від цього співвідношення ОКП всередині паза може частково або навіть повністю (в напрямку глибини паза) взаємно перекриватись. Введемо поняття зон повного (А), часткового (В) перекриття та зони звичайного розряду (С). Характер перекриття, як буде показано вище, відіграє суттєву роль у визначенні траєкторії руху електронів, які вилетіли з поверхні, оскільки в зонах А та В вони перебувають під силовим впливом одночасно двох полів від двох стінок паза. Рухаючись в проміжку між цими стінками під впливом просторової системи сил, електрони можуть перетинати лінію симетрії паза, тобто траєкторія їх руху відповідає в певній мірі коливальному рухові, що суттєво збільшує довжину шляху, котрий пройде електрон в порівнянні з рухом по нормалі до поверхні в ОКП звичайного розряду. Відповідно цьому зростає ймовірність іонізаційних процесів, що в свою чергу призводить до локального зростання струму розряду.

Очевидно, що співвідношення довжин зон перекриття суттєво змінюється залежно від порівняння ширини паза з шириною ОКП δ . Критичною межею є відношення рівності половини ширини паза b та ширини ОКП, при якому весь внутрішній простір паза є зоною повного перекриття.

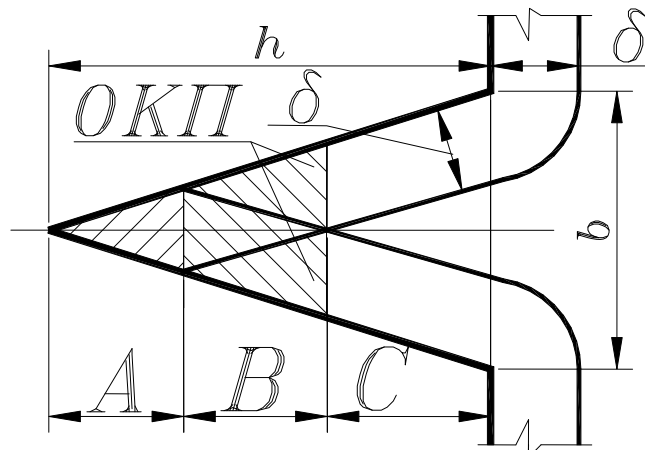


Рис. 1. Схема внутрішнього локального винятку поверхні (А – зона повного перекриття розряду, В – часткового, С – звичайного розряду)

При переході до паза прямокутної форми або отвору слід врахувати особливості перекриття ОКП, а також відомий з літератури по розряду з пустотілим катодом факт стосовно розподілу електричного поля вздовж паза. Мається на увазі встановлений експериментально розподіл поля на глибину не більше подвійної ширини паза (двох діаметрів отвору) [3].

Аналітична модель внутрішніх локальних винятків поверхні

Розрахункова схема внутрішнього локального винятку поверхні у вигляді клиноподібного паза показана на рис. 2.

Розміри паза співвідносяться

$$b/2h = \operatorname{tg} \phi/2, \text{ звідки } \phi = \operatorname{arctg} b/2h.$$

Рівняння верхньої грані паза $y = x \cdot \operatorname{tg} \phi/2$, нижньої $y = x \cdot (-\operatorname{tg} \phi/2) = x \cdot \operatorname{tg}(-\phi/2)$.

В зонах повного або часткового перекриття полів на електрон, який вилетів з будь-якої точки на грані (наприклад – з нижньої) і початкові координати якої x_0, y_0 , можуть одночасно діяти три електричних поля: поперечні від двох граней E_1 і E_2 та поздовжнє E_a . Враховуючи прийнятий лінійний закон розподілу напруженості поперечних полів $E(x)$ та параболічний закон зміни падіння напруги в ОКП – $U(x)$ [1], напруженості поля визначаються

$$E_1 = \frac{2U_K}{\delta} \left(1 - \frac{r_1}{\delta}\right),$$

$$E_2 = \frac{2U_K}{\delta} \left(1 - \frac{r_2}{\delta}\right).$$

$$E_a = \frac{2U_K}{\Delta_B} \left(1 - \frac{x}{\Delta_B}\right),$$

де U_K – катодне падіння напруги,
 δ – ширина ОКП,

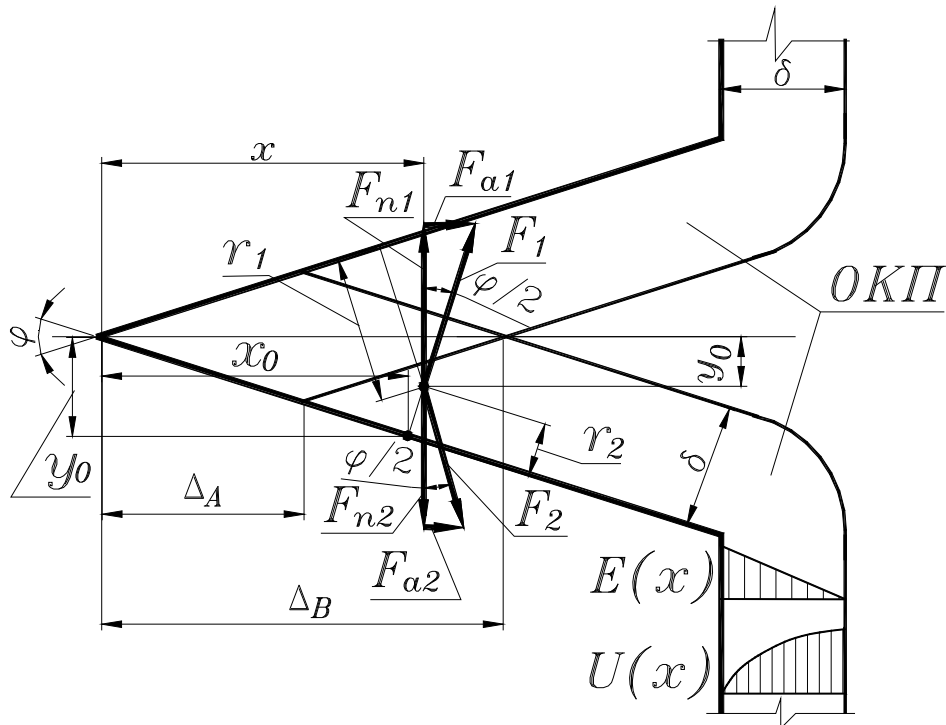


Рис. 2. Розрахункова схема внутрішнього локального винятку поверхні

r_1, r_2 – поточні відстані від електрона до граней паза,

Δ_B – відстань від вершини паза до межі області часткового перекриття,

$$\Delta_B = \frac{\delta}{\sin(\arctan(b/2h))}.$$

Поточні відстані від електрона до граней визначаються

$$r_1 = \frac{0,5bx + hy}{\sqrt{\frac{b^2}{4} + h^2}}, \quad r_2 = \frac{-0,5bx + hy}{\sqrt{\frac{b^2}{4} + h^2}}.$$

Поздовжня сила, яка діє на електрон

$$F_a = q_e E_a,$$

де q_e – заряд електрона.

Результуюча сила, яка діє на електрон в поперечному напрямку

$$F_n = F_{n1} - F_{n2} = F_1 \cos \frac{\phi}{2} - F_2 \cos \frac{\phi}{2} = q_e \cdot \cos \frac{\phi}{2} \left(\frac{2U_k}{\delta} \left(\frac{r_2}{\delta} - \frac{r_1}{\delta} \right) \right).$$

Результуюча сила в поздовжньому напрямку

$$F_a = F_{a1} + F_{a2} + q_e E_a = F_{n1} \sin \frac{\phi}{2} + F_{n2} \sin \frac{\phi}{2} + q_e \frac{2U_k}{\Delta_B} \left(1 - \frac{x}{\Delta_B} \right).$$

Сума проєкцій всіх сил, які діють в горизонтальному напрямку

$$F_a = F_{a1} + F_{a2} + q_e E_a = F_{n1} \sin \frac{\phi}{2} + F_{n2} \sin \frac{\phi}{2} + q_e \frac{2U_k}{\Delta_B} \left(1 - \frac{x}{\Delta_B} \right).$$

Сума проєкцій всіх сил на горизонтальну вісь

$$\sum X_i = m_e \frac{d^2 x}{dt^2} = F_a.$$

Сума проєкцій всіх сил на вертикальну вісь

$$\sum Y_i = m_e \frac{d^2 y}{dt^2} = F_n.$$

Двічі інтегруючи, отримаємо для горизонтальної вісі

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{F_a}{m_e}; \quad \frac{dx}{dt} = \frac{F_a}{m_e} t + C_1; \quad x = \frac{F_a}{2m_e} t^2 + C_1 t + C_2.$$

Аналогічно для вертикальної вісі

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{F_n}{m_e}; \quad \frac{dy}{dt} = \frac{F_n}{m_e} t + C_3; \quad y = \frac{F_n}{2m_e} t^2 + C_3 t + C_4.$$

Сталі інтегрування визначаються, якщо врахувати, що при $t=0$,

$$\frac{dx}{dt} = 0; \quad x = x_0; \quad C_2 = x_0; \quad C_1 = 0; \quad x = \frac{F_a t^2}{2m_e} + x_0,$$

$$\frac{dy}{dt} = 0; \quad y = y_0; \quad C_4 = y_0; \quad C_3 = 0; \quad y = \frac{F_n t^2}{2m_e} + y_0.$$

Коефіцієнт концентрації поля визначається як відношення сумарної довжини траєкторій електронів в межах зони перекриття до сумарної довжини траєкторій електронів на плоскій ділянці лінії грані, довжина якої

$$\frac{\delta}{\operatorname{tg}(\phi/2)}.$$

Якщо врахувати, що

$$t^2 = \frac{1}{\frac{F_a}{2m_e}} (x - x_0) = \frac{1}{\frac{F_n}{2m_e}} (y - y_0),$$

то

$$\frac{2m_e}{F_a} (x - x_0) = \frac{2m_e}{F_n} (y - y_0); \quad \frac{(x - x_0)}{F_a} = \frac{(y - y_0)}{F_n}; \quad \frac{y}{F_n} = \frac{(x - x_0)}{F_a} + \frac{y_0}{F_n},$$

звідки

$$y(x) = \frac{F_n}{F_a} (x - x_0) + y_0.$$

Таким чином, коефіцієнт концентрації поля для внутрішніх локальних винятків в формі клиноподібного паза

$$K_E = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta/\operatorname{tg}(\phi/2)} \left(\int_{x_0}^{\Delta_B} \sqrt{1 + \left(\frac{d(y(x))}{dx} \right)^2} dx \right) dX.$$

Висновки

Запропонований аналітичний апарат може застосовуватись для розрахунку показників концентрації електричного поля в тліючому розряді, який використовується для поверхневої модифікації металевих деталей.

Література

1. Пастух И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / И. М. Пастух. – Х. : Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», 2006. – 364 с.
2. Пастух І. М. Зовнішні локальні винятки металевих поверхонь та їх вплив на параметри режиму модифікації / І. М. Пастух // Вісник ТУП, Хмельницький, 2001, №3, ч. 1, Технічні науки, с. 43-47.
3. Москалев Б. И. Разряд с полым катодом / Москалев Б. И. – М. : Энергия, 1969. – 184 с.

Рецензія/Peer review : 30.10.2015 р.

Надрукована/Printed : 4.12.2015 р.

Стаття рецензована редакційною колегією