

**АНАЛІТИЧНІ КРИТЕРІЇ УТВОРЕННЯ НІТРИДІВ ПРИ АЗОТУВАННІ
В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ З НЕСТАЦІОНАРНИМ ЖИВЛЕННЯМ**

Запропоновано систему аналітичних показників, з допомогою яких проводиться оцінка взаємодії падаючого потоку з металевою поверхнею при азотуванні в тліючому розряді з нестационарним живленням

The analytical indexes system which co-operating estimate particles of stream with a metallic surface at nitriding in glow discharge with the variable delivery is offered

Ключові слова: азотування, тліючий розряд, нестационарне живлення, утворення нітридів, аналітичні критерії

Модифікаційні процеси металевих поверхонь з використанням в якості активатора тліючого розряду можуть базуватись на застосуванні розряду з постійним (умовно постійним, стаціонарним) або нестационарним живленням. Обґрунтування системи аналітичних показників, за допомогою яких якісно відображаються головні субпроцеси для випадку розряду із стаціонарним живленням, приведені в [1-7]. Вибір цих характеристик базувався на запропонованій в означених роботах енергетичній моделі процесу, фундаментальні положення якої зводяться до наступного:

- при певних умовах, обумовлених як видом поверхні, так і характеристиками технологічного режиму, будь-які з субпроцесів можуть мати місце (перелік субпроцесів приведено та детально проаналізовано з точки зору значимості в [1, 2, 8]);
- ймовірність певного субпроцесу визначається відповідністю енергетичного спектру падаючого потоку (ЕСПП) енергетичним характеристикам, у рамках яких цей субпроцес можливий;
- першочергово проходять ті субпроцеси, які в поточних конкретних умовах енергетично найбільш вигідні;
- через адсорбційний шар падаючий потік значною мірою впливає як на поверхню, котра модифікується, так і на компоненти газового середовища, адсорбовані поверхнею та знаходяться на поверхні;
- концентрація атомарного азоту суттєво впливає на інтенсивність азотування в тліючому розряді (АТР), основним джерелом його генерації є дисоціація молекул електронним ударом або рекомбінація молекулярних іонів безпосередньо на поверхні.

Ці положення енергетичної моделі становлять першооснову формування системи оцінок АТР, включаючи його кінцеві результати, а також оптимізацію технологічних режимів. Практична перевірка використання аналітичних критеріїв в повній мірі підтвердила тезу про те, що запропонована система показників відображає якісні співвідношення між компонентами процесу модифікації металевих виробів з використанням АТР при стаціонарному живленні [9]. При цьому тезу про якісний характер оцінки слід розуміти як фактор того, що за допомогою розробленої системи параметрів можливе тільки співставлення відношень наслідків модифікації при різних комбінаціях параметрів технологічних режимів, а не абсолютні значення результатів. Подібна задача в принципі теж може бути вирішена тільки після значних додаткових досліджень вагомості кожної з критеріальних оцінок та відповідності їх конкретним характеристикам, наприклад, фазовому складу поверхневого модифікованого шару, твердості, зносостійкості тощо.

Теоретичні положення енергетичної моделі процесів модифікації поверхні металу з використанням вакуумно-дифузійних газорозрядних технологій (ВДГРТ), викладені в [1, 2] переважно для варіанту умовно постійного (стаціонарного) живлення, передбачають використання системи показників (факторів), за допомогою яких прогнозується оцінка впливу як матеріалу оброблюваної поверхні, так і параметрів технологічного режиму на кінцеві результати АТР. Термін «умовно постійне живлення» слід трактувати саме так з врахуванням того, що навіть при наявності фільтрів будь-якої складності сама природа регулювання величини напруги на електродах розрядної камери з використанням тиристорних схем передбачає певні пульсації струму.

Як зазначалось в [10], параметри технологічного процесу умовно можна розділити на режимні або базові (тиск, температура, склад газового середовища та інше) і енергетичні (напруга між електродами та густина струму). Базові параметри першої групи навіть при змінному характері живлення можна вважати умовно стабільними. В першу чергу це безперечно для процесів з макрофазовою структурою, а тим більше для переважно використовуваних в найпростішому варіанті технології - монофазних, оскільки в цьому випадку відслідковування та підтримка стабільного рівня базових характеристик процесу не становить скільки-небудь складної технічної задачі. Принагідно нагадаємо, що поняття макрофази виходить з того, що тривалість певної фази процесу порівнянна з загальною тривалістю модифікації, а поняття мікрофази стосується до тих елементів процесу, тривалість котрих порівнюється з часом переходу тліючого розряду в дуговий. При переході з однієї макрофази до іншої завжди є можливість внесення необхідних коректив в параметри режиму, а тривалість перехідних процесів в порівнянні з часом всієї обробки настільки незначна, що не може хоч як суттєво вплинути на наслідки модифікації. У випадку ж застосування структурно

мікрофазних режимів, наприклад – циклічно комутованого розряду, період мікрофази настільки малий, що характер релаксації підведеної до об'єкту енергії в межах одного циклу практично стабільний і базові параметри режиму реально незмінні.

Система аналітичних факторів розділяється на дві групи: фактори утворення нітридів в приповерхневому шарові та показники впливу падаючого потоку на структуру поверхні. Фактори першої групи окрім параметрів технологічного режиму (склад газового середовища, напруга між електродами U , густина струму j , температура поверхні T , тиск в розрядній камері p) залежать також від матеріалу, з якого виготовлені об'єкти обробки, насамперед – від їх хімічного складу. Головний принцип формування зазначених факторів зводиться до вичленення з енергетичного спектру падаючого потоку (ЕСПП) тільки тих часток, енергія котрих з врахуванням умов її передачі часткам поверхні знаходиться в межах, які забезпечують реакцію утворення нітридів. Ключовим моментом подібної селекції енергетичного спектру є обов'язкове врахування імовірнісних показників самого процесу передачі енергетичного імпульсу від частки падаючого потоку частці поверхні конкретного типу, оскільки поверхня в загальному виді і, як правило, неоднорідна за хімічним складом. Тому і в якості головного показника (крім величини енергії), за яким проводилась сепарація ЕСПП, використано саме кутові характеристики передачі імпульсу енергії в момент зіткнення.

Базову основу формування аналітичних показників першої групи становлять відносні енергетичні фактори (ВЕФ), в даному випадку – утворення нітридів та його молекулярна і атомарна складові. Поняття відносності базується на тому, що при визначенні цих характеристик використовуються відносні енергетичні спектри, котрі представляють собою розподіл за енергетичними рівнями відношення кількості часток з енергією в межах діапазону навколо цього рівня енергії до загальної кількості заряджених часток падаючого потоку. Ширина діапазону, а, таким чином – вагомість розподілу, залежать як від максимального енергетичного рівня безсуттєвого переміщення часток через прошарок вільного пробігу (ПВП), так і від числа градацій цього енергетичного рівня. Таким чином, максимальний енергетичний рівень першого від катода ПВП

$$e_1 = 2Uq_e \left(\frac{\bar{l}}{d} - \frac{(\bar{l})^2}{2d^2} \right), \quad (1)$$

де \bar{l} - середня довжина вільного пробігу іона,

q_e – заряд електрона, $q_e = 1,6022 \cdot 10^{-19}$ А·с,

d – ширина ОКП.

Середня довжина вільного пробігу іона залежить від тиску p , приведенного перетину сутічок в газі

певного складу $S_{vci} = \sum_1^z p(r_i + r_z)^2 K_{pwz}$ (r_i, r_z – радіуси іона та частки довільного типу, на базі якої передбачається утворення нітриду, при загальній кількості типів часток z , K_{pwz} – коефіцієнт об'ємної долі часток газу конкретного типу), константи концентрації компонента $C_p = 1/kT$ (k – постійна Больцмана, T – термодинамічна температура)

$$\bar{l} = 1/C_p p S_{vci}. \quad (2)$$

Ширина ОКП може бути визначена за методикою [1, 2]

$$d_w(j, p, T) = d_{N300}(j, p) \cdot K_{TN}(j, T) \cdot K_S(k_s) \cdot K_{TS}(k_s), \quad (3)$$

де $d_{N300}(j, p, T)$ – залежність між шириною ОКП, густиною струму і тиском для середовища N100 з вмістом азоту 100% при температурі $T=300^\circ$ К,

$$d_{N300} = 1,54p^{-0.89} + 1,84p^{0.58} j^{-(1,04p^{-0.39})}, \quad (4)$$

$K_{TN}(j, T)$ – температурний коефіцієнт для середовища N100,

$$K_{TN}(j, T) = (0,302 + 0,514 j^{-0,419}) + (0,002013 - 0,001663 j^{-0,749}) \cdot T, \quad (5)$$

$K_S(k_s)$ – коефіцієнт впливу відношення приведених інтегральних перетинів (константа $a_\sigma=0,38$, визначена з похибкою не більше 3,495%),

$$K_S(k_s) = (1 + a_\sigma) - a_\sigma k_s, \quad (6)$$

$K_{TS}(k_s)$ – поправка до температурного коефіцієнта, яка враховує склад газового середовища,

$$K_{TS}(k_s) = 0,285 + 0,715 k_s, \quad (7)$$

відношення приведених інтегральних перетинів k_σ становить для середовищ: N25Ar75 – 1,272; N50Ar50 – 1,181; N75Ar25 – 1,091; Ar100 – 1,362; N90H10 – 0,961, N10Ar90 – 1,326 (тут і далі система позначень складу газового середовища приведена за типом - N75Ar25 – вміст азоту в об'ємних долях 75%, аргону – 25%).

З формули (2) слідує, що середня довжина вільного пробігу іона залежить тільки від базових параметрів технологічного процесу – складу газового середовища, температури і тиску. На рис. 2 і 3 показані залежності ширини ОКП від характеристик режиму.

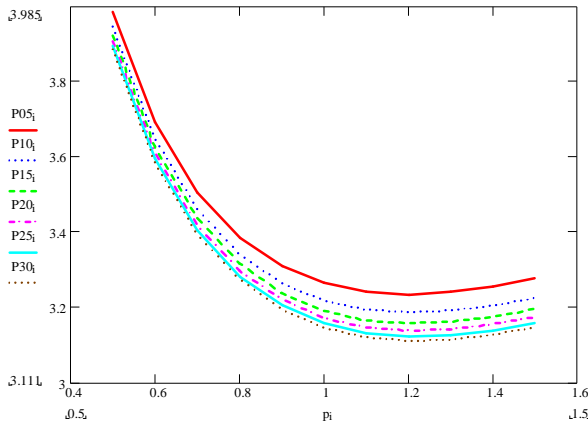


Рис. 1 Залежність ширини ОКП для газового середовища N100 від тиску та інших параметрів технологічного режиму

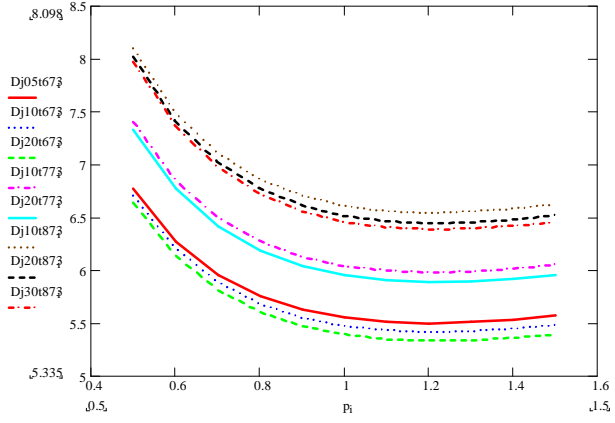


Рис. 2 Залежність ширини ОКП для газового середовища N75Ar25 від тиску та інших параметрів технологічного режиму

В якості змінних параметрів технологічного режиму вибрані тиск від 0,5 до 1,5 тора, густина струму від 5 до 30 А/м², температура від 400 до 600° С. Аналіз наведених графіків показує, що густина струму практично не впливає на ширину ОКП. Так при зміні густини струму в межах відзначеного вище діапазону максимальна різниця значень ширини ОКП складає 3,84%, а в реально застосовуваному діапазоні (10...20 А/м²) – всього 1,51%. У той же час інші параметри, які не відносяться до групи енергетичних, забезпечують різницю ширин ОКП біля 30%. Із зазначеного слідує, що всі енергетичні характеристики технологічного режиму крім міжелектродної напруги U практично не впливають на максимальний енергетичний рівень першого від катода ПВП.

Як зазначалось вище, до групи показників, котрі характеризують процеси утворення нітридів, віднесені:

F_N – загальний ВЕФ утворення нітридів,

F_{NA} – атомарна складова загального ВЕФ утворення нітридів,

F_{NM} – те ж, молекулярна.

Послідовність формування цих характеристик на прикладі загального ВЕФ утворення нітридів зводиться до наступного. В зв'язку з тим, що сам процес формування ЕСПП алгоритмічно складний і базується на значній кількості теоретичних викладок [1, 2], отримання компактного аналітичного виразу практично неможливе, а з огляду на його громіздкість і недоцільне. Простішим і прийнятним в практичному плані виявився метод розбиття ЕСПП на окремі енергетичні діапазони з подальшим пошаровим аналізом всіх найбільш характерних субпроцесів при досліджуваному рівні енергії, формуванням кількісного складу падаючого потоку за критерієм енергії. Крім того, сепарація часток падаючого потоку за енергетичними рівнями враховувала зміну енергетичних порогів утворення нітридів, причому - для компонентів поверхні різного типу. Тому основою ВЕФ утворення нітридів є первинний елемент ВЕФ утворення нітридів, котрий розраховується для енергетичного шару ЕСПП з індексом i (загальне число енергетичних шарів z_c) стосовно компонента поверхні k (загальне число компонентів поверхні z_k)

$$F_{Nik} = 2j_{evMk}(e_i) \int_{\theta_{minMki}}^{\theta_{maxMki}} \cos q \, dq + j_{evAk}(e_i) \int_{\theta_{minAki}}^{\theta_{maxAki}} \cos q \, dq, \quad (8)$$

де $j_{evMk}(e_i)$ – складова відносного розподілу молекулярних часток азоту (числа молекулярних часток, які володіють енергією в діапазоні $\varepsilon_i - \varepsilon_i + \Delta\varepsilon$, віднесене до загального числа іонів) стосовно певного компонента поверхні k ,

$j_{evAk}(e_i)$ – аналогічно, відносного розподілу атомарних часток стосовно того ж елемента поверхні k ,

$\theta_{minMki}, \theta_{maxMki}, \theta_{minAki}, \theta_{maxAki}$ – граничні значення кутових параметрів, які забезпечують обмеження часток енергії рівня ε_i , переданих частці поверхні і достатніх для утворення нітриду сорту k .

Складові відносного розподілу визначаються відповідно для молекулярного азоту

$$j_{evMk}(e_i) = P_{ck} j_{evM}(e_i), \quad (9)$$

для атомарного

$$j_{evAk}(e_i) = P_{ck} j_{evA}(e_i), \quad (10)$$

де $j_{evM}(e_i), j_{evA}(e_i)$ – відносні розподіли молекулярних та атомарних часток азоту для діапазону енергій

$\varepsilon_i - \varepsilon_i + \Delta_e$ (всі відносні розподіли є відношенням числа часток падаючого потоку певного типу з енергією в означеному діапазоні до загального числа іонів $j_{ev} = j_e / j_+ = j_e / 0,624 \cdot 10^{19} j$, котре відповідає певній густині струму j),

P_{ck} – ймовірність сутички частки газу з компонентом поверхні сорту k ,

$$P_{ck} = \frac{K_{ak} s_k}{\sum_{k=1}^{Z_k} K_{ak} s_k}, \quad (11)$$

де K_{ak} – атомарний вміст компонента поверхні сорту k ,

s_k – площа поперечного перетину компонента поверхні сорту k .

Атомарний вміст компонента визначається через його масовий вміст та атомарну масу

$$K_{ak} = \frac{K_{mk} / m_{ak}}{\sum_{k=1}^{Z_k} \frac{K_{mk}}{m_{ak}}}. \quad (12)$$

Передумовою виникнення реакції утворення нітриду буде відбір тільки тієї частини падаючого потоку, яка, по-перше може бути компонентом майбутніх нітридів, по-друге може передати контрчастці енергію ε_d , котра обмежена величинами: з мінімальної сторони енергією утворення відповідного нітриду ε_d ; з максимальної – енергією, при якій контрчастка покидає поверхню (розпорошується), в якості якої прийнята енергія сублімації ε_{sb} . Крім того, якщо частка падаючого потоку є молекулою і для утворення нітриду вона попередньо повинна дисоціювати, то мінімальна енергетична межа повинна враховувати також енергію дисоціації молекули ε_d . Ця передумова обов'язкова, але недостатня, тому, як зазначалось вище, за допомогою ВЕФ утворення нітридів можна проводити тільки якісний аналіз, хоча і в такій постановці стає можливим прогнозування кінцевих результатів обробки. Далі в дію вступають ймовірнісні характеристики процесу утворення нітридів, які залежать від конкретних миттєвих ситуацій взаємодії часток. Певну добавку кількості нітридів дасть також процес активації адсорбованих поверхнею атомів азоту за рахунок передачі їм енергії, достатньої для проведення реакції утворення нітридів, після бомбардування їх частками падаючого потоку, незалежно від того є вони азотом, чи ні. Ці характеристики класично відображаються перетином процесу, котрий може визначатись експериментально.

Ймовірнісні характеристики передачі енергії при сутичці часток азоту з компонентами поверхні з врахуванням енергетичних рамок процесу утворення нітридів, як зазначалось вище, трансформуються в граничні значення кутових параметрів формули (8).

Введемо поняття мінімальної для молекулярних іонів азоту ε_{minMk} , аналогічно – для атомарних ε_{minAk} та максимальної ε_{maxk} енергетичних меж утворення нітридів $e_{minMk} = e_d + e_{dk}$, $e_{minAk} = e_{dk}$, $e_{maxk} = e_{sbk}$. Позначимо K_{enk} – коефіцієнт енергопередачі, який визначається в залежності від характеру сутички частки газового середовища з компонентом поверхні k – го сорту. Для пружної сутички

$$K_{enk} = \frac{4m_v m_k}{(m_v + m_k)^2}, \quad (13)$$

для непружної, яка найбільш характерна для ситуації, коли частка падаючого потоку зустрічається з нерухомим елементом поверхні

$$K_{enk} = \frac{m_k}{m_v + m_k},$$

де m_v, m_k – маси відповідно налітаючої та поверхневої часток.

Якщо виходити з того, що молекулярні іони переважно та найбільш реально можуть вступати в реакцію утворення нітридів тільки за схемою попередньої дисоціативної рекомбінації, то умова достатнього енергетичного забезпечення можливості реакції утворення нітридів полягає в тому, що енергія, яка передається з врахуванням кута θ передачі енергії при зіткненні часток падаючого потоку та поверхні повинна знаходитись в межах

$$2e_{dk} \leq K_{enk} e_i \cos^2 q - e_d \leq e_{sbk}. \quad (14)$$

Тоді обмеження за значенням мінімальної енергії $2e_{dk} \leq K_{enk} e_i \cos^2 q - e_d$ максимально допустимого кута передачі енергетичного імпульсу

$$0 \leq q_{\max Mki} = \arccos \left(\frac{2e_{dk} + e_d}{K_{enk} e_i} \right)^{0.5} \leq \frac{p}{2}. \quad (15)$$

Обмеження за значеннями максимальної енергії та відповідно мінімально допустимого кута

$$K_{enk} e_i \cos^2 q - e_d \leq e_{sbk}, \quad (16)$$

$$0 \leq q_{\min Mki} = \arccos \left(\frac{e_{sbk} + e_d}{K_{enk} e_i} \right)^{0,5} \leq q_{\max Mki}. \quad (17)$$

Аналогічно для атомарних іонів

$$e_{Дк} \leq K_{enk} e_i \cos^2 q \leq e_{sbk}, \quad (18)$$

$$0 \leq q_{\max Aki} = \arccos \left(\frac{e_{Дк}}{K_{enk} e_i} \right)^{0,5} \leq \frac{p}{2}, \quad (19)$$

$$0 \leq q_{\min Aki} = \arccos \left(\frac{e_{sbk}}{K_{enk} e_i} \right)^{0,5} \leq q_{\max Aki}. \quad (20)$$

Важливе зауваження до формул (17), (19), (20) полягає в тому, що вираз в дужках не повинен перевищувати одиницю, тобто в разі, якщо відношення енергій більше одиниці, то його слід приймати рівним одиниці.

Загальний ВЕФ утворення нітридів є сумою первинних елементів. Область, в межах якої додаються всі первинні елементи ВЕФ, залежить від того, який ВЕФ утворення нітридів потрібно отримати. Якщо досліджуються тільки нітриди певного сорту, тобто на основі одного з нітридоутворюючих компонентів поверхні, то потрібно скласти суму по всіх енергетичних рівнях тільки для цього компонента.

$$F_{Nk} = \sum_{i=0}^{Z_c-1} F_{Nik} \quad (21)$$

Повний ВЕФ утворення нітридів є сумою первинних елементів по всьому спектру компонентів

$$F_N = \sum_{k=1}^{Z_k} F_{Nk} = \sum_{i=0}^{Z_c-1} \sum_{k=1}^{Z_k} F_{Nik}. \quad (22)$$

Для поліфазних процесів, які складаються з макрофаз зі стабільним живленням – періодів, тривалість яких порівнянна з загальною тривалістю процесу модифікації, а енергетичні характеристики на протязі фази з певним допуском незмінні, модель аналітичних показників повинна включати додатково до зазначених вище ще одну змінну – час. В цьому випадку для кожної фази визначається повний ВЕФ утворення нітридів. Загальний, умовно названий динамічним, енергетичний фактор (ДЕФ) є сумою ВЕФ всіх фаз, загальна кількість яких Z_ϕ , з врахуванням долі тривалості кожної фази в загальній тривалості модифікаційного процесу.

$$F_{DN} = \sum_{f=0}^{Z_\phi} F_{N\Phi} \frac{t_f}{\sum_{f=0}^{Z_\phi} t_f}, \quad (23)$$

де f – індекс макрофази,

t_f – тривалості макрофаз.

Задача формування аналітичної моделі відображення утворення нітридів за допомогою системи характеристик значно ускладнюється для поліфазних процесів, які сформовані мікрофазами, в тому числі – зі змінним живленням. На рис. 3, 4 показано порівняння ЕСПП для різних параметрів технологічного процесу, причому комбінації умов підібрані такими, щоб змінювались тільки енергетичні характеристики режимів. На рис. 3 представлені ЕСПП при різних значеннях напруги розряду та тискові в розрядній камері 0,7 тора. З рис. 3 слідує, що при зменшенні напруги зменшуються максимальні значення енергетичного спектру (на рисунку від 105 еВ при напрузі 500 В до 65 еВ при напрузі 300 В, графіки в області високих енергій в послідовності зменшення напруги зміщуються з права на ліво). Крім того зменшення напруги призводить до росту відносної кількості часток з середньою та низькою енергіями. В області низьких енергій, яку в основному формують швидкі нейтральні компоненти та важкі іони, наприклад - аргону, спостерігається екстремальний характер впливу напруги розряду на величину відносних значень спектру (відносність, як зазначалось вище пов'язана з тим, що на графіках ЕСПП приведені не абсолютні значення числа часток, котрі мають певну енергію, в їх відношення до кількості заряджених часток, якими є іони). Спочатку при переході від 500 В до 400 В відносні значення спектру зменшуються, а потім при переході до 300 В збільшуються.

На рис. 4 показані суміщені графіки ЕСПП при тих же значеннях напруги розряду (500, 400 і 300 вольт), але і при двох значеннях густини струму – 10 А/м² і 20 А/м², всього шість спектрів, причому криві товстими лініями відповідають густині струму 10 А/м², тонкими - 20 А/м². Взаємне розташування спектрів

по напрузі – аналогічно рис. 3. Рис. 4 відповідає тискові в розрядній камері 0,85 тора, тому із співставлення рисунків 3 та 4 по цьому факторові можна зробити висновок, що зменшення тиску призводить до підвищення енергетичних порогів. Пояснення цьому очевидне, виходячи з того, що зі зменшенням тиску збільшується довжина вільного пробігу частки, оскільки при цьому зменшується кількість контрчасток сутічок. Відповідно зростає доля падіння напруги, яка припадає на перший від катода прошарок вільного пробігу.

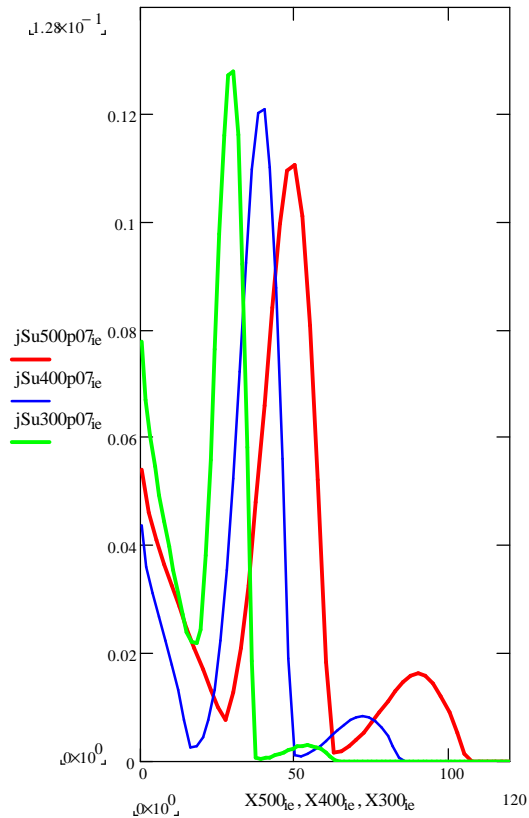


Рис. 3 Енергетичні спектри падаючого потоку в залежності від напруги розряду при тиску 0,7 тора

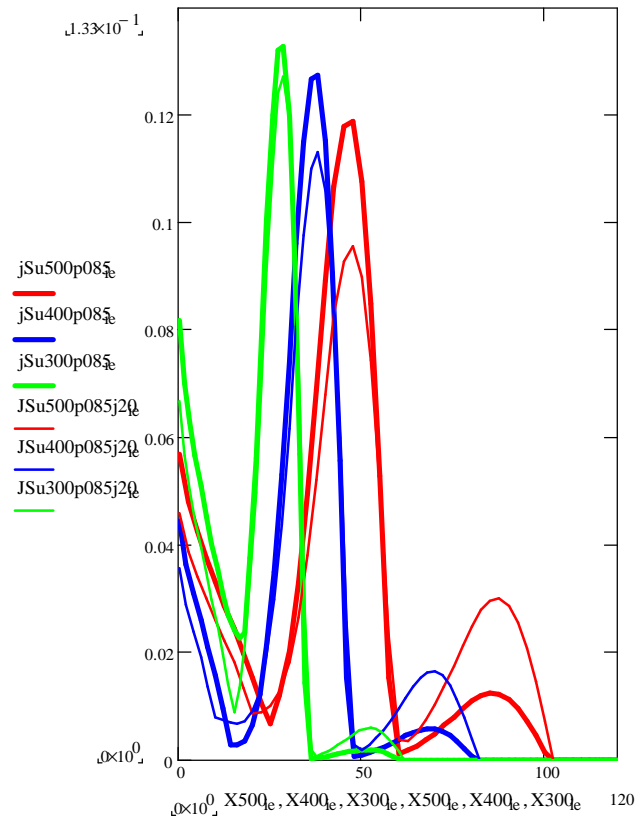


Рис. 4 Енергетичні спектри падаючого потоку в залежності від напруги та густини струму при тиску 0,85 тора

Порівняння відповідних графіків на рис. 4 (товстими та тонкими лініями, що відповідає густині струму 10 A/m^2 і 20 A/m^2) показує, що густина струму як характеристика, котра в основі своїй відображає кількісні параметри розряду, не впливає на енергетичні порого спектру, а призводить тільки до перерозподілу відносного числа часток по енергетичних рівнях. При цьому положення екстремумів розподілів часток в залежності від енергії практично не залежить від густини струму. Екстремальний характер впливу напруги розряду в області низьких енергій та підвищеної густини струму, зазначений вище, спостерігається і в означених умовах, хоча різниця тепер між графіками для різних значень напруги суттєво менша, практично ролі не грає. Таким чином, з рис. 3 та 4 логічно слідує висновок, що основним енергетичним параметром технологічного режиму, який впливає на енергетичні рівні взаємодії падаючого потоку з поверхнею є напруга розряду. В кількісному аспекті густина струму впливає на число часток падаючого потоку, що в певній мірі теж визначає хід окремих субпроцесів.

Дослідимо тезу стосовно впливу на поверхневі субпроцеси часток падаючого потоку, які безпосередньо не можуть утворювати нітриди (аргон та інші компоненти, крім азоту), але ударною дією в якійсь мірі сприяють дисоціативній рекомбінації молекул азоту, що знаходяться в адсорбційному шарі на поверхні. На рис. 5, 6 приведені графіки, аналогічні за змістом відповідно рис. 3 і 4. Різниця полягає тільки в тому, що на рис. 5 і 6 до енергетичного потоку включені лише молекулярний та атомарний азот у вигляді іонів та швидких нейтралей. Спостерігаються всі описані відносно рис. 3 і 4 тенденції стосовно впливу енергетичних чи базових параметрів технологічного режиму на якісні та кількісні характеристики ЕСПШ. В області високих енергій, яка за визначенням формується в основному тільки частками азоту, практично не спостерігається змін по зрівнянню з рис. 3, 4. А от в області низьких енергій форма спектру помітно змінюється, оскільки це якраз діапазон аргону та нейтралів, котрі у значній мірі частіше утворюються за рахунок іонів аргону [1, 2]. Таким чином, вплив інших складових газових середовищ, крім азоту, на процеси утворення нітридів можна вважати несуттєвим.

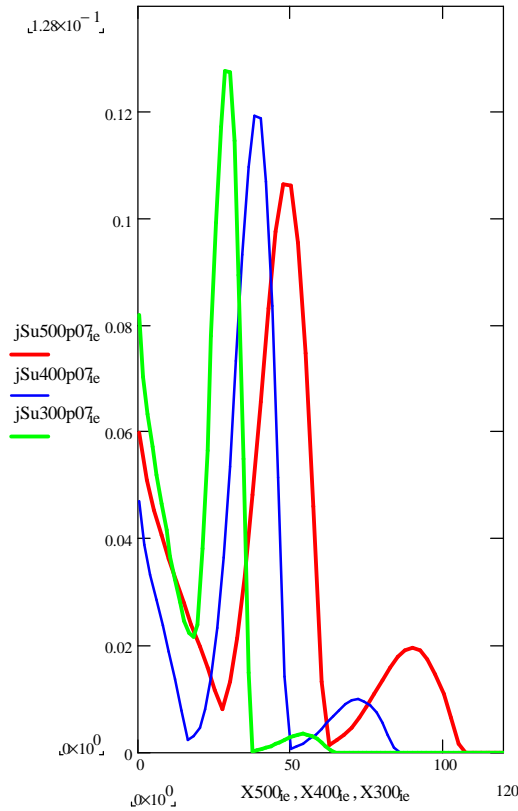


Рис. 5 Енергетичні спектри падаючого потоку компонентів азоту в залежності від напруги розряду при тиску 0,7 тора

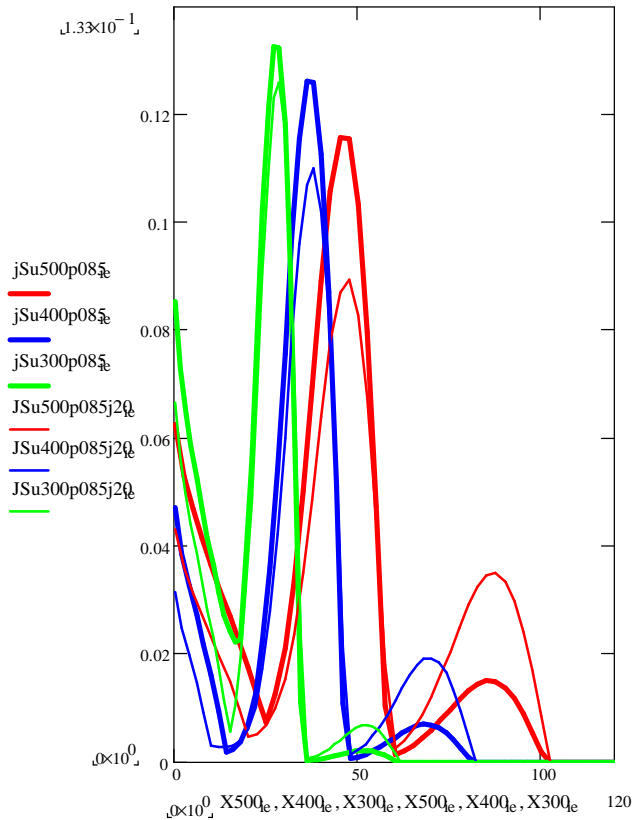


Рис. 6 Енергетичні спектри падаючого потоку компонентів азоту в залежності від напруги та густини струму при тиску 0,85 тора

Питання, які розглянуті вище, стосуються азотування в тліючому розряді з умовно незмінним живленням або процесу, який складається з макрофаз. Для випадку, коли технологія передбачає застосування режимів з мікрофазами принципи формування ЕСПП суттєво відрізняються. В цьому випадку неминучими є змінні енергетичні параметри технологічного режиму в часі, в тому числі – і за рахунок динамічних явищ. Насамперед на відміну від рис. 3-6 форма енергетичних спектрів принципово змінюється, оскільки він стає тримірним (з'являється координата часу τ). Крім того, змінний характер напруги розряду, як найвпливовішого енергетичного параметра режиму модифікації, призводить до міграції енергетичних порогів ЕСПП в різні моменти часу. Орієнтовна демонстраційна форма ЕСПП при нестационарному живленні розряду показана на рис. 7. Приклад, наведений на рис. 7, стосується варіанту циклічно комутованого розряду, коли напруга між електродами камери в часі змінюється по певному закону $U(\tau)$. Тоді всі енергетичні пороги ЕСПП будуть теж змінними

$$e_t = e_U(U(t)). \tag{24}$$

Орієнтовно в якості основи для визначення функції зв'язку енергетичних порогів зі змінною в часі напругою може бути використаною формула (1).

Аналогічно формулам (8) – (10) з врахуванням нової додаткової змінної – часу τ

$$F_{Nikt} = 2j_{evMkt}(e_i) \int_{q_{min Mki}}^{q_{max ki}} \cos q dq + j_{evAkt}(e_i) \int_{q_{min Aki}}^{q_{max ki}} \cos q dq, \tag{25}$$

де $j_{evMkt}(e_i)$, $j_{evAkt}(e_i)$ – складові відносного розподілу аналогічно поясненням до формули (8) для ЕСПП в певному проміжку часу $\tau_f - \tau_{f+1}$ (f – індекс проміжку часу при їх загальній кількості в досліджуваному інтервалі часу Z_τ).

$$j_{evMkt}(e_i) = P_{ck} j_{evMt}(e_i), \tag{26}$$

$$j_{evAkt}(e_i) = P_{ck} j_{evAt}(e_i). \tag{27}$$

ДЕФ утворення нітрідів певного сорту для деякого моменту часу

$$F_{Nkt} = \sum_{i=0}^{Z_c-1} F_{Nikt} \tag{28}$$

ДЕФ утворення нітрідів в деякий момент часу є сумою первинних елементів по всьому спектру

$$F_{Nt} = \sum_{k=1}^{Z_k} F_{Nkt} = \sum_{k=1}^{Z_k} \sum_{i=0}^{Z_c-1} F_{Nikt} . \quad (29)$$

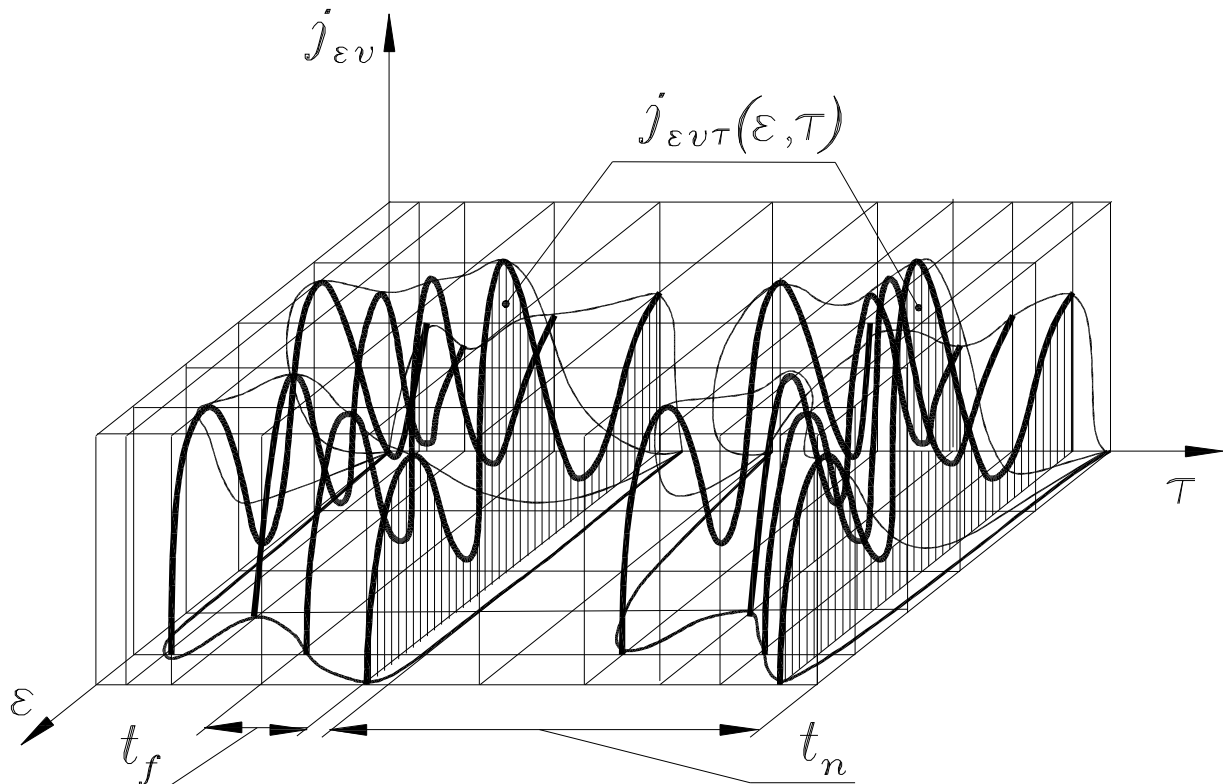


Рис. 7 Загальний вигляд енергетичного спектру падаючого потоку при нестационарному живленні розряду

Повний динамічний фактор утворення нітридів в процесах з нестационарним живленням

$$F_{DN} = \sum_{t=1}^{Zt} F_{Nt} \frac{t_f}{t_n} = \sum_{t=1}^{Zt} K_t \sum_{k=1}^{Z_k} F_{Nkt} = \sum_{t=1}^{Zt} K_t \sum_{k+1}^{Z_k} \sum_{i=0}^{Z_c-1} F_{Nikt} , \quad (30)$$

де $K_t = t_f / t_n$, t_f – тривалість досліджуваного інтервалу часу, t_n – період циклу комутації розряду (див. рис. 7).

Висновок. Викладені результати можуть становити теоретичну основу для розрахунку аналітичних критеріїв утворення нітридів при азотуванні в тліючому розряді з нестационарним живленням. В подальшому повний динамічний фактор утворення нітридів передбачається використати для аналізу впливу змінного характеру енергетичних параметрів технологічного режиму на один з головних результатів модифікації поверхні азотуванням.

Література

1. Пастух И. М. / И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде. - Харьков, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», 2006. – 364 с.
- 1.1. Пастух И. М. Фізико-технічна обробка поверхні металів безводневим азотуванням в тліючому розряді: Дис...докт. техн. наук: 05.03.07. – Київ, 2008. – 675 с.
2. Пастух И. М. / И. М. Пастух, О. С. Здибель Проблематика моделювання процесу азотування в тліючому розряді // Вісник Хмельницького національного університету.-Хмельницький, 2005. - №1.–С. 7-11.
3. Пастух И. М. Енергетичний спектр падаючого потоку при азотуванні в тліючому розряді // Вісник Хмельницького національного університету. - Хмельницький, 2005. - №5, ч. 1, т. 1. – С. 5-15.
4. Пастух И. М. Взаємодія падаючого потоку з поверхнею при модифікації в тліючому розряді // Вісник Хмельницького національного університету. - Хмельницький, 2005. - №6, т. 1. – С. 185-194.
5. Пастух И. М. Поверхневі процеси при азотуванні в тліючому розряді // Вісник Хмельницького національного університету. - Хмельницький, 2006. - №1. – С. 130-142.
6. Пастух И. М. Енергетичний аналіз моделей азотування в тліючому розряді // Вісник Хмельницького національного університету. - Хмельницький, 2006. - №5. – С. 7-14.
7. Пастух И. М. / М. В. Лук'янюк, В. О. Курская Класифікаційні критерії процесів азотування в

тліючому розряді з нестационарним живленням. – Хмельницький: Вісник ХНУ;- 2011;- №5; С. 10-13.

8. Пастух І. М. / І. М. Пастух, О. С. Здибель Практична апробація положень теорії азотування в тліючому розряді // Вісник Хмельницького національного університету. - Хмельницький, 2007. - №1. – С. 7-25.

9. Пастух І. М. / М. В. Лук'янюк, В. О. Курская Перспективи керованого формування поверхневих трибо технічних систем при азотуванні в тліючому розряді з нестационарним живленням. – Хмельницький: Вісник ХНУ;- 2011;- №6; С. 114-119.

Статтю представляє: д.т.н. Пастух І.М.

Надійшла: 20.02.2012 р.

УДК 621.791.754

О.О. АБРАМОВ, В.В. ЗАВГОРОДНИЙ, А.А. ВИЧАВКА

Хмельницький національний університет

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ВОЛОГОСТІ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ НА ПРОБИВНИЙ ЗАГОР І ПАРАМЕТРИ ЕЛЕКТРИЧНОГО РОЗЯДУ МІЖ МІДНИМИ ЕЛЕКТРОДАМИ

Представлені результати виконаної роботи з визначення співвідношення величин максимальних проміжків між мідними струмоведучими електродами, які пробиваються електричним розрядом за напруги 80 В у середовищі вуглекислого газу різної вологості. Наведені значення відносного пробивного зазору, напруги пробую і струму електричних розрядів у міжелектродних проміжках.

The paper represents results of the work aimed at finding relationship of values of the maximal spaces between conductive copper electrodes which are broken through by electric discharge under 80 V voltage in carbon dioxide medium having various humidity. The values are stated for relative break through gap, breaking through voltage and currents of electric charges in spaces between electrodes.

Ключові слова: вуглекислий газ, вологість, електричний розряд, пробивний зазор.

Вступ

Склад і стан газового середовища, яке застосовується для захисту зони механізованого дугового зварювання, надають значний вплив не тільки на якість формованих зварних з'єднань, але і на працездатність зварювальних пальників і, перш за все, наконечників їх струмопідвідних мундштуків.

Відомо, що при дуговому зварюванні металевих матеріалів широке застосування знайшли вуглекислий газ та його суміші з аргоном (завичай 20–18% вуглекислого газу і 80–82 % аргону). Приведені гази мають неоднакові властивості і, зокрема, різний опір електричному пробую за наявності різниці потенціалів між елементами електричного ланцюга. Такими елементами при механізованому зварюванні плавким електродом у середовищі вуглекислого газу є наконечник струмопідвідного мундштука зварювального пальника (наконечник служить анодом) і рухомий по його поверхні в зону зварювання електродний дріт.

При помітному зношуванні наконечника зварювального пальника різко послаблюється контакт поверхні його отвору з електродним дротом, внаслідок чого в зазорі, що утворюється між ними, виникає іскріння [1–3]. Якщо іскріння набуває систематичний характер, то воно приводить до виділення значної теплової енергії на поверхні отвору наконечника, розм'якшенню, розплавленню і навіть випаровуванню її деяких ділянок. Все це викликає значний нагрів і посилення електроерозійного зношування поверхні наконечника [2; 4]. Руйнуюча дія електроерозії на наконечник зварювального пальника підвищується зі зменшенням електричної стійкості газового середовища, внаслідок чого зростає величина пробивного зазору, кількість самих розрядів стає більше, і вони охоплюють значні площі.

У літературі є суперечливі відомості про напругу, достатню для пробую повітряного проміжку між поверхнею отвору наконечника і електродним дротом струмопідвідного мундштука. У роботі [5] стверджується, що пробой невеликих повітряних проміжків при напрузі між електродами менше 250 В може виникати тільки при замиканні цього проміжку великими або дрібними механічними частинками. Автор [6] вважає, що до реалізації початку іскрового розряду можуть призводити також утворення «контактних містків». По результатам досліджень [7] величина безконтактного пробую повітряного міжелектродного проміжку при напрузі менше 300 В знаходиться в межах від 10^{-6} до 10^{-3} см і залежить від стану поверхні контактуючої пари. Проте автори [8] вважають, що для виникнення електричного розряду між контактами у повітрі мінімально необхідними є струм 0,5 А і напруга 15–20 В.

Величина напруги пробую залежить також від роду газу і його стану. У літературі [9] наведені значення критичної напруги, достатні для реалізації пробую проміжку між струмопідвідними матеріалами в деяких газах (у тому числі вуглекислому), які можуть знаходитися в зварювальній зоні (табл. 1).

Залежно від області застосування, а також за фізико-хімічними показниками двооксид вуглецю газоподібний й рідкий (CO_2) згідно ГОСТ 8050-85 випускають трьох марок: зварювальний (не менш 99,5 % CO_2), харчовий (не менш 98,8 % CO_2) і технічний (не менш 98,5 % CO_2). Для зварювання повинні