

Максим Болотов

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ В ДОВГИХ ТРУБКАХ МАЛОГО ДІАМЕТРА

Актуальність теми дослідження. Очищення внутрішніх поверхонь труб є обов'язковою операцією, що передує нанесенню покриття з використанням методів вакуумного напилення. Суттєві недоліки традиційно застосованих методів хімічної та електрохімічної очистки таких поверхонь зумовило широке використання плазмових технологій на основі низькотемпературної плазми тліючого розряду.

Постановка проблеми. Зокрема, на сьогодні найбільш поширеним способом очищення поверхонь від різного роду забруднень є іонне розпилення з використанням газорозрядної плазми тліючого розряду. Такий спосіб очищення дозволяє ефективно видаляти основні види забруднень, такі як жири, адсорбовану воду, гази, окисли та обробляти поверхні різної конфігурації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Показано можливість застосування тліючого розряду в процесах очищення й нанесення покриття на внутрішню поверхню труб діаметром 56 мм довжиною 120 мм із застосуванням прикладеного поперечного магнітного поля. Однак при цьому виникає багато труднощів, переважно пов'язаних із низькою продуктивністю процесу, оскільки очищення внутрішньої поверхні таких труб здійснювалося протягом 60 хвилин.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Підвищити продуктивність обробки вдається можливим шляхом застосування тліючого розряду ініційованого в порожнистому катоді. Однак нині відсутні будь-які дані щодо розподілу концентрації заряджених часток всередині виробу, в якому $L \gg d$.

Мета роботи. Метою цієї роботи є порівняльний аналіз напружено-деформованого стану (НДС) при дифузійному зварюванні з'єднань із різнорідних матеріалів, що виникає при нагріванні в нормальному тліючому розряді і тліючому розряді, ініційованому в порожнистому катоді.

Виклад основного матеріалу. Із використанням зондової методики досліджували енергетичні характеристики плазми тліючого розряду, ініційованого в порожнистому катоді стосовно до умов очищення внутрішніх поверхонь довгих труб малого діаметра. Показано, що при тиску в газорозрядній камері 53 Па і струмі розряду 0,075 А, в досліджуваній геометрії катодної порожнини утворюється достатньо щільна плазма із концентрацією заряджених часток на рівні $1,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, що відрізняється високою неоднорідністю по висоті порожнини (40...60 %). Також показано, що ефективним механізмом впливу на розподіл плазми всередині катода, в якому $L \gg D$, є зміна відстані катод-анод, зменшення якої від 40 до 20 мм підвищує рівномірність до 15...20 %, а введення в схему розряду додаткового анодного кільця – до 8...10 %.

Висновки відповідно до статті. Показано, що очищення внутрішньої поверхні довгих труб малого діаметра (в яких $L = 10D$) тліючим розрядом із використанням ефекту порожнистого катода ускладнене певними факторами, головним чином пов'язаних із досить високою неоднорідністю розподілу плазми всередині катодної порожнини.

Ключові слова: плазма; тліючий розряд; контактне порожнистий катод; електричний зонд.

Рис.: 7. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. Очищення внутрішніх поверхонь труб є обов'язковою операцією, що передує нанесенню покриття з використанням методів вакуумного напилення.

Суттєві недоліки традиційно застосованих методів хімічного та електрохімічного очищення таких поверхонь зумовлені наявністю залишків активних мийних речовин на поверхні, які є джерелами газовиділення у вакуумі, насичення воднем поверхні, що обробляється електролітами, велика кількість шкідливих відходів виробництва привели до розробки нових екологічно чистих електрофізичних методів та процесів, пов'язаних насамперед із впливом на оброблювану поверхню потоків заряджених частинок.

Останніми роками неухильно зростає використання плазми низького тиску в галузі обробки матеріалів трубчастих виробів [1].

Постановка проблеми. Зокрема, на сьогодні найбільш поширеним способом очищення поверхонь від різного роду забруднень є іонне розпилення з використанням газорозрядної плазми тліючого розряду [2]. Такий спосіб очищення дозволяє ефективно видаляти основні види забруднень, такі як жири, адсорбовану воду, гази, окисли, та обробляти поверхні різної конфігурації (у тому числі й внутрішні порожнини) і різної площі (від одиниць до десятків тисяч квадратних сантиметрів). Крім того, при іонному очищенні на поверхні виробу виникають мікродфекти структури у вигляді вакансій, які при подальшому осадженні покриття будуть центрами його конденсації [3; 4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [5] показана можливість застосування тліючого розряду в процесах очищення й нанесення покриття на внутрішню поверхню труб діаметром 56 мм довжиною 120 мм із застосуванням прикладеного поперечного магнітного поля. Однак при цьому виникають труднощі, переважно пов'язані з низькою продуктивністю процесу, оскільки очищення внутрішньої поверхні таких труб із застосуванням іонного розпилення здійснювалося протягом 60 хвилин.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Задача суттєво ускладнюється при очищенні внутрішніх поверхонь саме довгих труб, в яких $L \gg d$, що необхідно, наприклад, для подальшого нанесення покриття [6], оскільки в таких умовах практично неможливо забезпечити рівномірне заповнення внутрішньої порожнини іонізованою плазмою. Плазмовий градієнт, що виникає в такому випадку, неминуче призводить до погіршення якості обробки на віддалених від аноду ділянках, оскільки енергія іонів, що бомбардують поверхню виробу і тим самим реалізують її розпилення, буде втрачатись на подолання значної дистанції.

Нині проблема очищення внутрішніх поверхонь таких виробів із застосуванням іонних технологій залишається відкритою, вирішення якої пов'язано з певними труднощами, головним чином обумовленими складною геометрією виробу, оскільки будь-яка зміна у формі катода розряду (деталі) призведе до зміни конфігурації розподілу потенціалу всередині нього.

Аналізуючи процеси, що протікають при горінні тліючого розряду з осциляцією емітованих електронів всередині катодної порожнини, дає нам підстави для дослідження доцільності застосування ефекту порожнистого катода з метою очищення внутрішніх поверхонь таких виробів.

Оскільки плазма тліючого розряду при цьому концентрується виключно всередині катодної порожнини (деталі, що обробляється), не повинно виникати жодних проблем із зарядом зразка потоком іонів і вторинних електронів, емітованих із поверхні виробу внаслідок іонно-електронної емісії, які, потрапляючи в сильне електричне поле в області катодного падіння потенціалу, знову спрямовуються на поверхню катода [7].

Унаслідок такого бомбардування внутрішньої поверхні виробу іонами робочого газу відбувається розпилювання матеріалу катода, що призводить до вивільнення його поверхні від різного роду забруднень з утворенням поверхневих дефектів, тобто відбувається активація поверхні виробу. Таке розпилювання буде тим інтенсивніше, чим більша кількість бомбардуючих внутрішню поверхню катода часток та вище їхня енергія.

Однак на сьогодні відсутні будь-які дані стосовно розподілу концентрації плазмових іонів та вторинних електронів, що ініціюються всередині катодної порожнини, в якій $L \gg d$.

Мета роботи. У зв'язку з вищезазначеним, для подальшого дослідження процесів розпилення матеріалів внутрішніх поверхонь довгих труб малого діаметра в низькотемпературній плазмі тліючого розряду, що горить у порожнистому катоді, з метою їх поверхневого очищення доцільно провести дослідження з визначення розподілу концентрації заряджених часток усередині катодної порожнини.

Виклад основного матеріалу. Характерною рисою низькотемпературної газорозрядної плазми, як фізичного об'єкта з великою концентрацією енергії, є наявність в ній різного роду високоактивних часток, таких як іони, електрони, радикали, збуджені частки та фотони, але головну роль у процесах розпилення катодного матеріалу відіграють саме інтенсивні потоки іонів, бомбардуючих поверхню катода, та швидкі електрони, емітовані катодом під впливом іонів, викликаючи вторинну електронну емісію з катода.

Таким чином, діагностування плазми, розповсюджуваної від катода, полягає у вимірюванні розподілення саме іонного та електронного струмів по поверхні катодної порожнини.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Для визначення співвідношення струмів іонів і електронів, що протікають у прикатодній області, застосовували метод ленгмюрівського електричного зонду. Зонд являє собою допоміжний електрод, виконаний із тонкого прутка вольфраму діаметром 0,5 мм, покритий керамічною ізоляцією для виключення можливості пробією й електричного контакту між зондом і електродом. Довжина збираючої (оголеної) частини зонду становить 5 мм. Довжина збираючої (оголеної) частини зонду становить 3 мм. Розмір та форма перерізу зонду були вибрані таким чином, щоб мінімізувати можливості утворення плазмових збурень із урахуванням наступних вимог: радіус Дебая для досліджуваної плазми повинен бути набагато менше за радіус зонда, $R_D \gg R_p$; довжина вільного пробігу часток повинна бути набагато більша за розмір збираючої частини зонду $\lambda \gg R_p$ [8].

Визначення величини дебаєвського радіусу здійснювали за наступною формулою:

$$R_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 k T_e}{n_e^2}}, \quad (1)$$

де ε_0 – діелектрична проникність вакууму; k – постійна Больцмана; T_e – електронна температура, n_e – концентрація плазми.

Розрахунок показав, що радіус екранування в наших умовах наближується до значення $R_D \sim 10^{-6}$ м, що набагато менше за радіус зонду. Це зумовлює правомірність застосування нашого зонда.

Дослідження плазми проводилося відповідно до наведеної схеми (рис. 1).

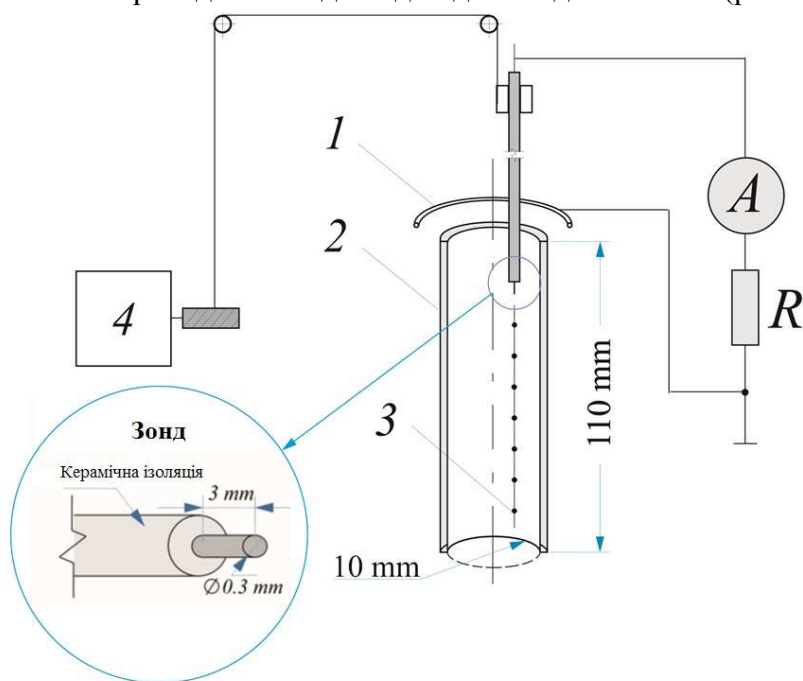


Рис. 1. Схема зондових вимірювань:

1 – анод; 2 – порожнистий катод; 3 – електричний зонд; 4 – електромагніт

У наших дослідах катод являв собою порожнисту трубку виконану з алюмінію АД1 діаметром 10 мм та довжиною 110 мм. Фіксування розподілу іонної та електронної температури біля поверхні катоду здійснювали шляхом занурення зонду вглиб катодної порожнини в осьовому напрямку з кроком в 10 мм.

Зонд приводився в рух реверсивним електродвигуном, розміщеним усередині розрядної камери, за допомогою якого він міг опускатися й підніматися. Живлення електродвигуна здійснювали від джерела ВС-24. Швидкість руху зонда становила 0,5 см/с.

Дослідження здійснювали в середовищі аргону при тиску в газорозрядній камері 53 Па. Розрядний струм підтримувався постійним на рівні 0,075 А. Напруга запалювання розряду при цьому становила 400 В. Значення максимальних іонного та електронного струмів фіксували дзеркальним міліамперметром типу М502 класу 0,1.

Зондові потенціали змінювалися в межах від -20 до -200 В. При цьому вважалося, що при потенціалі в -20 В на зонд будуть потрапляти лише швидкі, так звані γ -електрони, які, прискорюючись у прикатодній області, набувають енергії, що відповідає величині катодного падіння потенціалів. Кількість таких часток обмежена, але їхній внесок в іонізацію є основним, в той час як внесок вторинних електронів, що виникають в результаті іонізації швидкими частками не є суттєвим, оскільки вони не отримують необхідної кількості енергії. При потенціалі в -200 В зонд буде насичуватися лише позитивними іонами, оскільки в цьому випадку такий значний негативний потенціал буде служити бар'єром для потрапляння на зонд емітованих катодом швидких електронів [9].

Просторовий розподіл газорозрядної плазми вздовж внутрішньої стінки катодної порожнини досліджували при зміні міжелектродної відстані ($L_{к-а}$), і за умови наявності додаткового анода в розрядному проміжку. У першому випадку фіксували розподіл іонного та електронного струмів при віддаленні аноду на відстань 20, 30 та 40 мм від апертури катода. У другому – у розрядне коло вводився допоміжний анод, що розміщувався з протилежного торця катодної порожнини. Міжелектродна відстань для обох анодів становила 40 мм.

Вимірювання в кожному з дослідів здійснювалися у вигляді серії з 4-5 знімачів, після чого результати усереднювалися з відкиданням випадального значення, поява яких, на нашу думку, була пов'язана із перенасиченням зонду.

Слід зазначити, що протягом деякого часу після запалювання розряду на внутрішній поверхні катодної порожнини спостерігались характерні для алюмінію мікродугові пробої, очевидно, пов'язані з наявністю на його поверхні шару оксидної плівки. З часом частота таких спалахів дещо зменшується і розряд переходить у більш стабільну фазу горіння.

Сутність методу електричних зондів полягає в отриманні зондової вольт-амперної характеристики певної ділянки плазми та визначенні за її допомогою основних величин, що характеризують процеси, які в ній протікають. Температуру електронного газу визначали по куту нахилу зондової ВАХ, побудованої в напівлогарифмічному масштабі круто спадаючої її ділянки (рис. 2).

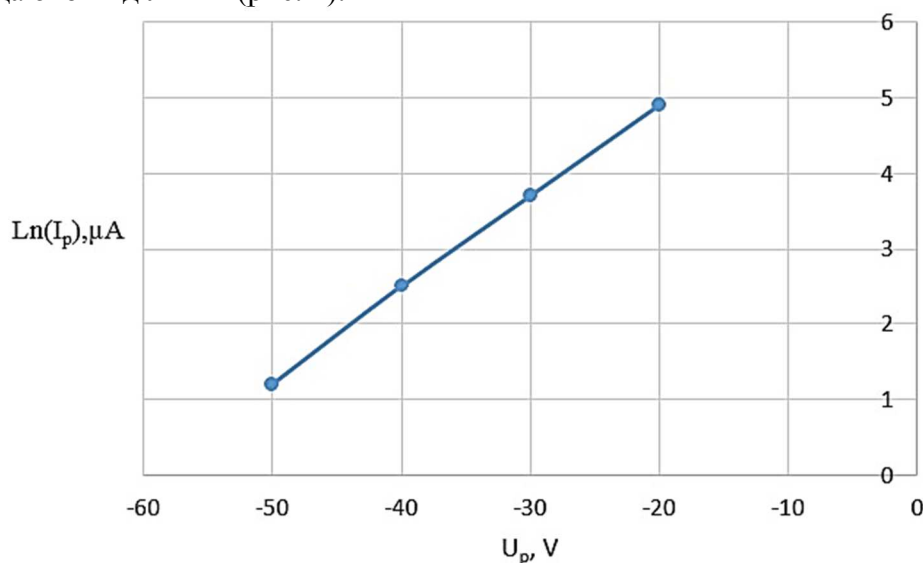


Рис. 2. Вольт-амперна характеристика ділянки плазми в напівлогарифмічному масштабі, на відстані 20 мм усередині катода при зміні зондового потенціалу в межах від -20 до -100 В, тиску аргону $P = 53$ Па

$$T_e = 11600 \frac{\Delta U_p}{\Delta \ln I_p}, \tag{2}$$

де $\Delta \ln I_p$ – приріст логарифма електронного струму; ΔU_p – зміна потенціалу зонда, що викликало це прирощення.

Концентрацію заряджених часток у плазмі розряду визначали за такою формулою [10]:

$$n_e = \frac{I_e}{eS} \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}}, \tag{3}$$

де I_e – електронний струм на зонд при потенціалі плазми; e , m_e – заряд та маса електрона відповідно; S – площа робочої поверхні зонду.

Проведені розрахунки показують, що при електронній температурі, що дорівнює $T_e = 8$ еВ і зондовому струмі, що відповідає потенціалу плазми $I_e = 0,045$ мА, маємо досить щільну плазму із концентрацією електронів в середині порожнини, що складає $n_e = 1,6 \cdot 10^{10}$ см⁻³.

Результати зондових вимірювань із зміною міжелектродного проміжку представлені на рис. 3.

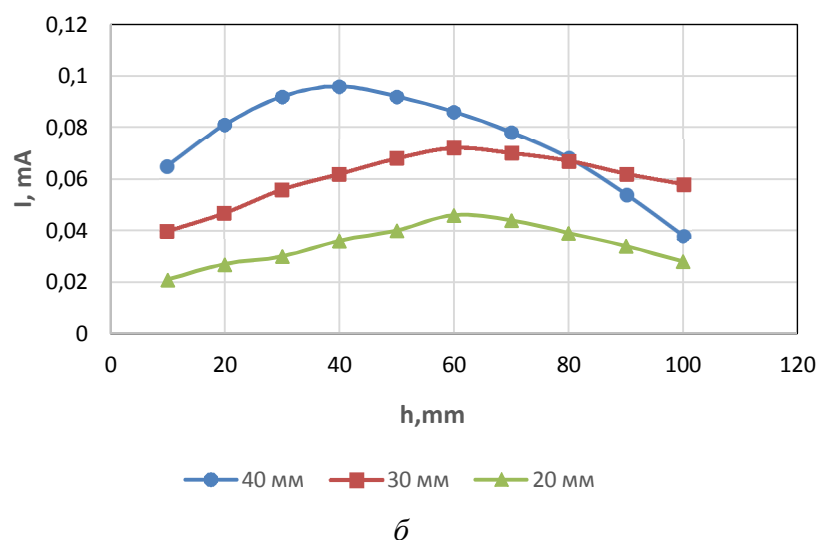
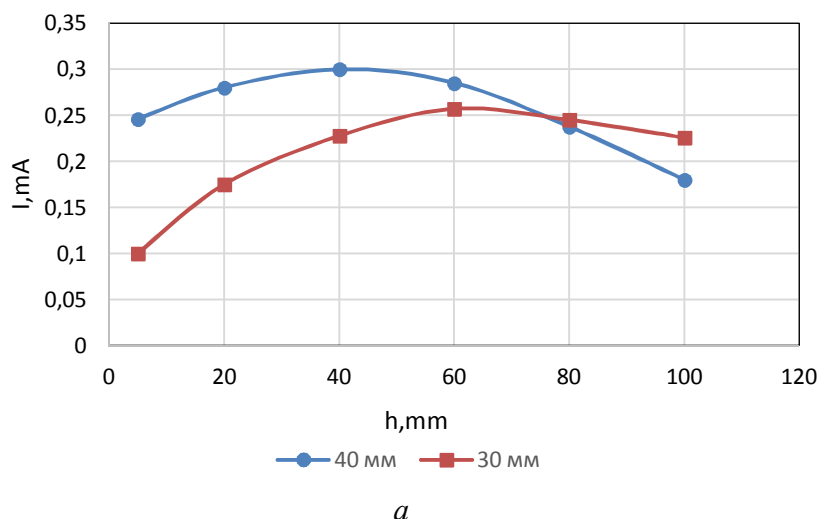


Рис. 3. Результати вимірювань: електронного струму (а), іонного струму (б) по висоті катодної порожнини h із міжелектродною відстанню в 20, 30 та 40 мм

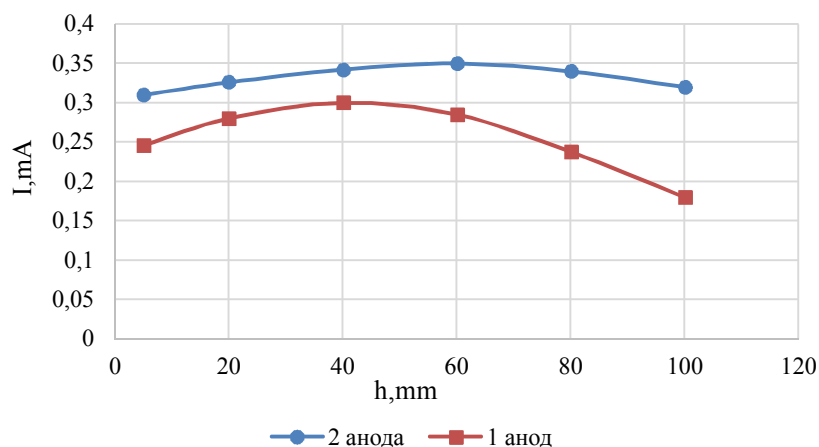
Експериментально отримані залежності показують, що характер зміни іонної та електронної температури по висоті катодної порожнини ідентичний, але значення струмів дещо відрізняються в сторону збільшення електронного струму. Це зумовлено особливостями низькотемпературної нерівноважної плазми, оскільки енергія електронів у такій плазмі значно перевищує енергію іонів.

В обох випадках збільшення міжелектродної відстані від 20 до 40 мм призводить до незначного посилення іонного та електронного струмів, при цьому спостерігається зсув піку наростання концентрації заряджених часток у напрямку ближчого до анода вихідного отвору катодної порожнини. Таким чином, при віддаленні анодного кільця від апертури порожнини відбувається незначне висування плазми в бік до анода, що підтверджується різким спадом концентрації заряджених часток на периферії системи.

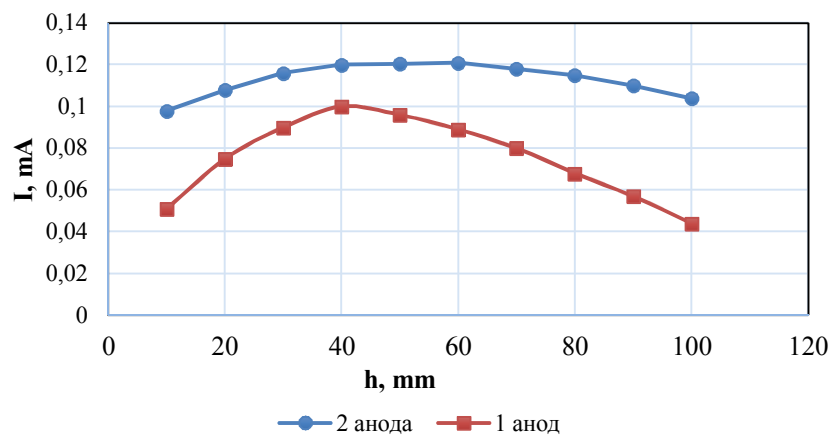
Зовнішній вигляд кривих з яскравим максимумом в центрі катода та стрімким спадом на віддаленій його ділянці обумовлюється, ймовірно, неоднорідністю плазми всередині порожнини викликаної нерівномірним розподілом потенціалу по його висоті. Це сприяє тому, що плазма проникає в катод на певну глибину і може не досягати його основи.

Для досягнення однорідного розподілення плазми по висоті катодної порожнини були проведені дослідження із введенням у газорозрядну систему допоміжного анода з метою підвищення іонізаційних та емісійних процесів на периферії катода.

Залежності, отримані в дослідах із двома анодами, представлені на рис. 4.



а



б

Рис. 4. Результати вимірювань: електронного струму (а), іонного струму (б) по висоті катодної порожнини h із додатковим анодом у газорозрядній системі

Вид кривих розподілу іонного та електронного струмів по катоду показує, що введення в коло розряду додаткового аноду призводить до деякого перерозподілу плазми всередині порожнини з характером, близьким до лінійного, чому свідчить верхня крива на графіках. Такий розподіл пов'язаний зі збільшенням генерації заряджених часток на віддалених ділянках катоду, оскільки розміщення другого аноду з протилежного катодного торця ініціює там появу емісійних процесів зі зростанням числа іонів, що бомбардують поверхню (рис. 5). Це призводить і до деякого підвищення як іонної, так і електронної температури в системі з двома анодами.

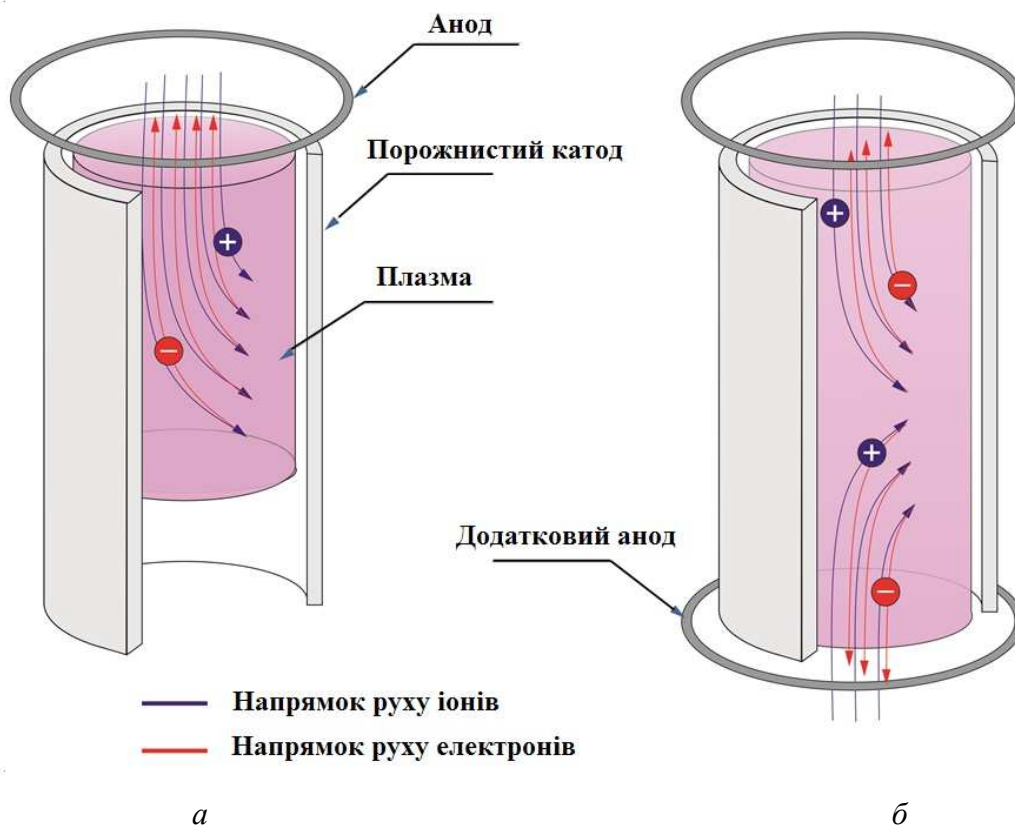


Рис. 5. Розподілення плазми в порожнистому катоді в системі з одним (а) та двома (б) анодами

Також з метою підсилення іонізації на периферії газорозрядної системи були проведені дослідження з визначення впливу зовнішнього прикладеного магнітного поля на поведінку заряджених часток у газорозрядному проміжку.

У цих досліджах катодна трубка розміщувалася всередині порожнини електромагніту, виконаного у вигляді мідної катушки з латунним осердям шириною 60 мм, що відповідає половині довжини катода. Живлення електромагніту забезпечували від джерела ВС-24 від якого на обмотки електромагніту подавався постійний струм величиною 2 та 4 А. Струм розряду підтримувався на рівні $I_p = 0,075$ А. При цьому напруга горіння розряду становила $U_p = 400$ В.

Передбачалося, що зовнішнє магнітне поле, прикладене до катода в площині повздовжній до дії розряду, можна використовувати як керуючий параметр для регулювання локального розподілу плазми всередині порожнини.

У процесі досліджень визначали вплив повздовжнього магнітного поля на концентрацію швидких γ -електронів усередині порожнини, впливом магнітного поля на рух іонів можна знехтувати, оскільки теплова швидкість іонів досить мала в порівнянні з електронною.

Результати експериментів наведені на рис. 6.

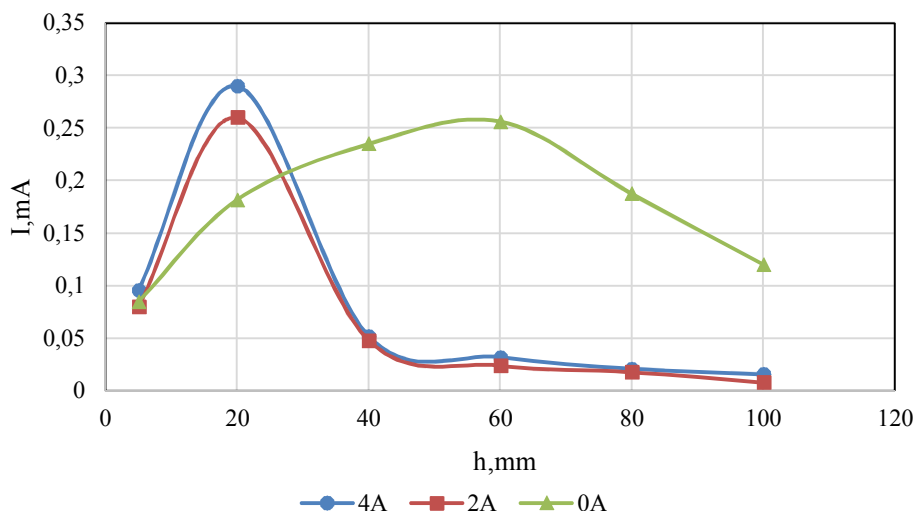


Рис. 6. Повздовжні залежності концентрації швидких електронів на зонд у розряді з порожнистим катодом у магнітному полі

Залежності, отримані під час експериментів, показують, що при прикладенні зовнішнього магнітного поля вид розподілу заряджених частинок різко трансформується з максимумом електронної концентрації біля ближчого до анода торця порожнини. Такий перерозподіл електронів по висоті катода пов'язаний із тим, що поява магнітного поля в газорозрядному проміжку призводить до відхилення кривизни руху емітованих катодом електронів у бік зменшення траєкторії, внаслідок чого електрони швидко покидають порожнину, майже не здійснюючи зіткнень. Це обумовлює різкий спад електронного струму і майже нульові його значення на периферії катода.

Для повного розуміння картини розрядних явищ, що відбуваються в зовнішньому магнітному полі, були проведені візуальні спостереження, які дозволили прояснити ситуацію і зробити такі висновки. Введення зовнішнього магнітного поля в газорозрядний проміжок призводить до зникнення ефекту порожнистого катода. Картина явищ, що спостерігалася, більш характерна для плоскопаралельного проміжку, коли плазма розряду перебуває в притиснутому до стінок катода стані, при цьому скорочується ефективна довжина темного катодного проміжку d_k , що бере участь в енергонасиченні електронів, а стінки катода поводяться як незалежні електроди (рис. 7).

Усе це призводить до зниження рівня іонізації й генерації заряджених частинок у газорозрядному проміжку загалом.

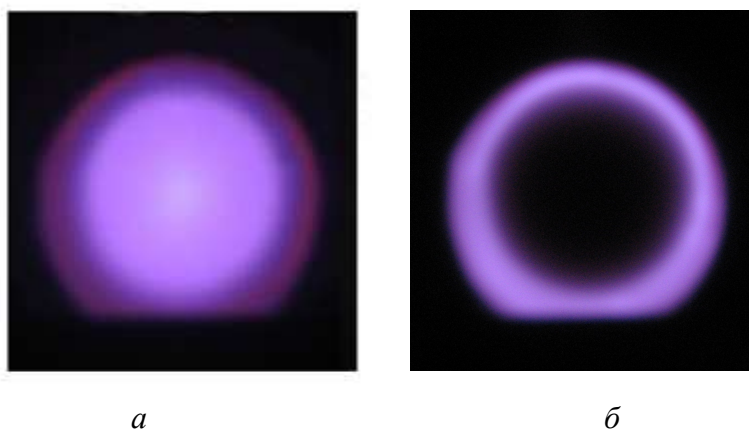


Рис. 7. Вплив зовнішнього магнітного поля на існування ефекту порожнистого катода: а – без магнітного поля – ефект спостерігається; б – в магнітному полі – ефект відсутній

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Отримані нами результати задовільно узгоджуються з результатами, наведеними в роботі [4], в якій показано, що в області досліджуваних тисків при накладанні зовнішнього магнітного поля на газорозрядний проміжок підтримання самостійної форми існування розряду неможливе внаслідок недостатньої іонізації викликаної відхиленням траєкторії руху електронів поперек магнітного поля.

Висновки відповідно до статті. Встановлено, що тліючий розряд, ініційований у порожнистому катоді, є ефективним джерелом очищення внутрішніх поверхонь довгих трубок малого діаметра.

Із використанням зондової методики встановлено, що в таких виробках розподіл концентрації заряджених часток, які беруть участь у процесі очищення поверхні катода, не є рівномірним із певним зсувом у бік до відкритого торця апертури, тобто до анода. Це великою мірою ускладнює процес очищення виробів, в яких $L \gg D$.

Показано, що ефективним способом досягнення рівномірності розподілення плазми всередині порожнини є введення додаткового анодного кільця з іншого відкритого торця катода.

Враховуючи вищезазначене, можна зробити висновок, що очищення внутрішньої поверхні довгих труб малого діаметра (в яких $L = 10D$) тліючим розрядом із використанням ефекту порожнистого катода ускладнене певними факторами, здебільшого пов'язаними із досить високою неоднорідністю розподілу плазми всередині катодної порожнини.

Список використаних джерел

1. Лозован А. А., Франгулов С. В., Чулков Д. В., Родин А. И. Методы очистки внутренних поверхностей труб малого диаметра плазмой тлеющего разряда перед нанесением покрытий. *Сварочное производство*. 2009. № 1. С. 28–31.
2. Bolotov G. P., Bolotov M. G., Prybytko I. O., Kharchenko G. K. Diagnosis of plasma glow discharge energy parameters in the processes of treatment small diameter long tubes. *II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*. Kharkiv, IEEE, 2016. P. 116–119.
3. Болотов Г. П., Болотов М. Г., Рижов Р. М. Активационна дія тліючого розряду в умовах дифузійного зварювання. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2011. № 1. С. 18–21.
4. Болотов Г. П., Рижов Р. М., Болотов М. Г. Очистка тлеющим разрядом металлических поверхностей перед диффузионной сваркой и пайкой в вакууме. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування*. 2009. № 57 С. 12–127.
5. Рогов А. В., Лозован А. А. Применение сетчатого полого катода для очистки подложек перед вакуумным напылением. *РНЦ «Курчатовский институт», «МАТИ»-РГТУ им. К. Э. Циолковского*. 2008. № 5. С. 99–103.
6. Lozovan A. A., Frangulov S. V., Chulkov D. V., Rodin A. I. Methods for cleaning the inner surface of small-diameter pipes with glow discharge plasma prior to depositing coatings. *K. E. Tsiolkovskii Moscow Aviation Technology Institute (MATI) Published online*. 28 Jun 2010.
7. Шехтман С. Р., Будилов В. В., Киреев Р. М. Использование разряда с полым катодом для обработки поверхности конструкционных материалов. *Физика и химия обработки материалов*. 2001. № 2. С. 31–35.
8. Москалев Б. И. Разряд с полым катодом. Москва: Энергия. 1969. 183 с.
9. Болотов М. Г. Дослідження локальних властивостей плазми тліючого розряду з порожнистим катодом стосовно до умов зварювального нагріву. *Вісник ЧДТУ*. 2013. № 1. С. 112–119.
10. Козлов О. В. Электрический зонд в плазме. Москва: Атомиздат, 1969. 144 с.

References

1. Lozovan, A. A., Frangulov, S. V., Chulkov, D. V., Podin, A. I. (2009). Metody ochistki vnutrennix poverpoxnostej trub malogo diametra plazmoj tleyushhego razryada pered naneseniem pokrytij [Methods for cleaning internal surfaces of small diameter pipes with glow discharge plasma before applying coatings]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 1, 28–31 [in Russian].

2. Bolotov, G. P., Bolotov, M. G., Prybytko, I. O., Kharchenko, G. K. (2016). Diagnosis of plasma glow discharge energy parameters in the processes of treatment small diameter long tubes. Proceeding from *II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)* (pp. 116–119). Kharkiv [in English].
3. Bolotov, G. P., Bolotov, M. G., Rizhov, R. M. (2011). Aktivaciina diia tliiuchoho rozryadu v umovah difuziinoho zvaryuvannia [Activating effect of the glow discharge in conditions of diffusion welding]. *Visnik Donbaskoi derzhavnoi mashinobudivnoi akademii – Bulletin of the Donbas State Machine-Building Academy*, 1, 18–21 [in Ukrainian].
4. Bolotov, G. P., Rizhov, R. M., Bolotov, M. G. (2009). Ochistka tleiushim razriadom metallicheskikh poverhnostei pered diffuzionnoi svarkoi i paikoi v vakuume [Cleaning by glow discharge of metal surfaces before diffusion welding and soldering in vacuum]. *Visnik NTUU «KPI». Seriiia mashinobuduvannia – Bulletin of the NTUU "KPI". Series of mechanical engineering*, 57, 12–127 [in Russian].
5. Rogov, A. V., Lozovan, A. A. (2008). Primenenie setochnogo pologo katoda dlya ochistki podlozhek pered vakuumnym napyleniem. [The use of a grid hollow cathode for cleaning substrates before vacuum deposition]. *RNC «Kurchatovskij institut», «MATI»-RGTU im. K. E. Tsiolkovskogo – RRC «Kurchatov Institute», «MATI»-RSTU. K. E. Tsiolkovskiy*, 5, 99–103 [in Russian].
6. Lozovan, A. A., Frangulov, S. V., Chulkov, D. V., Rodin, A. I. (28 Jun 2010). Methods for cleaning the inner surface of small-diameter pipes with glow discharge plasma prior to depositing coatings. *K. E. Tsiolkovskii Moscow Aviation Technology Institute (MATI)*. Published online.
7. Shehtman, S. R., Budilov, V. V., Kireev, R. M. (2001). Ispolzovanie razriada s polym katodom dlia obrabotki poverhnosti konstruktsonnykh materialov [Using a hollow cathode discharge for surface treatment of structural materials]. *Fizika i khimiia obrabotki materialov – Physics and chemistry of materials processing*, 2, 31–35 [in Russian].
8. Moskalev, B. I. (1969). *Razriad s polym katodom [Hollow Cathode Discharge]*. Moscow: Energiia [in Russian].
9. Bolotov, M. G. (2013). Doslidzhennia lokalnykh vlastivostei plazmi tliiuchoho rozriadu z porozhnistym katodom stosovno do umov zvariuvannia nagrivu [Investigation of local properties of a plasma of glow discharge with a hollow cathode in relation to welding conditions]. *Visnik ChDTU – Bulletin of the ChTTU*, 1, 112–119 [in Ukrainian].
10. Kozlov, O. V. (1969). *Elektricheskii zond v plazme [Electric probe in plasma]*. Moscow: Atomizdat [in Russian].

UDC 621.791.01.6

Maksym Bolotov

INVESTIGATION OF GLOW DISCHARGE'S ENERGY PARAMETERS IN SMALL DIAMETER LONG TUBES

Urgency of the research. *Cleaning the interior surfaces of the pipes is a mandatory operation, preceding the application of the coating using the methods of vacuum spraying. Significant disadvantages of traditionally applied methods of chemical and electrochemical purification of such surfaces conditioned the widespread use of plasma technologies based on low-temperature plasma glow discharge.*

Target setting. *In particular, to date, the most common way to clean surfaces from various kinds of contaminants is ion spraying using a gas-discharge plasma of glow discharge. This cleaning method allows efficient removal of major types of contaminants such as fats, adsorbed water, gases, oxides, and allows processing surfaces of different configurations.*

Actual scientific researches and issues analysis. *It is shown that the application of the glow discharge in the processes of purification and coating on the inner surface of pipes with a diameter of 56 mm in length 120 mm with the application of transverse magnetic field is shown. However, there are a number of difficulties, mainly related to the low productivity of the process, since the cleaning of the inner surface of such pipes was carried out for 60 minutes.*

Identification of unexplored parts of the general problem. *It is possible to increase the processing efficiency by applying a glow discharge initiated in a hollow cathode. However, for today there are no data on the distribution of the concentration of charged particles inside the product, in which $L \gg d$.*

The purpose of the work. *The purpose of this work is a comparative analysis of stress-strain state (NDS) in the diffusion welding of compounds from heterogeneous materials, which occurs when heated in a normal glow discharge and glow discharge, initiated in a hollow cathode.*

The statement of basic materials. *Using the probe method, the energy characteristics of the plasma of the glow discharge initiated in the hollow cathode were studied in relation to the conditions for the cleaning of the interior surfaces of long pipes of small diameter. It is shown that with a pressure in a gas-discharge chamber of 53 Pa and a discharge current of 0.075 A, a sufficiently dense plasma with a concentration of charged particles at the level of $1.6 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ is formed in*

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

the investigated geometry of the cathode cavity, which is characterized by high heterogeneity in height of the cavity (40 ... 60 %). It is also shown that an effective mechanism of influence on the distribution of plasma in the middle of the cathode, in which $L \gg D$ is the change in the distance of the cathode anode, a decrease of which from 40 to 20 mm increases the uniformity to 15 ... 20 %, and the introduction of an additional anode ring in the discharge scheme - to 8 ... 10 %.

Conclusions. *It has been shown that the purification of the inner surface of long pipes of small diameter (in which $L = 10D$) by smoldering discharge using the effect of a hollow cathode is complicated by a number of factors, mainly due to the rather high heterogeneity of the distribution of the plasma inside the cathode cavity.*

Keywords: *plasma; glow discharge; contact hollow cathode; electric probe.*

Fig.: 7. References: 10.

Болотов Максим Геннадійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Bolotov Maksym – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Welding Technology and CAD/CAM/CAE Systems of Building Structures, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: bolotovmg@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0915-4132>

ResearcherID: H-4183-2014