

Максим Болотов

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ НЕСТАБІЛЬНОСТЕЙ ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ СЕРЕДНІХ ТИСКІВ В УМОВАХ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

Актуальність теми дослідження. Тліючий розряд середніх тисків знайшов значне поширення в різних технологічних процесах хіміко-термічної обробки, нанесення покриттів, зварювання і паяння тощо.

Постановка проблеми. Однак поряд зі сприятливими передумовами виявили й різні види нестабільності газорозрядної плазми, що призводять до відхилення ходу технологічного процесу від заданих параметрів, зумовлених переходом тліючого розряду в електричну дугу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Так, перші дослідники відзначали часткову або повну втрату стійкості тліючого середніх тисків і переходу його в більш стабільну форму – електричну дугу.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Перехід тліючого розряду в дуговий супроводжується стисненням позитивного стовпа розряду і різким скороченням площі катодної плями на виробі, що призводить до значного збільшення щільності енергії в цій плямі. Контракція (стиснення) позитивного стовпа тліючого розряду призводить до зниження або повного зриву генерації потужності лазерного випромінювання, підвищення щільності енергії в плямі нагріву (катодній плямі) сприяє перегріву і неприпустимому оплавленню окремих ділянок оброблюваних деталей під час зварювання в твердому стані, пайці й хіміко-термічній обробці.

Мета роботи. Аналіз гіпотез, що існують на сьогодні в літературі, за допомогою яких їхні автори пояснюють основні причини втрати стійкості потужнострумового тліючого розряду і переходу його в електричну дугу.

Виклад основного матеріалу. Нестабільності потужнострумового тліючого розряду вивчалися з погляду процесів, що протікають на катоді та прикатодній області, контракції позитивного стовпа під впливом високих струмів і тисків та впливу зовнішнього ланцюга. Вивчалася контракція позитивного стовпа розряду в аргоні при тисках в інтервалі від одиниць мм рт. ст. до сотень мм рт. ст. у циліндричних трубках діаметром 2,6 і 3,7 см. У результаті було виявлено, що при тисках нижче деякого критичного значення струм практично не контрагував.

Висновки відповідно до статті. Встановлено, що основними причинами нестабільності тліючого розряду є рельєф поверхні катода; хімічний склад катода й газового середовища в міжелектродному проміжку; конструктивні особливості катода; параметри режиму горіння розряду, насамперед значення струму розряду і тиску газу; опір зовнішнього ланцюга, що живить розряд; провідність міжелектродного проміжку.

Ключові слова: тліючий розряд; нестійкість; газорозрядна плазма; електрична дуга; контракція позитивного стовпа. Бібл.: 49.

Актуальність теми дослідження. Тліючий розряд при середніх тисках 0,1...100 кПа використовують для безпосереднього впливу на оброблюваний матеріал, для отримання електронних та світлових пучків.

У промисловості тліючий розряд при тисках 0,1...1000 Па застосовують для нанесення покриттів катодним розпиленням, травлення кремнію у процесі виробництва мікроелектронних приладів, хіміко-термічної обробки виробів. Проведено лабораторні дослідження процесів осаджування металів з газової фази, які здійснюються при тиску 0,13...6,65 кПа, напрузі на розряді до 1500 В і густині енергії на катоді до 100 Вт/см². Максимальна повна потужність розряду, що використовується в промислових умовах для азотування сталей, досягає 100 кВт.

Постановка проблеми. Однак поряд зі сприятливими передумовами були виявлені й різні види нестабільності газорозрядної плазми, що призводять до відхилення ходу технологічного процесу від заданих параметрів, або роблять неможливим його здійснення. Передусім це пов'язано з тим, що за певних умов може відбуватися формозміна тліючого розряду, що супроводжується збільшенням струму і зниженням падіння напруги в міжелектродному проміжку, що є характерною ознакою дугових розрядів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Так, уже в перших роботах, пов'язаних із технологічними застосуваннями тліючого розряду [1; 2] відзначалися певні труднощі, головним чином пов'язані з частковою або повною втратою стійкості тліючого розряду й переходом його в більш стабільну форму – електричну дугу. У найзагальнішому випадку це явище може бути пояснено тим, що самостійний тліючий розряд є проміжною формою газових розрядів і тому за певних умов прагне перейти в більш стійку форму, що характеризується більш низькою напруженістю електричного поля в міжелектродному проміжку, тобто в електричну дугу. Це явище було помічено дослідниками в ла-

бораторних умовах ще задовго до початку технологічного застосування плазми тліючого розряду в дослідно-технологічних і промислових цілях. Відтоді (починаючи з першої половини XX століття) ця проблема перебуває в полі зору фахівців і до теперішнього часу є значна кількість робіт, присвячених її вивченню і способам вирішення.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Перехід тліючого розряду в дуговий супроводжується стисненням позитивного стовпа розряду і різким скороченням площі катодної плями на виробі, що призводить до значного збільшення щільності енергії в цій плямі. Конtrakція (стиснення) позитивного стовпа тліючого розряду призводить до зниження або повного зриву генерації потужності лазерного випромінювання [3], підвищення щільності енергії в плямі нагріву (катодній плямі) сприяє перегріву і неприпустимому оплавленню окремих ділянок оброблюваних деталей під час зварювання в твердому стані [4], пайці й хіміко-термічній обробці [5].

Мета роботи. Метою роботи є вивчення та аналіз гіпотез, що існують нині в літературі, за допомогою яких їхні автори пояснюють основні причини втрати стійкості потужнострумowego тліючого розряду і переходу його в електричну дугу.

Виклад основного матеріалу. Нестабільності потужнострумowego тліючого розряду вивчалися вченими з погляду процесів, що протікають на катоді та прикатодній області, контракції позитивного стовпа під впливом високих струмів і тисків та впливу зовнішнього ланцюга.

Вплив на стійкість розряду процесів на катоді та в прикатодній області. У роботі [6] розглянуто перехід від тліючого розряду до дугового з погляду теплових ефектів на поверхні катода. У разі тліючого розряду щільність катодного струму зі збільшенням тиску газу зростає пропорційно P^2 , в той час як товщина області катодного падіння потенціалу зменшується пропорційно P . Таким чином, енергія, що припадає на одиницю об'єму області катодного падіння, буде збільшуватися пропорційно P^3 . З цієї причини при високому тиску газу катод може настільки сильно нагріватися, що тліючий розряд перейде в дуговий з утворенням катодної плями й позитивного стовпа дуги. Відповідним охолодженням цьому переходу можна запобігти або пересунути в область більш високої щільності струму.

Стадія переходу від тліючого розряду до дугового описана в роботі Р. Г. Вестберга [7]. При збільшенні струму нормальний тліючий розряд переходить в аномальний і зростає величина катодного падіння потенціалу, що викликає зростання емісії електронів із катода. У свою чергу, зростання емісії призводить до швидкого наростання струму і зменшення напруженості поля в катодній області до її величини в умовах дугового розряду.

Велику роль у формуванні уявлень про механізм переходу тліючого розряду в дуговий зіграла висловлена С. С. Маккоуном [8] ідея про нестабільність аномального тліючого розряду, зумовлена автоелектронною емісією катода. Проти окремих активних ділянок катода створюються області з підвищеною концентрацією зарядів. Володіючи великою рухливістю, електрони швидше покидають ці області, ніж позитивні іони. Утворений унаслідок цього щільний позитивний заряд сприяє подальшому збільшенню автоелектронної емісії на активних ділянках катода. Цей процес взаємного посилення емісії й об'ємного заряду здатний привести до контракції розряду.

Продовжуючи вивчення процесу переходу тліючого розряду в дугу, С. С. Маккоун у роботі [9] досліджував цей процес щодо нормального тліючого розряду при тисках газу 1,33...6,65 кПа. З отриманих автором осцилограм випливає, що навіть коли умови сприятливі для переходу до низьковольтного дугового розряду, такий перехід здійснюється не на кожному напівперіоді хвилі напруги. Виходячи з цього, дослідник зробив висновок, що процес переходу відбувається тільки в певних місцях поверхні катода, де емісія електронів відносно велика. У разі нетугоплавких металів (наприклад, мідь) струми емісії можуть виникнути за рахунок холодної емісії, викликані локалізованим позитивним просторовим зарядом, тобто відповідно до попередньої його теорії.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Механізм утворення локалізованих просторових зарядів пояснюється в роботі [10] таким чином: будь-яка зміна величини γ (де γ – другий коефіцієнт Таунсенда, що характеризує кількість електронів, що падають на один іон, що підійшов до катода) зумовлює в різних точках на поверхні катода більший або менший струм. У місцях забруднень, окалини, окисної плівки робота виходу електронів менше, тому кожен іон вибиває електронів більше, ніж у середньому по катоду. Електронна хмара, що утворюється, сильніше взаємодіє з електричним полем і електрони інтенсивніше віддаляються від катода. Мають, унаслідок підвищеної емісії не вдається отримати тліючий розряд на катодах, покритих плівкою окису або окисдованих алюмінієм. В роботі [11] було помічено, що розряд у цьому випадку має незвичайну структуру: темний простір відсутній, а щільність струму надмірно велика. Цьому розряду було дано назву «розпилений розряд».

У роботі [12] підтверджується, що величина порогового струму, що приводить до утворення дугового розряду, залежить від чистоти металу й наявності на ньому плівок. Особливо істотним цей механізм переходу може виявитися для металів, які важко піддаються очищенню.

Г. Плісс [13], виконуючи досліди з тліючим розрядом, відзначив, що якщо з поверхні катода відбувається випаровування металу в достатніх кількостях, то тліючий розряд може перейти в дуговий. Такий самий результат отримується, якщо в поверхні катода утворюються пари зі стороннього матеріалу. Г. Плісс доходить висновку, що оскільки точка переходу від одного розряду до іншого безпосередньо не залежить від температури катода, а дуговий розряд можливий і при малих струмах між холодними електродами, утворення пари не завжди зумовлено чисто тепловими ефектами. Він описує досліди, в яких на один із двох вольфрамових електродів наносилася сірка; коли катодом служив електрод, покритий сіркою, легко виникав дуговий розряд. Учений підкреслює важливу роль утворення парів металу в поверхні катода і вважає, що таке випаровування металу, мабуть, відбувається з поверхні із сірчаним покриттям.

У роботі [14] описані досліди з мідними електродами в повітрі й інших газах при тиску до 1 атм. Виявилось, що в чистому водні після попередньої фази єдиним стійким видом розряду в діапазоні струмів до 10 А є тліючий розряд. На чистій мідній поверхні спалахів дуги не відбувається, але спостерігається зародження дугового розряду на неочищених ділянках електродів. У разі срібних електродів неможливо отримати ніякої іншої форми розряду, крім тліючого. Стабільний дуговий розряд спостерігається в чистих газах на катодах з графіту. Науковці вважають, що ці результати вказують на важливу роль оксидних плівок для випадку утворення холодної катодної дуги.

У роботі [15] повідомляється про експерименти, які підтверджують дані попередньої роботи для мідних електродів. Між знову зачищеними електродами виникав тліючий розряд. Наступні запалювання розряду на цих самих електродах приводили до виникнення стійкої дуги. Такий самий результат виходив і при попередньому окисненні електродів. Новим виявився результат, отриманий при очищенні міді за допомогою дихромату калію; у цьому випадку легко виникав дуговий розряд. Після обробки азотною кислотою виникає тліючий розряд. Г. Д. Кобіне зазначає, що після очищення дихроматом калію на електродах спектроскопічно виявляється присутність калію, причому навіть після ретельного промивання водою. Автор висловлює припущення, що поряд з оксидним механізмом на виникнення дугового розряду може впливати і присутність на катоді матеріалу з низькою роботою виходу, такого, як калій.

Енгель та Штенбек [16] розвинули кількісну теорію процесу переходу тліючого розряду в дуговий, ввівши в розгляд поряд із вторинними електронами, що вириваються іонами з катода, термоелектрони, утворені за рахунок термоіонної емісії. У цьому випадку електричний струм катода складається зі струму, зумовленого вторинними електронами і струму термоіонної емісії.

За цією теорією дуговий розряд між електродами з менш тугоплавких металів, ніж вольфрам, не може підтримуватися процесом термоїонної емісії катода. Згідно з [17] механізм термоїонної емісії для вольфрамового катода починає відігравати суттєву роль з температури приблизно 2000 °С.

У статті [18] розглянуто зв'язок між термоїонним механізмом перехідного процесу й механізмом емісії полем у разі вольфрамового катода. Коли температура катода досягає значень, за яких стає помітною термоїонна емісія, час переходу від тліючого розряду до дугового, виміряний по різкому падінню напруги на розрядній трубці, зростає від 10^{-8} до 10^{-4} сек. Дослідження проводилися в середовищі азоту, водню й аргону.

Деякі дослідники вивчали вплив складу атмосфери на стадію переходу тліючого розряду в дуговий. Так, у [19] описані експерименти з вивчення тліючого розряду і процесів переходу від тліючого розряду до дугового в повітрі, кисні й азоті при тиску 1 атм і у водні при тиску від 1 до 13 атм у різних комбінаціях електродних матеріалів. Як впливає з цих дослідів, тліючий розряд може підтримуватися у водні до струмів 14 А і тисків 13 атм. У водні тліючий розряд досить стабільний. Тліючий розряд у водні при струмі 2 А між мідними електродами існував протягом декількох годин без стрибків напруги. Навіть при 10 А тліючий розряд у цих умовах міг існувати до 15 хв. Щоб досягти таких великих струмів і уникнути переходу тліючого розряду в дуговий, необхідно повільно збільшувати струм розряду. Розряд відбувався між охолоджуваними водою електродами. У більш пізній роботі [20] стверджується, що тліючий розряд можливий при тиску газового середовища не вище 100 мм рт. ст. і лише за рахунок спеціальних заходів цей тиск може бути підвищено.

У роботах [21; 22; 23] розглядається вплив на можливість переходу тліючого розряду в дугову форму. Наявність у зоні нагріву виробів зазорів певного розміру призводить до одночасного існування кількох видів тліючого розряду, що володіють різною провідністю. Зазвичай це нормальний тліючий розряд і розряд у порожнистому катоді. Останній утворюється в зазорах, щілинах і порожнинах, де відбувається злиття негативних тліючих світінь. Осциляція електронів у зоні злиття викликає підвищене утворення іонів і збільшення щільності струму, що змінює режим нагріву. Нагрів у порожнині здійснюється швидше, ніж в інших місцях катода. При цьому товщина тліючого світіння залежить від тиску газу. Допустима величина зазору, за якої не відбувається утворення ефекту порожнистого катода, визначається в [22] як:

$$2d_k \leq \Delta \leq 4d_k, \quad (1)$$

де Δ – величина зазора; d_k – ширина зони катодного падіння потенціалу.

При середніх тисках величина d_k коливається в межах 0,01...1,3 мм. З розглянутих теорій можна зробити висновок, що в переході тліючого розряду в дугову форму значну роль відіграють електрони емісії. Збільшення електронного струму викликає і зростання сумарного струму розряду, а також призводить до зменшення катодного падіння потенціалу, що є суттєвою ознакою переходу тліючого розряду в електричну дугу. Збільшення сили струму, а отже, і концентрації електронів сприяє збільшенню кількості активізації в позитивному стовпі.

Контракція позитивного стовпа тліючого розряду. Стиснення або контракція позитивного стовпа газового розряду проявляється в тому, що струм у розрядній трубці зосереджений у малій області поблизу осі трубки [24; 25]. За певних умов (зі збільшенням тиску газу або потужності) розряд заповнює не всю область, в якій порушується електричне поле, а горить у вигляді одного або декількох вузьких шнурів, не пов'язаних, зазвичай, зі стінками розрядної судини.

Експериментально контрагований розряд досліджувався різними авторами. Так, наприклад, у [26; 27; 28; 29] вивчалася контракція позитивного стовпа розряду в аргоні при

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

тисках в інтервалі від одиниць мм рт. ст. до сотень мм рт. ст. у циліндричних трубках діаметром 2,6 і 3,7 см. У результаті було виявлено, що при тисках нижче деякого критичного значення струм практично не контрагував. При тиску ж вище критичного контракція настає при силі струму, що становить частки ампера. Контрагування при поступовому збільшенні сили струму відбувається стрибком, що супроводжується різким зменшенням радіуса області світіння розрядної трубки. Одночасно стрибкоподібно зменшується поздовжня складова електричного поля. Пояснення явища контракції дано в роботі [30]. Розглядається контрагований стан у парах ртуті, які перебувають при тисках досить високих, щоб для розрахунків розряду можна було користуватися наближенням локальної термодинамічної рівноваги. Пояснення полягає в наступному. Температура газу (парів ртуті) на осі розрядної трубки набагато вище температури газу під стінками (у зв'язку з охолодженням стінок трубки). Оскільки тиск газу в трубці постійний, щільність газу поблизу осі трубки нижче, ніж у стінок. Це призводить до зростання електронної температури і, отже, до збільшення швидкості іонізації, тобто до подальшого збільшення електронної щільності. Подібний погляд на природу контракції позитивного стовпа нині поділяється багатьма авторами. У [31; 32; 33] цей підхід використаний для пояснення явища контракції при середніх тисках, коли електронна та газова температури сильно розрізняються. На основі експериментальних даних у цих роботах робиться висновок, що в неконтрагованому стані основним механізмом загибелі заряджених частинок є їх дифузія до стінки трубки з наступною нейтралізацією на стінці.

У роботах [34; 35] контракція при середніх тисках також пояснюється з урахуванням неоднорідності електронної температури й об'ємної загибелі електронів. Однак на відміну від [26; 27] розглядається випадок, коли дифузією електронів нехтувати не можна. Приймається, що джерело електронів зосереджено на осі розряду. Електрони за рахунок дифузії будуть проникати в практично неіонізовані шари газу. Причому, якщо константа швидкості рекомбінації досить велика, то розмір області, зайнятої розрядом, порядку відстані, на яке продифундують заряджені частинки до моменту їх повної рекомбінації. Великі значення коефіцієнта рекомбінації потрібні і для пояснення контракції позитивного стовпа при середніх тисках у припущенні утворення в розглянутих умовах значної кількості молекулярних іонів [36]. При цьому нерівномірний радіальний розподіл температури викликає нерівномірний розподіл щільності важких частинок, яке відповідно до рівняння газового стану зростає від осі до стінок трубки. У силу різкої залежності константи швидкості іонізації атомів і молекул електронним ударом від відношення E/N_0 (де E – напруженість електричного поля; N_0 – концентрація нейтральних частинок) це призводить до того, що зазначена константа виявляється істотно відмінною від нуля лише у вузькій області поблизу осі розрядної трубки.

При цьому характер радіального розподілу щільності електронів n_e істотно залежить від відношення між характерним часом об'ємної рекомбінації зарядів заряджених частинок:

$$\tau_{рек} \approx 1 / \alpha_{pe} n_e \quad (2)$$

і часом їх відходу на стінки в процесі дифузії:

$$\tau_{др} \sim R^2 / 6D_a, \quad (3)$$

де $\alpha_{рек}$ – коефіцієнт рекомбінації електронів та іонів; N_e – характерне значення щільності електронів поблизу осі розрядної трубки; D_a – коефіцієнт амбіполярної дифузії.

У разі $\tau_{др} \ll \tau_{рек}$ заряджені частинки, що утворюються поблизу центру розрядної трубки, йдуть на стінки. Радіальний розподіл густини електронів n_e є плавно спадаючою від осі до стінок функцією.

У роботі [37], в якій досліджувався позитивний стовп у чистих інертних газах з малою домішкою азоту при тисках до 200 мм рт. ст. Контракція позитивного стовпа пояснюється переважанням дисоціативної рекомбінації на периферії шнура. При цьому те-

температура по перетину трубки має непостійний характер. У більш холодних областях можливе утворення молекулярних іонів, тому на периферії зростає швидкість дисоціативної рекомбінації. Заряджені частинки виходять із шнура за рахунок амбіполярної дифузії і рекомбінують на кордонах шнура.

У роботах [38; 39] розглядається контракція в інертних газах з добавкою електронегативних домішок. Ці домішки, як показує досвід [40], підсилюють ефект контракції і знижують струм і тиск, при яких настає шнурування тліючого розряду, що супроводжується стрибкоподібним збільшенням струму. У цьому випадку явище різкого збільшення струму пояснюється [41; 42] поряд із нагріванням газу, загибеллю електронів у результаті процесу прилипання до молекул електронегативної домішки. Рекомбінаційними втратами нехтується.

Таким чином, поява нестійкості позитивного стовпа середніх тисків вже при малій щільності струму, що призводять до контракції, пов'язане з неоднорідним нагріванням газу, з умовами загибелі електронів, а також з кінцевим значенням теплопровідності газу й електронів.

Вплив зовнішнього ланцюга на стійкість розряду. До параметрів зовнішнього ланцюга, що живить тліючий розряд, можна віднести струм розряду, напругу, прикладену до електродів, і опір, включений послідовно з розрядом. Причому струм є функцією від величини цього зовнішнього опору. Тому слід розглядати вплив на процес горіння розряду величини зовнішнього опору й напруги, прикладеного до міжелектродного проміжку.

У роботі [43] розглянуто природу нестійкості, що виникає під час переходу розряду від режиму горіння в усьому об'ємі трубки в контрагований стан. Тиск газу вважався постійним і однорідним. Вплив зовнішнього електричного кола враховує співвідношення:

$$\Sigma = iR_{\text{вн}} + El_c, \quad (4)$$

де Σ – електрорушійна сила джерела струму; $R_{\text{вн}}$ – зовнішній опір; E – напруженість електричного поля у стовпі; l – довжина позитивного стовпа.

У розрахунки вводилася величина, що характеризує відношення опору розряду R_p до зовнішнього опору $R_{\text{вн}}$. Запропонований у роботі критерій границі стійкості розряду свідчить, що при струмі I , тиску газу P і діаметрі позитивного стовпа D зовнішній опір $R_{\text{вн}}$ стабілізує розряд у разі, якщо добуток сили струму розряду на тиск газу менше деякої критичної величини $(I \cdot P)_{\text{кр}}$. У свою чергу, величина $(I \cdot P)_{\text{кр}}$ пов'язана в роботі з параметром $D \cdot P / 2$ і різними значеннями:

$$\sigma = \frac{1}{1 + \left(\frac{R_p}{R_{\text{вн}}} \right)}. \quad (5)$$

У роботі [44] зроблено висновок, що при $R_{\text{вн}} = 0$, тобто при $\sigma \rightarrow 0$ розряд завжди нестійкий, а при $\sigma = 1$ – стійкий. Розрахунки, виконані в роботі [45] відповідно до запропонованої методики, дали орієнтовні значення $R_{\text{вн}} \approx \frac{1}{3} R_p$, що помітно нижче значень, встановлених експериментально. Це може бути викликано тим, що запропонований критерій не пов'язаний із внутрішніми параметрами розряду (родом газу, формою і матеріалом електродів, межелектродною відстанню тощо). І тим більше не пов'язаний із причинами появи нестійкостей, які можуть сприяти переходу тліючого розряду в дуговий і при $(I \cdot P) < (I \cdot P)_{\text{кр}}$.

Якісно механізм нестійкості позитивного стовпа за наявності зовнішнього опору, вивчений у [46], пояснюється таким чином. Незначне збільшення електронної щільності в будь-якому місці неконтрагованого розряду призводить до додаткового нагрівання газу, яке супроводжується розширенням газу і зменшенням його щільності, що, у свою чергу, призводить до підвищення електронної температури і, як наслідок, до зростання швидкості іонізації, і значить, до подальшого зростання обурення електронної щільності, що виникло в початковий момент часу. Одночасно зі збільшенням електронної

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

щільності збільшиться і струм у ланцюзі розрядної трубки, що призведе до збільшення падіння напруги на зовнішньому опорі і, отже, до зменшення напруженості електричного поля всередині стовпа. Зменшення E приведе до зменшення електронної температури, що, у свою чергу, сповільнить наростання електронної лавини. Тобто видно, що зовнішній опір виконує функцію стабілізуючого фактора.

У роботі [47] розглядається стійкість стаціонарного стану розряду за наявності зовнішнього опору з урахуванням зміни поперечного перерізу розряду. Зміну напруги на розряді в момент флуктуації автор записує як:

$$dV = S_{\perp} R_{\text{ен}} dj_o, \quad (6)$$

де dV , dj – зміна напруги і щільності струму на розряді в момент флуктуації; S_{\perp} – поперечний розмір розряду.

Автор розглядає двомірну задачу, коли характерний час руху іона в прикатодній зоні в поздовжньому напрямку порівняно з часом відходу його в поперечному напрямку. Однак ця умова відповідає розряду низького тиску (набагато менше 133 Па), коли протяжність прикатодної зони велика і її можна порівняти з поперечним перерізом розряду, і тому характерна величина $R_{\text{ен}}$, визначена згідно з цією методикою, на кілька порядків перевищує ті, що реально використовуються для розрядів середніх тисків ($0,13 \dots 13,3 \text{ кПа}$) в умовах зварювання.

Імпульсна зміна напруги на розрядному проміжку в момент включення джерела живлення при повторному запалюванні розряду викликає різкий нагрів газу на осі розряду й появу ударної хвилі іонізації, що приводить до контракції тліючого розряду і подальшого утворення дугового розряду. Це відбувається при запалюванні розряду в холодному газі при $\frac{du}{dt} \geq 10^8 \text{ В/сек}$ [48]. При зниженні швидкості прикладення напруги

до $\frac{du}{dt} \approx 10^6 \text{ В/сек}$ і нижче за певних умов вдається отримати тліючий розряд.

Таким чином, можна констатувати помітну роль зовнішнього опору в забезпеченні стійкості тліючого розряду, у тому числі й в умовах зварювання і паяння. Без зовнішнього опору розряд буде нестійкий. Проте вибір величини цього опору проводиться, як правило, практичним шляхом за допомогою проведення досліджень, що затягує процес відпрацювання технології і може призводити до втрати заготовок унаслідок оплавлення їх електричною дугою, що виникає. Наявні в літературі розрахункові методики визначення величини зовнішнього опору досить трудомісткі, вимагають значної кількості емпіричної інформації, тому точність їх невисока і застосовуватися вони можуть дуже обмежено.

Висновки відповідно до статті. З огляду на вищенаведене впливає, що проблема стійкості тліючого розряду є багатофакторною. До основних причин, що сприяють переходу тліючого розряду в електричну дугу, згідно з розглянутими роботами можна віднести:

- рельєф поверхні катода (шорсткість, задирки та ін.);
- хімічний склад катода і газового середовища в міжелектродному проміжку;
- конструктивні особливості катода (габарити, маса, наявність на поверхні щілин і зазорів);
- параметри режиму горіння розряду, насамперед значення струму розряду і тиску газу;
- опір зовнішнього ланцюга, що живить розряд;
- провідність міжелектродного проміжку.

Зважаючи на зазначене також впливає, що автори гіпотез неоднозначно визначають значущість вказаних факторів у процесі стабілізації тліючого розряду. Зокрема, у роботах [48; 19], присвячених впливу величини тиску газу в розрядній камері, наведені критичні значення тиску, відповідні стійкому розряду, що розрізняються на кілька порядків – від $0,65 \text{ кПа}$ до $13,3 \text{ кПа}$ і навіть до 1200 кПа відповідно. Також значно розріз-

няються в роботах граничні значення струму розряду – від сотих часток ампера [49] до десяти ампер [19]. Що стосується впливу габаритів і маси катода на граничні значення параметрів режиму стійкого горіння тліючого розряду, то тут думки дослідників виявилися взагалі суперечливі [22; 39]. Ймовірно, настільки істотні розбіжності в результатах викликані різними умовами проведення досліджень.

Перераховані вище фактори, що сприяють формозміни тліючого розряду, можуть бути враховані відповідними технологічними та конструктивними заходами, які випробувані й узагальнені в деяких джерелах, а саме:

- відповідна підготовка поверхні деталей механічною та хімічною обробкою;
- конструктивне видалення з поверхні катода в зоні дії тліючого розряду щілин і зазорів критичного розміру;
- видалення із зони дії розряду органічних речовин, що сприяють значному зниженню ефективного потенціалу іонізації газового середовища й підвищення провідності міжелектродного проміжку;
- відповідний вибір величини баластного опору.

Однак, як показує досвід застосування тліючого розряду в умовах зварювання, навіть при дотриманні зазначених заходів в міжелектродному проміжку можуть формуватися як короточасні нестійкі, так і потужні стійкі дугові розряди. Це свідчить про те, що у специфічних умовах зварювання в тліючому розряді, пов'язаних з формою і розташуванням електродів, режимами горіння тліючого розряду, відмінними від використовуваних в більшості наведених досліджень, діють додаткові фактори, що знижують стійкість тліючого розряду, невраховані і невивчені дослідниками в тих експериментальних умовах, в яких до теперішнього часу розглядалася дана проблема. Виявлення цих факторів вимагає проведення додаткових досліджень в умовах, відповідних натурних умов процесу зварювання.

Список використаних джерел

1. *Использование энергии тлеющего разряда в качестве источника тепла для пайки* / А. М. Болькова // Пайка в машиностроении. – М. : МАТИ, 1974. – С. 136–138.
2. *Ванин В. С. Сварка и пайка металлов в тлеющем разряде* / В. С. Ванин // Автоматическая сварка. – 1962. – № 4. – С. 23–25.
3. *Прокошкин Д. А. Исследование силицирования молибдена в тлеющем разряде* / Д. А. Прокошкин, Б. Н. Арзамасов, Е. В. Рябенко // Свойства и применение жаропрочных сплавов. – М. : Наука, 1966. – С. 89.
4. *Котельников Д. И. Технологические особенности применения тлеющего разряда при сварке* / Д. И. Котельников // Технология и организация производства. – 1976. – № 7. – С. 57–59.
5. *Бабад–Захряпин А. А. Химико-термическая обработка в тлеющем разряде* / А. А. Бабад–Захряпин, Г. Д. Кузнецов. – М. : Атомиздат, 1975. – 176 с.
6. *Engel A. Über die Glimmentladung bei hohen Drucken* / Engel A., Seeliger R., Steenbeck M. // Zs.f. Phys. – 1933. – 85. – P. 144–160.
7. *Westberg R. G. Nature and Role of Ionizing Potential Space Waves in Glow-to-Arc Transitions* / Westberg R. G. // Physical Review Journal. – 1959. – Vol. 114, Iss. 1. – P. 1–17.
8. *Мышенков В. И. Контракция газового разряда (обзор)* / В. И. Мышенков // Институт проблем механики АН СССР. – М., 1974. – С. 35.
9. *Мышенков В. И. Стабилизирующее влияние процессов турбулентного переноса на ионизационную неустойчивость тлеющего разряда* / В. И. Мышенков, Г. М. Махвиладзе // Физика плазмы. – 1978. – Т. 4. – С. 411–418.
10. *Лифшиц Е. М. Физическая кинетика* / Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский. – М. : Наука, 1979. – 360 с.
11. *Мак-Дональд А. Д. Сверхвысокочастотный пробой в газах* / А. Д. Мак-Дональд ; пер. с англ. М. М. Савченко и А. Г. Франк ; под редакцией М. С. Рабиновича. – М. : Мир, 1969. – 213 с.
12. *Maxfield F.A., Fredenhall J.L.* // J. Appl. Phys. – 1938. – № 9. – P. 600–610.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

13. *Plesse H.* Untersuchungen am elektrischen Lichtbogen / H. Plesse // *Annalen der Physik.* – 1935. – Vol. 414, Issue 5. – P. 473-499. DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.19354140504>.
14. *Suits C.G.* Role of Oxidation in Arc Cathodes / Suits C.G., Hocker J.P. // *Phys. Rev.* – 1938. – № 53. – P. 670. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.53.670>.
15. *Cobine G. D.* Effects of Oxides and Impurities on Metallic Arc Reignition / Cobine, J. D. // *Phys. Rev.* – 1938. – № 53. – P. 911. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.53.911>.
16. *Энгель А.* Физика и техника электрического разряда в газах / А. Энгель, М. Штейнбек. – М. – Л. : ОНТИ, 1936. – 324 с.
17. *Druyvesteyn M. J.* Übergang von der Glimmentladung zum Bogen in Edelgasen / Druyvesteyn, M. J. // *Zs. f. Phys.* – 1932. – Vol. 73. – P. 727-731. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf01344220>.
18. *Garosi G.* Response of weakly ionized plasma to turbulent gas / Garosi G., Bekefi G., Schytz M. // *Ann. d. Phys.* – 1970 – Vol. 13. – P. 2795-2802.
19. *Hsu Y. F.* The Transition from Glow Discharge to Arc / Hsu Yun Fan // *Phys. Rev.* – 1939 – Vol. 55. – P. 769–775. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.55.769>.
20. Сварка разнородных металлов и сплавов / В. Р. Рябов, Д. М. Рабкин, Р. С. Курочко, Л. Г. Стрижевская. – М. : Машиностроение, 1984. – 239 с.
21. *Thompson D. G.* The Vibrational Excitation of Molecules by Electron Impact // *Advances in Atomic and Molecular Physics.* – 1983. – Vol. 19. – Pp. 309–343.
22. *Газовые лазеры* : [сборник статей / под ред. чл.-кор. АН СССР Р. И. Солоухина и д-ра физ.-мат. наук В. П. Чеботаева. – Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1977. – 360 с.
23. *Галант В. Е.* Основы физики плазмы / Галант В. Е., Жилинский А. П., Сахаров С.А. – М. : Атомиздат, 1977.
24. *Tomkins F. S.* Hyperfine Structure in the Spectrum of Np237 / F. S. Tomkins // *Physical Review Journal.* – 1948. – Vol. 73. – P. 1214–1215. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.73.1214.2>.
25. *Елецкий А. В.* Сжатие положительного столба тлеющего разряда / А. В. Елецкий, В. М. Смирнов // *Журнал технической физики.* – 1970. – Т. 40, вып. 8. – С. 1682–1684.
26. *Зыкова Н. М.* Теплофизика высоких температур / Н. М. Зыкова, Т. С. Куракина, А. А. Сафонов. – 1975. – Т. 13, № 3. – С. 630–633.
27. *Bolotov G. P.* Modification of Materials Surface Layers by Low-Energy Ion Irradiation in Glow Discharge / G. P. Bolotov, M. G. Bolotov, M. M. Rudenko // *IEEE 36th International Conference “Electronics and Nanotechnology ELNANO’2016”.* – April 2016. – P. 135–140.
28. *Баранов В. Ю.* Сжатие положительного столба тлеющего разряда / В. Ю. Баранов, К. Н. Ульянов // *Письма в ЖТФ.* – 1967. – № 6. – С. 622.
29. *Голубев В. С.* Тлеющий разряд повышенного давления / В. С. Голубев. – М. : Наука, 1990. – 333 с.
30. *Напартович А. Л.* Механизмы неустойчивости тлеющего разряда повышенного давления / А. Л. Напартович, А. Н. Старостин // *Химия плазмы.* – 1979. – Вып. 6. – С. 153.
31. *Elenbuas W.* The High Pressure Mercury Vapour Discharge / W. Elenbuas. – Amsterdam: Published by North-Holland Publishing, Netherlands, 1951. – 1497 p.
32. *Елецкий А. В.* Неустойчивости в плазме газового разряда / А. В. Елецкий, А. Т. Рахимов // *Химия плазмы.* – 1974. – Вып. 4. – С. 123.
33. *Недоспасов А. В.* Колебания и неустойчивости низкотемпературной плазмы / А. В. Недоспасов, В. Д. Хайт. – М. : Наука, 1979. – 189 с.
34. *Bolotov G.P.* Hollow cathode glow discharge as a heating source in welding and brazing / G. P. Bolotov, M. G. Bolotov I. V. Nahorna // *2017 IEEE 1st Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2017.* – P. 1197–1202. DOI: [10.1109/UKRCON.2017.8100441](https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100441).
35. *Елецкий А. В.* Явления переноса в слабоионизированной плазме / А. В. Елецкий, Л. А. Палкина, Б. М. Смирнов. – М. : Атомиздат, 1975. – 369 с.
36. *Напартович А. П.* О распаде плазмы тлеющего разряда в постоянном электрическом поле / Напартович А. П., Наумов В. Г., Шашков В. М. // *Физика плазмы.* – 1975. – Т. 1. № 5. – С. 821–829.
37. *Oskat H. I.* Ion Mobilities in Helium, Neon, and Argon / Oskat, H. J. & Mittelstadt, V. R. // *Phys. Rev.* – 1963. – Vol. 132. – P. 1435–1444. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.132.1435>.

38. Kenty C. Volume Recombination, Constriction, and Volt-Ampere Characteristics of the Positive Column / C. Kenty // *Phys. Rev.* – 1962. – Vol. 162. – P. 1235-1238. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.126.1235>.

39. Albrecht G. Theorie der Kontraktion der positiven Säule. Z / Albrecht G., Ecker G. & Müller K. G. // *Z. Naturforsch.* – 1962. – Vol. 17 a. – P. 854-860.

40. Поверхностные свойства расплавов и твердых тел / под ред. Ю. В. Найдича. – К. : Наукова думка, 1991. – 275 с.

41. Sood D. K. Criteria for formation of a metastable solid solution by rapid melt quenching during pulsed laser or electron beam treatment / D.K.Sood // *Radiation Effects Lett.* – 1981. – № 67. – P. 13-18. DOI: 10.1080/01422448108226562.

42. Engel A. Über die Glimmentladung bei hohen Drucken / Engel A., Seeliger R., Steenbeck M. // *Zeitschrift für Physik.* – 1933. – № 85. – P. 144-160. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01342050>.

43. Баранов В. Ю. Теплофизика высоких температур / В. Ю. Баранов, А. А. Веденов, В. Г. Низьев. – 1972. – Т. 10, вып. 6. – С. 1156-1159.

44. Bolotov G. P. Determination of external stabilizing resistor value in the glow discharge power supply while welding / G. P. Bolotov, M. G. Bolotov // *IEEE 37th International Conference "Electronics and Nanotechnology ELNANO'2017"*. – April 2017. – P. 365-369. DOI: 10.1109/ELNANO.2017.7939780.

45. Bolotov G. P. Stabilization of high-current glow discharge under the welding conditions / G. P. Bolotov, M. G. Bolotov, S. M. Yushchenko // *IEEE 38th International Conference "Electronics and Nanotechnology ELNANO'2018"*. – April 2018.

46. Ульянов К. Н. Теория нормального тлеющего разряда при среднем давлении / К. Н. Ульянов // *Теплофизика высоких температур.* – 1972. – Т. 10, № 5. – С. 931-938.

47. Гайсин Ф. М. Исследование перехода тлеющего разряда в электрическую дугу при высоких температурах / Ф. М. Гайсин, Р. К. Саттаров, Р. А. Халиков. – Казань : КАИ, 1975. – 12 с.

48. Рябченко Е. В. Применение тлеющего разряда для диффузионного насыщения металлов / Е. В. Рябченко // *Науч. тр. МАИ.* – 1971. – Вып. 228. – С. 65-80.

49. Ховатсон А. М. Введение в теорию газового разряда / А. М. Ховатсон. – М. : Атомиздат, 1980. – 182 с.

References

1. Bolkova, A. M. (1974). Ispolzovanie energii tleiushchego razryada v kachestve istochnika tepla dlya payki [Use of energy of glow discharge as a source of heat for soldering]. In *Paika v mashinostroenii – Soldering in mechanical engineering*. (pp. 136-138). Moscow: MATI [in Russian].

2. Vanin, V. S. (1962). Svarka i payka metallov v tleyushchem razryade [Welding and soldering of metals in glow discharge]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, 4, 23-25 [in Russian].

3. Prokoshkin, D. A., Arzamasov, B. N., Ryabchenko, E. V. (1966). Issledovanie silitsirovaniia molibdena v tleiushchem razriade [Investigation of molybdenum silicification in glow discharge]. In *Svoistva i primeneniye zharoprochnyykh splavov – Properties and application of high-temperature alloys* (p. 89). Moscow: Nauka [in Russian].

4. Kotelnikov, D. I. (1976). Tekhnologicheskiye osobennosti primeneniya tleyushchego razryada pri svarke [Technological peculiarities of application of glow discharge during welding]. *Tekhnologiya i organizatsiya proizvodstva – Technology and organization of production*, 7, 57-59 [in Russian].

5. Babad-Zakhryapin, A. A., Kuznetsov, G. D. (1975). *Termicheskaya obrabotka v tleiushchem razriade [Chemico-thermal treatment in glow discharge]*. Moscow: Atomizdat [in Russian].

6. Engel, A., Seeliger, R. & Steenbeck, M. (1933). Über die Glimmentladung bei hohen Drucken. *Zeitschrift für Physik*, 85 (3-4), 144-160 [in German].

7. Westberg, R. G. (1959). Nature and Role of Ionizing Potential Space Waves in Glow-to-Arc Transitions. *Physical Review Journal*, 114 (1), 1-17 [in English].

8. Myshenkov, V. I. (1974). *Kontraktsiya gazovogo razriada (obzor) [Gas discharge contraction (review)]*. Institute of Problems in Mechanics of the USSR Academy of Sciences. Moscow [in Russian].

9. Myshenkov, V. I. & Makhviladze, G. M. (1978). Stabiliziruyushchee vliyanie protsessov turbulentnogo perenosa na ionizatsionnuyu neustoiichivost tleiushchego razriada [Stabilizing effect of the processes of turbulent transport on the ionization instability of a glow discharge]. *Fizika plazmy – Physics of Plasmas*, 4, 411-418 [in Russian].

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

10. Lifshits, E.M., Pitaevskii, L.P. (1979). *Fizicheskaya kinetika [Physical kinetics]*. Moscow: Nauka [in Russian].
11. MacDonald, A. D. (1969). *Sverkhvysokochastotnyi proboi v gazakh [Microwave Breakdown in Gases]* (Rabinovich, M. S. (Ed.), Savchenko, M. M. & Frank, A. G. (Trans.)). Moscow: Mir [in Russian].
12. Maxfield, F. A. & Fredenhall, J. L. (1938). Characteristics of the Glow to Arc Transition in Mercury Vapor. *Journal Applied Physics*, 9, 600–610 [in English].
13. Plesse, H. (1935). Untersuchungen am elektrischen Lichtbogen. *Annalen der Physik*, 5 (414), 473–499. DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.19354140504> [in German].
14. Suits, C. G. & Hocker, J. P. (1938). Role of Oxidation in Arc Cathodes. *Physical Review Journal*, 53, 670. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.53.670> [in English].
15. Cobine, J. D. (1938). Effects of Oxides and Impurities on Metallic Arc Reignition. *Physical Review Journal*, 53, 911 DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.53.911> [in English].
16. Engel, A., Shteynbek, M. (1936). *Fizika i tekhnika elektricheskogo razryada v gazakh [Physics and Technology of Electric Discharge in Gases]*. Moscow – Leningrad: ONTI [in Russian].
17. Druyvesteyn, M. J. (1932). Übergang von der Glimmentladung zum Bogen in Edelgasen. *Zeitschrift für Physik*, 73, 727–731. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf01344220> [in German].
18. Hofesrt, H.J. (1939). *Annalen der Physik*, 35, 547 [in English].
19. Hsu, Y. F. (1939). The Transition from Glow Discharge to Arc. *Physical Review Journal*, 55, 769–775. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.55.769> [in English].
20. Ryabov, V. R., Rabkin, D. M., Kurochko, R. S., Strizhevskaya, L.G. (1984). *Svarka raznorodnykh metallov i splavov [Welding of heterogeneous metals and alloys]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
21. Thompson, D. G. (1983). The Vibrational Excitation of Molecules by Electron Impact. *Advances in Atomic and Molecular Physics*, 19, 309–343. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2199\(08\)60256-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2199(08)60256-0) [in English].
22. Soloukhin, R. I. (Ed.) (1947). *Gazovye lazery [Gas Lasers]*. Novosibirsk – Moscow: SO, Nauka [in Russian].
23. Galant V. E., Zhilinskii A. P., Sakharov S. A. *Osnovy fiziki plazmy [Basics of Plasma Physics]*. Moscow: Atomizdat, 1977 [in Russian].
24. Tomkins, F. S. (1948). Hyperfine Structure in the Spectrum of Np237. *Physical Review Journal*, 73, 1214. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.73.1214.2> [in English].
25. Elets'kii, A. V., Smirnov, V. M. (1970). Szhatiye polozhitelnogo stolba tleyushchego razryada [Compression of a positive column of glow discharge]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki – Journal of Technical Physics*, 40 (8), 1682–1684 [in Russian].
26. Zykhova, N. M., Kurakina, T. S., Safonov, A. A. (1975). *Teplofizika vysokikh temperatur [Thermal physics of high temperatures]*, 3 (13), 630–633 [in Russian].
27. Bolotov, G. P., Bolotov, M. G., Rudenko, M. M. (April 2016). Modification of Materials Surface Layers by Low-Energy Ion Irradiation in Glow Discharge. *IEEE 36th International Conference “Electronics and Nanotechnology ELNANO’2016”* (pp. 135–140) [in English].
28. Baranov, V. Yu., Ulianov, K. N. (1967). Szhatie polozhitelnogo stolba tleiushchego razryada [Compression of the positive column of a glow discharge]. *Pisma v ZhTF – Letters in ZhTF*, 6, 622 [in Russian].
29. Golubev, V. S. (1990). *Tleiushchii razriad povyshennogo davleniya [High pressure glow discharge]*. Moscow: Nauka [in Russian].
30. Napartovich, A. L., Starostin, A. N. (1979). Mekhanizmy neustoychivosti tleyushchego razryada povyshennogo davleniya [Mechanisms of instability of glow discharge of high pressure]. *Khimiya plazmy – Chemistry of Plasma*, 6, 153 [in Russian].
31. Elenbaas, W. (1951). *The High Pressure Mercury Vapour Discharge*. Amsterdam: Published by North-Holland Publishing.
32. Elets'kii, A. V., Rahimov, A. T. (1974). Neustoichivost' v plazme gazovogo razryada [Instabilities in plasma gas discharge]. *Khimiya plazmy – Chemistry of Plasma*, 4, 123 [in Russian].
33. Nedospasov, A. V., Hayt, V. D. (1979). *Kolebaniya i neustoichivost' nizkotemperaturnoi plazmy [Oscillations and instability of low-temperature plasma]*. Moscow: Nauka [in Russian].

34. Bolotov, G. P., Bolotov, M. G., Nahorna, I. V. (2017). Hollow cathode glow discharge as a heating source in welding and brazing. *2017 IEEE 1st Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2017* (pp.1197–1202) [in English].
35. Elets'kii, A. V., Palkina, L. A. & Smirnov, B. M. (1975). *Iavleniia perenosa v slaboionizirovannoi plazme. [Transition phenomena in weakly ionized plasma]*. Moscow: Atomizdat [in Russian].
36. Napartovich, A. P., Naumov, V. G., Shashkov, V. M. (1975). O raspade plazmy tleiushchego razriada v postoiannom elektricheskom pole [On the decay of a glow discharge plasma in a constant electric field]. *Fizika plazmy – Physics of Plasma*, 1 (5), 821–829 [in Russian].
37. Ion Mobilities in Helium, Neon, and Argon. *Physical Review Journal*, 132, 1435–1444. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.132.1435> [in English].
38. Kenty, C. (1962). Volume Recombination, Constriction, and Volt-Ampere Characteristics of the Positive Column. *Physical Review Journal*, 126, 1235–1238. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.126.1235> [in English].
39. Albrecht, G., Ecker, G. & Müller, K. G. (1962). Theorie der Kontraktion der positiven Säule. *Z. Naturforsch.*, 17-a, 854–860 [in German].
40. Naidych, Yu. V. (1991). *Poverkhnostnyye svoystva rasplavov i tverdykh tel [Surface properties of melts and solids]*. Kiev: Naukova dumka [in Russian].
41. Sood, D. K. (1981). Criteria for formation of a metastable solid solution by rapid melt quenching during pulsed laser or electron beam treatment. *Radiation Effects*, 67(1-2), 13-18. DOI: 10.1080/01422448108226562 [in English].
42. Engel, A., Seeliger, R. & Steenbeck, M. (1933). Über die Glimmentladung bei hohen Drucken. *Zeitschrift für Physik*, 85, 144–160 [in German].
43. Baranov, V. Yu., Vedenov, A. A. & Nizev, V. G. (1972). Razriad v potoke gaza [Discharge in the flow of gas]. *Teplofizika vyisokikh temperatur – Heat Physics of High Temperatures*, 6(10), 1156–1159 [in Russian].
44. Bolotov, G. P., Bolotov, M. G. (April 2017). Determination of external stabilizing resistor value in the glow discharge power supply while welding. *IEEE 37th International Conference “Electronics and Nanotechnology ELNANO’2017”* (pp.365–369). DOI: 10.1109/ELNANO.2017.7939780 [in English].
45. Bolotov, G. P., Bolotov, M. G., Yushchenko, S. M. (April 2018). Stabilization of high-current glow discharge under the welding conditions. *IEEE 38th International Conference “Electronics and Nanotechnology ELNANO’2018”* [in English].
46. Ulianov, K. N. (1972). Teoriia normalnogo tleiushchego razriada pri srednem davlenii [The theory of normal glow discharge at average pressure]. *Teplofizika vyisokikh temperatur – Heat Physics of High Temperatures*, 5 (10), 931–938 [in Russian].
47. Gaysin, F. M., Sattarov, R. K., Khalikov, R. A. (1975). *Issledovanie perekhoda tleiushchego razriada v elektricheskuiu dugu pri vysokikh temperaturakh [Investigation of the transition of a glow discharge into an electric arc at high temperatures]*. Kazan: KAI [in Russian].
48. Ryabchenko, E. V. (1971). Primeneniye tleyushchego razryada dlya diffuzionnogo nasyshcheniya metallov [Application of glow discharges for diffusion saturation of metals]. *Nauch. Tr. MAI – Scientific. tr. MAI*, 228, 65–80 [in Russian].
49. Khovats'kii, A. M. (1980). *Vvedenie v teoriyu gazovogo razriada [Introduction to the theory of gas discharge]*. Moscow: Atomizdat [in Russian].

UDC 621.791.12

Maksym Bolotov

ANALYSIS OF THE MAIN INSTABILITIES OF MEDIUM PRESSURE GLOW DISCHARGE IN THE CONDITIONS OF MATERIALS TREATMENT

Urgency of the research. The glow discharge of medium pressure in various technological processes of chemical-thermal treatment, coating deposition, welding and soldering, etc. is widely used.

Target setting. However, the first researchers, along with favorable conditions, also discovered various types of instability of gas-plasma, which leads to a rejection of the technological process from the given parameters.

Actual scientific researches and issues analysis. The first researchers noted a partial or complete loss of stability of the smoldering medium pressure and its transition to a more stable form – the electric arc.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

The purpose of the work. Analysis of the hypotheses that exist to date in the literature, through which their authors explain the main reasons for the loss of stability of a powerful current glow discharge and its transition into an electric arc.

The statement of basic materials. The glow discharge instability studied in terms of processes occurring at the cathode and the cathode region, the contraction of the positive column under high currents and pressure and the external circuit. The contract of a positive column of discharge in argon under pressure in the interval from units mm.rt.st was studied. to hundreds mm.rt.st. in cylindrical tubes with a diameter of 2.6 and 3.7 cm. As a result, it was found that at pressures below a certain critical value, the current was practically not rounded.

Conclusions. It is established that the main causes of the instability of a glow discharge are the surface relief of the cathode; the chemical composition of the cathode and the gaseous medium in the interelectrode gap; design features of the cathode; parameters of the discharge combustion regime, primarily the discharge current and gas.

Keywords: glow discharge; instability; gas discharge plasma; arc; positive pole contract.

References: 49.

УДК 621.791.12

Максим Болотов

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ НЕСТАБИЛЬНОСТЕЙ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Актуальность темы исследования. Тлеющий разряд средних давлений нашел широкое распространение в различных технологических процессах химико-термической обработки, нанесения покрытий, сварки и пайки, и тому подобное.

Постановка проблемы. Однако наряду с благоприятными предпосылками обнаружили и различные виды неустойчивости газоразрядной плазмы, приводящие к отклонению хода технологического процесса от заданных параметров, обусловленных переходом тлеющего разряда в электрическую дугу.

Анализ последних исследований и публикаций. Первые исследователи отмечали частичную или полную потерю устойчивости тлеющего средних давлений и перехода его в более стабильную форму – электрическую дугу.

Цель работы. Анализ гипотез, существующих на сегодняшний день в литературе, с помощью которых их авторы объясняют основные причины потери устойчивости сильнооточного тлеющего разряда и перехода его в электрическую дугу.

Изложение основного материала. Нестабильности тлеющего разряда изучались с точки зрения процессов, протекающих на катоде и прикатодной области, контракции положительного столба под воздействием высоких токов, давлений и влияния внешней цепи. Изучалась контракция положительного столба разряда в аргоне при давлениях в интервале от единиц мм до сотен мм в цилиндрических трубках диаметром 2,6 и 3,7 см. В результате было обнаружено, что при давлениях ниже критического значения ток практически не контрагировал.

Выводы в соответствии со статьей. Установлено, что основными причинами неустойчивости тлеющего разряда является рельеф поверхности катода; химический состав катода и газовой среды в межэлектродном промежутке; конструктивные особенности катода; параметры режима горения разряда, в первую очередь значение тока разряда и давления газа; сопротивление внешней цепи, питающей разряд; проводимость межэлектродного промежутка.

Ключевые слова: тлеющий разряд; неустойчивость; газоразрядная плазма; электрическая дуга; контракция положительного столба.

Библ.: 49.

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

Болотов Максим Геннадиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14035, Украина).

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

E-mail: bolotovmg@gmail.com

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

Scopus: 57190377278