

Стабілізація потужнострумowego тліючого розряду активним (баластним) опором в умовах прецизійного зварювання

Г.П. Болотов¹ • Р.М. Рижев² • М.Г.Болотов¹

1 - Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна;

2 - КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Received: 26 February 2018 / Accepted: 03 September 2018

Анотація. *Мета.* Метою даної роботи є визначення величини зовнішнього активного (баластного) опору послідовно увімкненого в газорозрядний проміжок, що забезпечує стабілізацію процесу горіння потужнострумowego тліючого розряду на режимах, які використовуються в процесах прецизійного зварювання, тобто струмах розряду 1 ... 30 А та тисках робочого газу в газорозрядній камері 1,33 ... 13,3 кПа. Показано, що відсутність такого резистора в розрядному проміжку, в наслідок дії різного роду зовнішніх збурень, призводить до його переходу в електричну дугу, як більш стабільну форму газового розряду з порушенням технологічного процесу зварювання.

Методика. Із використанням методів теорії фізики газового розряду, електродинаміки та електромагнетизму було визначено основні причини появи зовнішніх збурень та нестабільностей, що призводять до появи стійкого дугового розряду на локальних ділянках поверхонь деталей, що зварюються.

Результати. Результатами роботи є розроблена методика аналітичного визначення оптимальної величини зовнішнього стабілізуючого резистора, що забезпечує розбіжність розрахункових даних з аналогічними, отриманими в ході виконання експериментів, на рівні 15 ... 20%.

Практична значимість. Результати досліджень представляють інтерес для підприємств машино- та приладобудування, енергетичної та електротехнічної галузей промисловості при виготовленні дифузійно-зварних вузлів із різномірних матеріалів в газорозрядній плазмі тліючого розряду середніх тисків.

Ключові слова: тліючий розряд, стабільне існування, прецизійне зварювання, плазма, баластний опір, дифузійне зварювання.

Вступ

Основним способом отримання нероз'ємних прецизійних з'єднань різномірних матеріалів на сьогоднішній день залишається дифузійне зварювання, що здійснюється при відносно невисоких температурах без їх розплавлення. В якості джерела енергії для дифузійного зварювання широкого застосування набув нормальний тліючий розряд середніх тисків - 1,33 ... 13,3 кПа, що горить в середовищі активних або інертних газів (аргон, гелій, азот, водень). Істотною перевагою тліючого розряду є його високий тепловий к.к.д. – 70 ... 80%, що в кілька разів перевищує аналогічний показник інших джерел нагріву для дифузійного зварювання (індукційного, радіаційну та електроконтактного).

Відмінною особливістю тліючого розряду як джерела поверхневого нагріву при зварюванні є простота і невисока вартість обладнання, оскільки відсутня необхідність в складній високовакуумній системі, яка є обов'язковим вузлом в інших джерелах. Джерело живлення тліючого розряду має також досить просту схему, що складається з підвищувального трансформатора, включеного в його первинний ланцюг, регулятора напруги у вигляді автотрансформатора або тиристорного контактора, а також, двохнапівперіодного випрямляча (рис. 1).

У той же час, оскільки горіння тліючого розряду здійснюється при відносно високих напругах (300 ... 1000 В) і, відповідно, високої напруженості електричного поля в розрядному проміжку, дія зовнішніх впливів, що збурюють може призводити до переходу тліючого розряду в більш стійку форму газового розряду - електричну дугу. Дія концентрованого дугового розряду на деталі, що зварюються призводить до їх оплавлення і руйнування.

Оскільки статична вольт-амперна характеристика нормального тліючого розряду наближається до жорсткої (рис. 2а), то стійке положення системи «джерело живлення-тліючий розряд» забезпечується тільки при падаючій зовнішній характеристиці джерела живлення. Одним із способів створення в джерелі такої характеристики є включення на його виході баластного (активного) опору. Баластний опір в такому джерелі

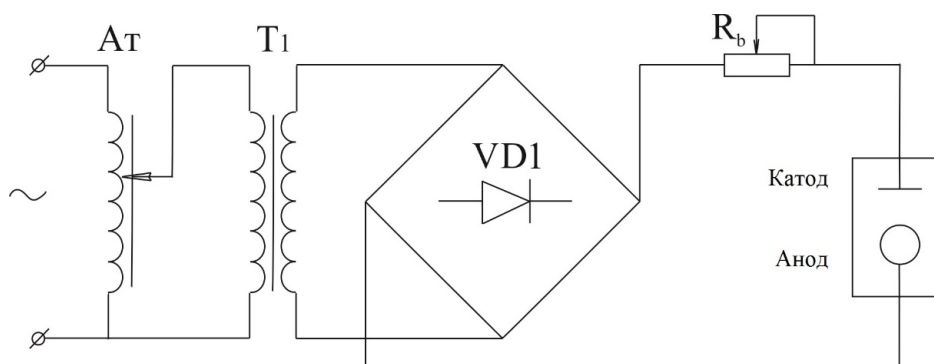


Рис. 1. Схема джерела живлення тліючого розряду: АТ – автотрансформатор; Т₁ – трансформатор; VD1 – випрямляч; R_b – активний (баластний) опір

виконує наступні функції: забезпечує формування падаючої зовнішньої характеристики, регулювання струму і стабілізацію горіння тліючого розряду (рис. 2б)

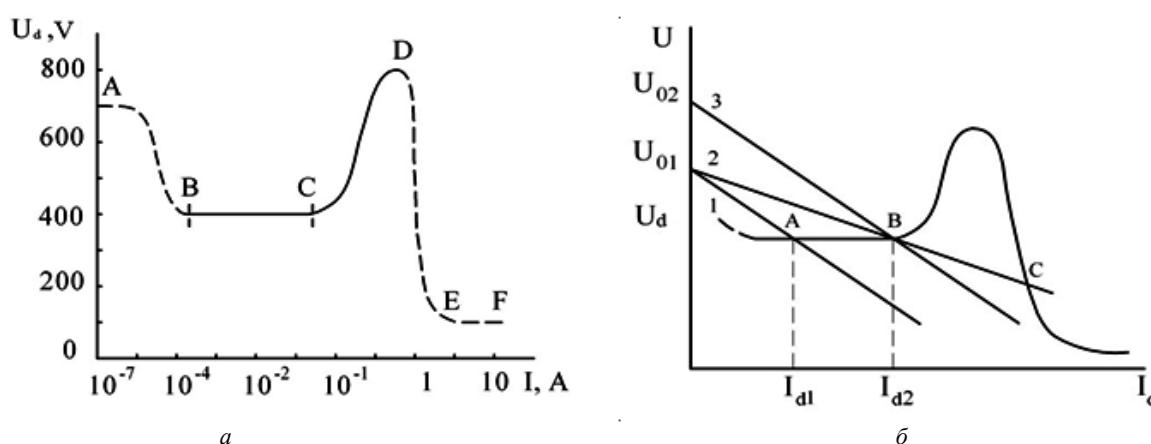


Рис. 2. Статична вольт-амперна характеристика газових розрядів (а), отримання падаючої зовнішньої характеристики джерела живлення тліючого розряду (б)

У зв'язку з цим в ряді робіт [1, 2], присвячених вивченню проблеми стійкості тліючого розряду, розглядається питання визначення оптимальної величини цього опору, необхідної і достатньої для забезпечення стабільності розряду, оскільки надмірно завищена величина цього опору, забезпечуючи підвищення стійкості розряду, знижує енергетичні показники процесу нагріву внаслідок зростання втрат потужності на ньому, а недостатня величина опору не забезпечує стійкості розряду на заданому режимі. Однак, результати цих робіт не можуть бути однозначно перенесені на розряд в умовах зварювання, оскільки вони отримані для істотно інших режимів і умов тліючого розряду, зокрема, для лазерної плазми і носять скоріше напівкількісний характер.

Мета

У зв'язку з цим метою даної роботи є розробка методики визначення величини зовнішнього баластного опору, що забезпечує стабілізацію горіння тліючого розряду на режимах, які використовуються в процесах зварювання, тобто розрядних струмах більше 1А і тисках газу вище 1,33 кПа.

Виклад основного матеріалу досліджень

Стабілізуюча дія зовнішнього баластного опору, як показано в роботі [3], полягає в тому, що будь-яке збільшення розрядного струму від сталого значення, в тому числі і при переході тліючого розряду в дуговий, призводить до збільшення падіння напруги на цьому опорі. При постійній напрузі на виході джерела живлення це буде супроводжуватися зниженням падіння напруги на міжелектродному проміжку і напруженості електричного поля в позитивному стовпі розряду, і відповідно, зниженням електронної температури і швидкості іонізації. Швидкість утворення електронів стане менше швидкості їх зникнення внаслідок рекомбінації і концентрація електронів почне зменшуватися, знижуючи струм розряду до початкового сталого значення. Таким чином, можна констатувати, що для стабілізації горіння тліючого розряду в моменти позитивної флуктуації розрядного струму необхідно забезпечити в розряді такі енергетичні умови, при яких швидкість рекомбінації електронів буде перевищувати швидкість іонізації, тобто:

$$\left(\frac{dn_e}{dt}\right)_{II} \leq \left(\frac{dn_e}{dt}\right)_{PEK} \quad (1)$$

У припущенні, що іонізація розвивається в однорідних умовах, тобто з постійною частотою, швидкість народження електронів або швидкість іонізації визначається як [4]:

$$\left(\frac{dn_e}{dt}\right)_{II} = k_i \cdot N \cdot n_e \quad (2)$$

де K_i - константа швидкості іонізації; N - об'ємна щільність нейтральних частинок (атомів) газу; n_e - кількість електронів в одиниці об'єму розрядної плазми.

Швидкість рекомбінації, яка характеризується числом актів рекомбінації в одиниці об'єму за одиницю часу, пропорційна щільності рекомбінуючих частинок [4]:

$$\left(\frac{dn_e}{dt}\right)_{рек} = -\beta n_e n_i \quad (3)$$

де β - коефіцієнт рекомбінації; n_i - кількість позитивно заряджених частинок в одиниці об'єму плазми.

Таким чином, для сталого режиму горіння тліючого розряду, з урахуванням (2) і (3) можна записати:

$$K_i \cdot N \cdot n_e = |-\beta \cdot n_e| \quad (4)$$

Оскільки в електронейтральній плазмі позитивного стовпа тліючого розряду $n_e = n_i$, вираз (4) набуде вигляду:

$$K_i \cdot N = |-\beta \cdot n_e| \quad (5)$$

Константа швидкості іонізації K_i є функцією параметра E/N (рис. 3) [5], де E - напруженість електричного поля в позитивному стовпі розряду. Об'ємна щільність часток N може бути визначена з виразу $p = NkT$ [6] для середніх температур газу в позитивному стовпі розряду 1273 ... 2273 К в діапазоні тисків газу $p = 2,66 \dots 13,3$ кПа [7]. Значення напруженості електричного поля E в стовпі розряду можуть бути визначені відповідно до рис.3, де представлена отримана експериментально залежність падіння напруги в позитивному стовпі від струму розряду, тиску газу і міжелектродної відстані для найбільш широко застосовуваних газових середовищ. Звідси, для режимів горіння тліючого розряду, що використовуються в умовах зварювання, величина зазначеного параметра становить $E/N = 6 \cdot 10^{-16} \dots 4 \cdot 10^{-15}$ см³/с. Математична обробка кривої функції, наведеної на рис. 3.2, в зазначеному діапазоні дозволила отримати емпіричне вираження цієї залежності у вигляді:

$$K_i \approx A \cdot E / N \quad (6)$$

де $A \approx 10^{24}$ для зазначеного вище діапазону зміни параметра E/N .

Підставивши отриманий вираз для K_i в залежність (5) отримаємо вираз для напруженості електричного поля в позитивному стовпі розряду:

$$E = |-\beta \cdot n_e / A| \quad (7)$$

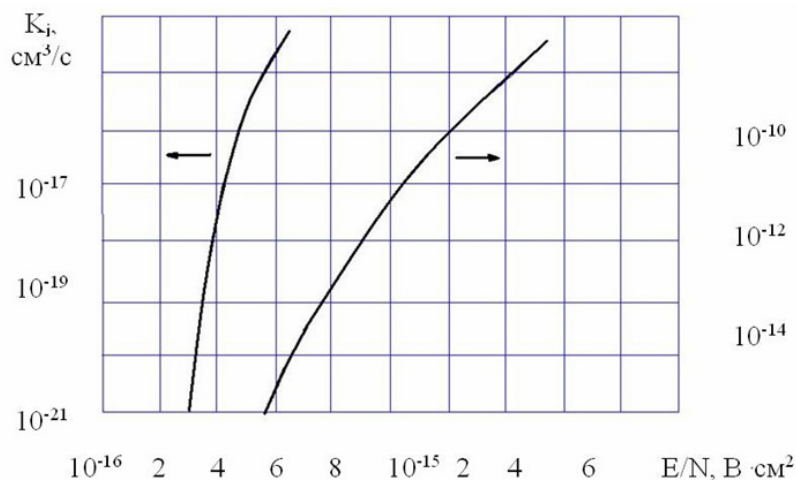


Рис. 3. Константа швидкості іонізації K_i в середовищі азоту

У той же час напруженість електричного поля в позитивному стовпі може бути визначена, виходячи з електричних характеристик ланцюга розряду:

$$E = \frac{U_c}{l} = \frac{U_{II} - U_R - U_{ak}}{l} = \frac{U_{II} - I_p R_{BH} - U_{ak}}{l} \quad (8)$$

де U_u - напруга на вихідних клеммах джерела живлення; U_c, U_R, U_{ak} - падіння напруги, відповідно, в позитивному стовпі розряду, на баластному опорі, сумарно в біляанодній і білякатодній областях розряду; I_p - струм розряду; l - міжелектродна відстань.

З виразів (8) і (9) можна визначити мінімально необхідну величину зовнішнього опору, достатню для стабілізації рівноважного режиму горіння тліючого розряду при заданих умовах:

$$R_{BH} \geq \frac{l}{I_p} \left[\frac{U_{II} - U_{ak}}{l} + \frac{\beta \cdot n_e}{A} \right] \quad (9)$$

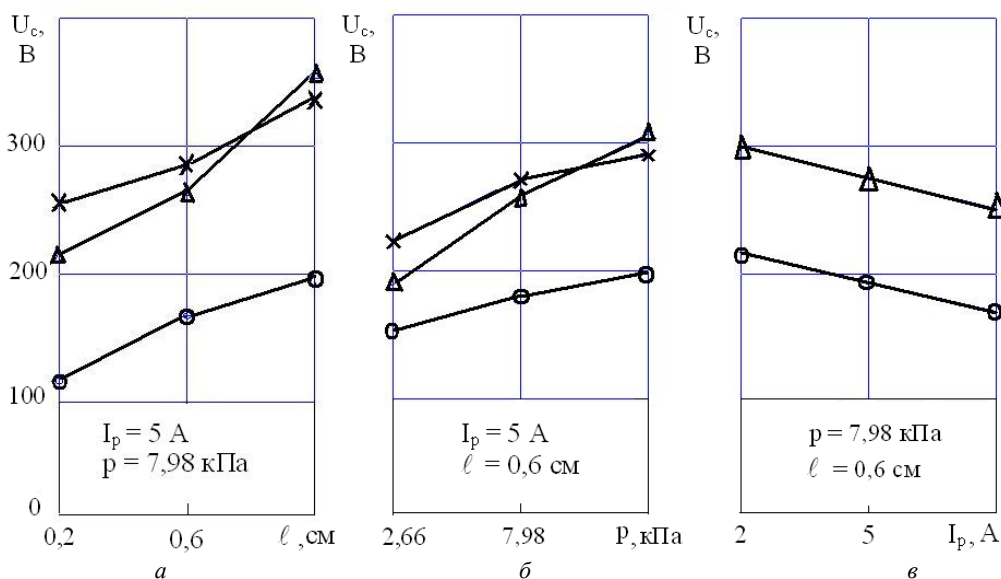


Рис. 4. Залежність падіння напруги в позитивному стовпі тліючого розряду від міжелектродного відстані (а), тиску газу (б) і струму розряду (в): о – аргон; Δ – азот; х – водень

Для розглянутих тисків газу процесами дифузії заряджених частинок в стовпі розряду можна знехтувати в порівнянні з процесами об'ємної рекомбінації. У цьому випадку рівняння балансу електронної концентрації, що досягається в результаті іонізації електронним ударом в електричному полі має вигляд [4]:

$$\left(\frac{dn_e}{dt} \right)_u = \nu_i n_e - \beta n_e^2 = 0 \quad (10)$$

Імовірність термічної іонізації газу, яка визначається рівнянням Саха, внаслідок порівняно невисоких температур в плазмі тліючого розряду, незначна і тому до уваги не береться.

З останнього виразу знаходимо:

$$n_e = \frac{\nu_i}{\beta(T_e)} \quad (11)$$

де, в свою чергу, частота іонізації $\nu_i = K_i N$ [244].

При не дуже високих температурах газу рекомбінація проходить, в основному, диссоціативним шляхом. Константа диссоціативної рекомбінації залежить від електронної температури T_i [5]. Для деяких іонів значення коефіцієнта рекомбінації наведені в таблиці. 1.

Таблиця 1

Константи диссоціативної рекомбінації в газах

Іон	β^* , 10^{-7} см ³ /с	Літературне джерело
Ne ⁺ ₂	1,1...2,3	[8]
He ⁺ ₂	0,13...0,25	[9]
H ⁺ ₂	0,3...0,52	[10]
N ⁺ ₂	1,3...2,2	[8]
Ar ⁺ ₂	2,2...3,6	[8]

Нижні значення коефіцієнта β відповідають $T_e \approx 1 \dots 2$ еВ, верхні $T_e \approx (0,2 \dots 0,5)$ еВ. Виконані за цією методикою обчислення для аргону і азоту, а також, експериментальні вимірювання, виконані в роботі [11] для азоту, показують, що при тисках газу більш 5,32 кПа електронна температура змінюється незначно і становить 1 ... 1,3 еВ. Звідси можливо визначити величину коефіцієнта рекомбінації β згідно з таблицею 1 і визначити електронну концентрацію, яка відповідно до виразу (11) для характерних значень $E/N = 5 \cdot 10^{-16} \dots 5 \cdot 10^{-15}$ В · см² становить $n_e = 10^{11} \dots 10^{12}$ см⁻³.

Результати визначення величини опору $R_{\text{вн}}$ згідно виразу (9) при нагріванні в азоті для тисків газу $p = 2,66 \dots 13,3$ кПа, струмів розряду $I = 2 \dots 6$ А, напруги на виході джерела $U_{\text{дж}} = 470 \dots 500$ В і міжелектродного відстані 0,6 см наведені на рис. 5. На цьому ж малюнку приведені експериментально визначені для тих же умов значення опору розряду R_p і зовнішнього опору R_b , при якому забезпечується стійке існування тліючого розряду.

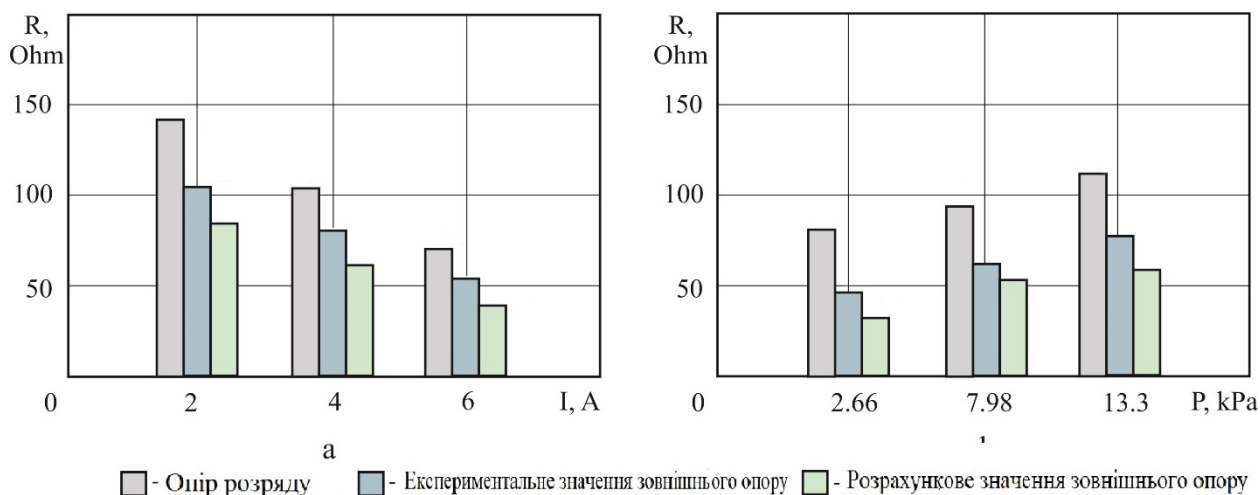


Рис. 5. Результати визначення величини зовнішнього стабілізуючого опору в залежності від струму розряду (а), та тиску газу (б)

Порівняльний аналіз отриманих результатів свідчить, що визначена за запропонованою методикою величина зовнішнього стабілізуючого опору становить близько половини від опору розряду і лише на 15 ... 20% відрізняється від величини цього ж опору, встановленої дослідним шляхом. Це дає підставу рекомендувати запропоновану методику для попереднього визначення та завдання величини зовнішнього опору в конкретних умовах зварювання, а розрахункову величину опору вважати мінімально допустимою для забезпечення стійкого горіння тліючого розряду.

Висновки

Таким чином, у даній роботі запропоновано методику розрахункового визначення величини зовнішнього стабілізуючого (баластного) резистора із розбіжністю з даними, отриманими в ході експериментів на рівні 15 ... 20%, що забезпечує стійке існування тліючого розряду розряд в умовах дифузійного зварювання та паяння без переходу його в дуговий розряд.

Однак, слід брати до уваги, що стабілізація тліючого розряду по току за допомогою баластного опору недостатня, якщо не забезпечені необхідні технологічні умови процесу, оскільки таке джерело не забезпечує достатньої протидії лавиноподібне наростання струму дуги, що створює сприятливі умови в катодній плямі дуги для її стабілізації. В цьому випадку необхідно застосовувати більш складні та ефективні захисні пристрої.

Стабилизация сильноточного тлеющего разряда активным (балластным) сопротивлением в условиях прецизионной сварки

Г. Болотов, Р. Рыжов, М. Болотов

Аннотация. *Цель.* Целью данной работы является определение величины внешнего активного (балластного) сопротивления последовательно включенного в газоразрядный промежуток обеспечивающий стабилизацию процесса горения сильноточного тлеющего разряда на режимах, которые используются в процессах прецизионной сварки, то есть токах разряда 1 ... 30 А и давлениях рабочего газа в газоразрядной камере 1,33 ... 13,3 кПа. Показано, что отсутствие такого резистора в разрядном промежутке, вследствие действия разного рода внешних возмущений, приводит к его

переходу в электрическую дугу, как более стабильную форму газового разряда с нарушением технологического процесса сварки.

Методика. С использованием методов теории физики газового разряда, электродинамики и электромагнетизма были определены основные причины появления внешних возмущений и нестабильностей, приводящих к появлению устойчивого дугового разряда на локальных участках поверхностей свариваемых деталей.

Результаты. Результатами работы является разработанная методика аналитического определения оптимальной величины внешнего стабилизирующего сопротивления, что обеспечивает расхождение расчетных данных с аналогичными, полученными в ходе выполнения экспериментов на уровне 15 ... 20 %.

Практическая значимость. Результаты исследований представляют интерес для предприятий машино- и приборостроения, энергетической и электротехнической отраслей промышленности при изготовлении диффузионно-сварных узлов из разнородных материалов в газоразрядной плазме тлеющего разряда средних давлений

Ключевые слова: тлеющий разряд, стабильное существование, прецизионное сварки, плазма, балластное сопротивление, диффузионная сварка.

Stabilization of high-current glow discharge by the active (ballast) resistor while the precision welding

G. Bolotov, R. Ryzhov, M. Bolotov

Abstract. Purpose. The purpose of this work is to determine the value of the external active (ballast) resistance switched on the gas-discharge gap that provides stabilization of the burning process of a high-current glow discharge in regimes that are used in precision welding processes: discharge currents 1 ... 30 A, gas pressures of 1.33 ... 13.3 kPa.

Approach. Using the methods of the theory of gas discharge physics, electrodynamics and electromagnetism, the main causes of the appearance of external perturbations and instabilities that lead to the emergence of a stable arc discharge on the local sections of the surfaces of the welded parts were determined.

Findings. The result of the work is the developed method of analytical determination of the optimal value of the external stabilizing resistance, which ensures a discrepancy between the calculated data and the similar ones obtained during the experiments at the level of 15 ... 20%.

Practically value. The results of the research are of interest for the enterprises of machine-building and instrument-making, power and electrical engineering industries in the manufacture of diffusion-welded assemblies of dissimilar materials in a gas-discharge plasma of a glow discharge of medium pressures

Keywords: glow discharge, stable existence, precision welding, plasma, ballast resistor. diffusion bonding

References

1. 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", in II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF), Kharkiv. IEEE, pp. 116 – 119.
2. Bolotov G.P., Bolotov M.G., Rudenko M.M. (2016), "Modification of Materials Surface Layers by Low-Energy Ion Irradiation in Glow Discharge" *IEEE 36th International Conference "Electronics and Nanotechnology ELNANO'2016"*, April 2016, pp. 135-140.
3. Ульянов К.Н. Теория нормального тлеющего разряда при среднем давлении // *Теплофизика высоких температур*. – 1972. – Том 10, №5. – 931 с.
4. Ecker G., Kroll W., Zoller O. (1964), Thennal instability of the plasma column // *Phys. Fluids*. - vol. 7, no. 212. - pp. 2001-2006.
5. Bolotov G.P., Bolotov M.G., "Determination of external stabilizing resistor value in the glow discharge power supply while welding", *IEEE 37th International Conference "Electronics and Nanotechnology ELNANO'2017"*, April 2017. pp. 365-369.
6. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*. – М.: Наука, 1987. – 590 с.
7. Болотов М.Г. (2018) *Аналіз основних нестабільностей тліючого розряду середніх тисків в умовах обробки матеріалів*. Вісник ЧНТУ, Серія "Технічні науки та технології" №2 (12), С. 103-116.
8. Гайсин Ф.М., Сон Э.Е. *Электрофизические процессы в разрядах с твердыми и жидкими электродами*. – Свердловск: УРПИ, 1989. – 431 с.
9. Казанцев Е.И. *Промышленные печи*. – М.: Металлургия, 1964. – 451 с.
10. Киселев Ю.В., Черепанов В.Л. *Искровые разрядники*. – М.: Советское радио, 1976. – 70 с.
11. Бионди М.А. *Электрон – ионная рекомбинация в газовых лазерах* / Под ред. И. Мак – Даниеля и У. Нигена. – М.: – 1986. – С. 216 – 234.
12. Елецкий А.В. и др. *Явления переноса в слабоионизированной плазме*. – М.: Атомиздат. 1975. – 369 с.
13. Frommhold, L. (1960) *Zeit Phys*. Vol. 160, pp. 554-567.