

Геннадій Болотов¹, Максим Болотов², Сергій Олексієнко³, Михайло Руденко⁴

¹доктор технічних наук, професор, професор кафедри технологій зварювання та будівництва
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: bolotovgp@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0305-2917>
ResearcherID: [H-5304-2014](https://orcid.org/0000-0003-0305-2917), Scopus Author ID: [6506157907](https://orcid.org/0000-0003-0305-2917)

²кандидат технічних наук, доцент, кафедри технологій зварювання та будівництва,
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: bolotovmg@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0915-4132>
ResearcherID: [H-4183-2014](https://orcid.org/0000-0002-0915-4132), Scopus Author ID: [57190377278](https://orcid.org/0000-0002-0915-4132)

³кандидат технічних наук, доцент, кафедри технологій зварювання та будівництва,
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: sv.oleks@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5475-4439>
ResearcherID: [F-8197-2014](https://orcid.org/0000-0001-5475-4439), Scopus Author ID: [57190370561](https://orcid.org/0000-0001-5475-4439)

⁴старший викладач, кафедри технологій зварювання та будівництва,
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: rudenko.bear@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9542-7792>
ResearcherID: [G-6235-2014](https://orcid.org/0000-0001-9542-7792), Scopus Author ID: [57190378153](https://orcid.org/0000-0001-9542-7792)

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ТЛІЮЧИМ РОЗРЯДОМ ЯК ДЖЕРЕЛА НАГРІВУ ПРИ ДИФУЗІЙНОМУ ЗВАРЮВАННІ

На основі методів математичного планування експерименту визначено основні керуючі впливи, що характеризують зварювальний нагрів у тліючому розряді, серед яких є розрядний струм (I_p), який визначає загальну потужність, що виділяється в розрядному проміжку, та тиск газу (P), який змінює питомі енергетичні характеристики розряду.

Ключові слова: дифузійне зварювання; тліючий розряд; керування нагрівом; газорозрядна плазма.

Рис.: 5. Табл.: 1. Бібл.: 26.

Актуальність теми дослідження. У наш час для отримання якісних нероз'ємних з'єднань різнорідних матеріалів широко застосовуються методи зварювання у твердому стані. Найбільш поширеним серед них є дифузійне зварювання.

Широка номенклатура з'єднань, отримуваних за допомогою дифузійного зварювання, зумовлює комплекс специфічних вимог до джерел зварювального нагріву. Ці вимоги, головним чином, пов'язані з придатністю до зварювання широкого асортименту матеріалів і форм виробів, точністю регулювання питомої теплоємності та можливістю регулювання температури нагріву зразків у широких межах [1; 2]. Зважаючи на ці вимоги, серед усіх джерел енергії для дифузійного зварювання (індукційних, радіаційних, електроконтактних джерел нагріву) найбільш прийнятним є нагрівання розподіленою газорозрядною плазмою нормального тліючого розряду, що горить у середовищі інертних або активних газів при тисках 0,1 ... 100 кПа [3; 4].

Застосування тліючого розряду як джерела нагріву для дифузійного зварювання є ефективним насамперед завдяки широкому діапазону регулювання технологічних параметрів, високій адаптованості до змінного асортименту, а також високій енергоефективності (0,7-0,85) [5]. Усе це робить тліючий розряд надзвичайно ефективним джерелом нагріву для різноманітних технологічних процесів, у тому числі для дифузійного зварювання.

Постановка проблеми. Однак на сьогодні це джерело нагріву так і не отримало широкого промислового впровадження в процесах дифузійного зварювання, що, на нашу думку, пов'язано з дуже обмеженими уявленнями про специфіку механізму дії тліючого розряду як інструмента зварювального нагріву та, що найголовніше, про реалізацію керування його енергетичними параметрами в умовах високотемпературного нагрівання та засобів їх стабілізації в умовах дії зовнішніх енергетичних збурень. Як

наслідок, поява високого рівня дефектності та зниження продуктивності технологічного процесу загалом, оскільки оператору зварювальної установки доводиться приймати рішення стосовно керування параметрами режимів зварювання в умовах багатofакторного середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанню керування енергетичними характеристиками тліючого розряду в різних технологічних процесах, зокрема в умовах іонно-плазмового нанесення функціональних покриттів [6-8], тонких металевих плівок [9-11], хіміко-термічній обробці металів в плазмі тліючого розряду [12; 13] тощо присвячено достатню кількість робіт. У роботі [14] було здійснено спроби визначення ступеня впливу параметрів режиму тліючого розряду на ефективність нагріву в умовах дифузійного зварювання. Досліджування проводились шляхом певного варіювання величини параметрів у межах 25 % від середнього значення із подальшим визначенням їх впливу на ефективний ККД джерела нагріву.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Однак у роботі [14] не брався до уваги температурний стан катода (зварного виробу) і швидкість його нагрівання під час зварювання, а оцінювалася суто енергетична ефективність, тобто корисний енерговнесок джерела нагріву. Результатами роботи стала номограма для визначення ефективного ККД нагріву, яка має скоріше уможлидний характер, аніж реальне практичне застосування.

Таким чином, на сьогодні в літературі відсутні дані стосовно впливу параметрів режиму тліючого розряду на тепловий стан катода в умовах дифузійного зварювання та паяння.

Мета роботи. У зв'язку з цим мета даної роботи полягає в оптимізації процесу керування нагрівом в плазмі тліючого розряду в умовах дифузійного зварювання шляхом визначення з усієї сукупності параметрів режиму найбільш тісно пов'язаних із температурою катода (деталей, що зварюються) при нагріванні в газорозрядній плазмі тліючого розряду.

Виклад основного матеріалу. До основних параметрів режиму при нагріванні в полі тліючого розряду слід віднести електричні і технологічні складові, а саме: струм розряду, тиск в газорозрядній камері, протяжність міжелектродного проміжку (відстань катод-анод), род газу [15]. Залежності, отримані в ході експериментів, наведені на рис. 1, показують, що ці параметри істотно по-різному впливають на характер тепловиділення на катоді в процесі зварювального нагріву й визначаються, в основному, властивостями газового середовища, зокрема густиною струму розряду (j) і величиною катодного падіння потенціалу (U_k).

Так, наприклад, зростання тиску газу в газорозрядній камері неминуче призводить до збільшення густини струму розряду i , відповідно, температури катода. Швидкість нагріву при цьому також збільшується [16].

Підвищення струму розряду призводить до різкого зростання температури нагріву катода за рахунок збільшення повної потужності джерела нагріву $W = IU_p$. Однак при зварюванні масивних деталей, збільшення сили струму при постійному тиску в камері призводить до певного сповільнення нагріву катода, що зумовлено зростанням протяжності катодної плями розряду i , відповідно, зменшенням густини струму в плямі нагріву. Тобто джерело нагріву з концентрованого переходить у розподілене.

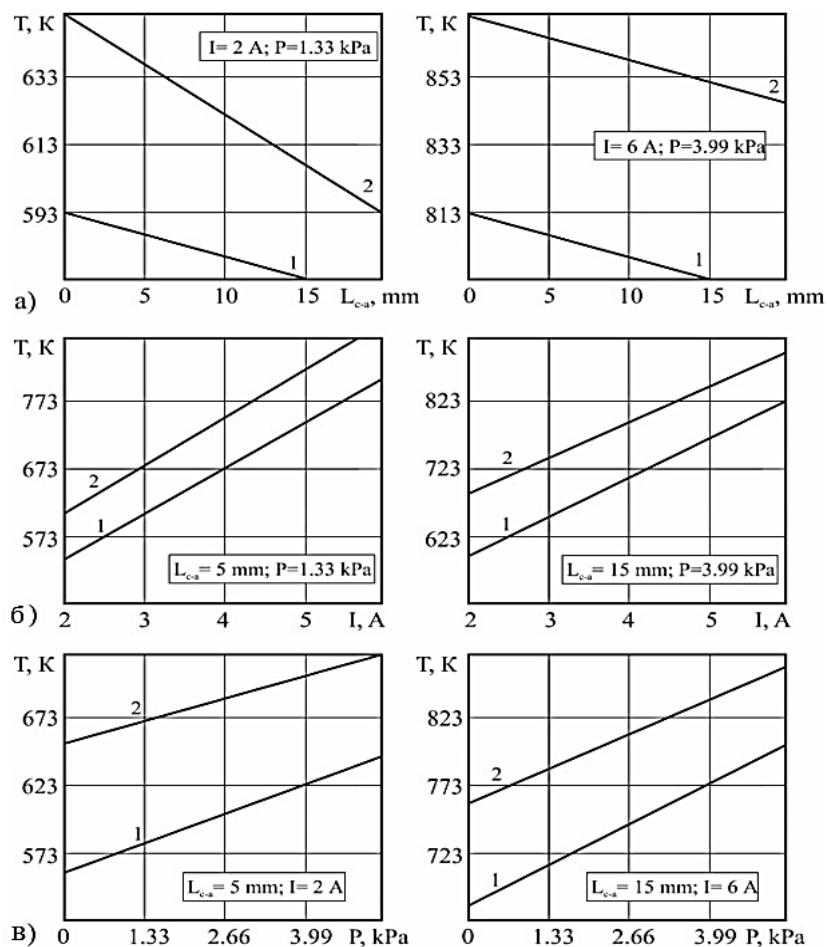


Рис. 1. Залежності температури нагріву катода (деталей, що зварюються) від міжелектродної відстані ($L_{к-а}$) (а); струм розряду (I_p) (б); тиск газу (P) (в):
 1 – в аргоні (де $U_k = 165$ В); 2 – в азоті (де $U_k = 215$ В)

Вплив сили розрядного струму та тиску в газорозрядній камері проілюстровано на рис. 2.

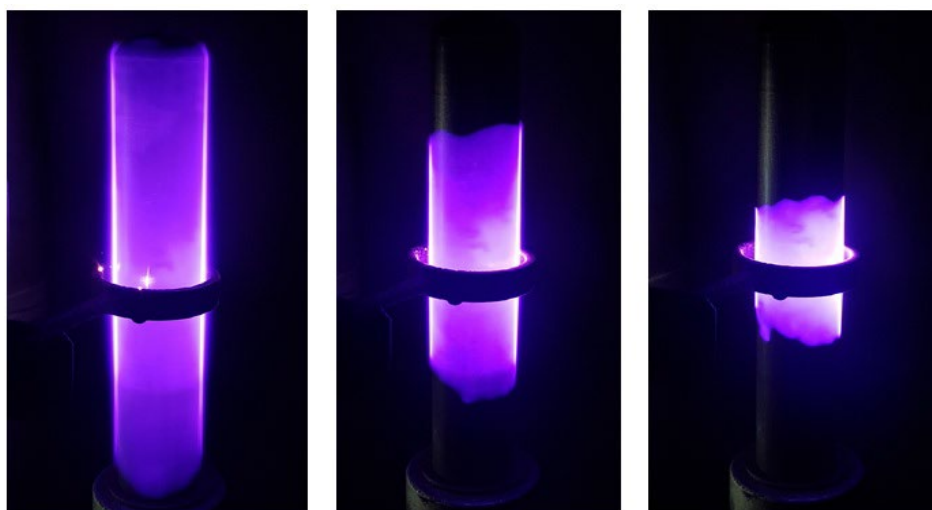


Рис. 2. Характер розподілу плями нагріву циліндричного катода (30×160 мм) нормальним тліючим розрядом зі збільшенням розрядного струму та тиску газу в робочій камері (опис у тексті)

Як видно із наведених залежностей, керування зварювальним нагрівом в тліючому розряді є складним, багатофакторним процесом, при якому кожен із наведених параметрів режиму може змінюватися в досить широких межах. У зв'язку з цим для забезпечення технічної і практичної реалізації керування ними в процесі зварювання, на цьому етапі, доцільним є визначення з усієї сукупності параметрів режиму оптимальних, тобто параметрів, найбільш тісно пов'язаних із температурою катода (деталей, що зварюються).

Визначення таких параметрів здійснювали за допомогою оцінки коефіцієнтів при відповідних чинниках статичних моделей, побудованих за допомогою методів математичного планування експерименту [17].

У модель заносилася сукупність параметрів з урахуванням можливості їх кількісної оцінки. Параметром оптимізації було призначено температуру нагріву катода T , °C. Як варійовані фактори приймали: міжелектродна відстань $L_{к-а, мм} (X_1)$, струм розряду $I_p (X_2)$, тиск в газорозрядній камері P , мм. рт.ст. (X_3) та род газу, точніше катодне падіння потенціалу для відповідного газу $U_k, В (X_4)$. В якості газового середовища було обрано аргон та азот із відповідними значеннями $U_k = 165 В$ для аргону та $U_k = 215 В$ для азоту.

Для зменшення впливу випадкових похибок вимірювань кожний дослід при проведенні експерименту повторювався 5 разів. Інтервали варіювання факторів і їх числові значення на верхньому і нижньому рівнях наведені в таблиці.

Таблиця – Рівні та інтервали варіювання факторів

Фактори	Інтервали варіювання, ΔX	Рівні варіювання		
		Нижній рівень, ($X_i = -1$)	Основний рівень	Верхній рівень, ($X_i = +1$)
Міжелектродна відстань ($L_{к-а}$), мм	5	5	10	15
Струм розряду I_p , А	2	2	4	6
Тиск в газорозрядній камері P , мм.рт.ст.	10	10	20	30
Газове середовище U_k , В		165 (Ar)		215 (N ₂)
Параметр оптимізації – температура катода T , °C.				

З метою визначення впливу значень варійованих факторів на величину параметра оптимізації застосовували повний факторний експеримент, матриця якого має вид 2^4 .

Експерименту, що містить таку кількість опитів відповідатиме лінійна модель, яка має такий вигляд:

$$y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_4 \cdot X_4; \quad (1)$$

Розрахунок коефіцієнтів при відповідних факторах рівняння здійснювалася за формулами, наведеними в роботі [18]:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} y_i}{N}, \quad j = 0, 1, \dots, k, \quad (2)$$

де $\sum_{i=1}^N x_{ji}$ – алгебраїчна сума елементів вектор – стовпця кожного фактора; i – номер дослідів; j – номер фактору; N – число дослідів.

Коефіцієнт b_0 знаходили як середнє арифметичне значення параметра оптимізації $b_0 = 445,652$. Значення коефіцієнтів при відповідних факторах, розраховані за формулою (2), виглядають наступним чином: $b_1 = -27,625$; $b_2 = 93,125$; $b_3 = 61,375$; $b_4 = 26,875$.

Після визначення величини коефіцієнтів при відповідних факторах наша лінійна модель матиме такий вигляд:

$$y = 445,652 - 27,625 \cdot X_1 + 93,125 \cdot X_2 + 61,375 \cdot X_3 + 26,875 \cdot X_4; \quad (3)$$

Як відомо, величина коефіцієнта при відповідному факторі визначає ступінь його взаємодії із параметром оптимізації, тобто чим більше чисельна величина коефіцієнта, тим сильніше відповідний фактор впливатиме на нього [19]. У зв'язку з цим можна зробити висновок, що найбільш тісно з температурою на катоді пов'язані зміни струму розряду. Останнє дає нам підґрунтя вважати цей параметр режиму основним при керуванні зварювальним нагрівом у полі нормального тліючого розряду. Також слід виділити зміни тиску в газорозрядній камері. Як уже було сказано вище, зміни останнього суттєво впливають на питомі енергетичні характеристики в прикатодній ділянці розряду. Тому нехтувати цим параметром не можна.

Найбільш негативно серед досліджуваних параметрів на процес нагріву катода при зварюванні в тліючому розряді впливає збільшення міжелектродної відстані. Чому свідчить знак мінус при відповідному коефіцієнті. Це пояснюється тим, що збільшення відстані катод-анод призводить до стрімкого погіршення енергетичних характеристик розряду внаслідок зниження напруженості електричного поля в позитивному стовпі розряду. Практична реалізація управління енергетичними характеристиками плазми і стабілізацію тліючого розряду в умовах дії енергетичних збурень шляхом зміни міжелектродної відстані було реалізовано і продемонстровано в роботі [20].

Як показано в роботі [21], процес дифузійного зварювання в тліючому розряді являє собою послідовність наступних операцій: 1) іонне очищення деталей перед зварюванням; 2) термічний нагрів зони з'єднання до температури зварювання; 3) витримка при цій температурі, тобто власне зварювання; 4) охолодження після зварювання. Ці етапи відрізняються один від одного як тривалістю, так і енергетичними характеристиками тліючого розряду.

Як вже було показано, найбільш суттєвий вплив на нагрів деталей в полі тліючого розряду має зміна розрядного струму і тиску газу в робочій камері. На рис. 3 показано характер їх зміни на різних етапах дифузійного зварювання.

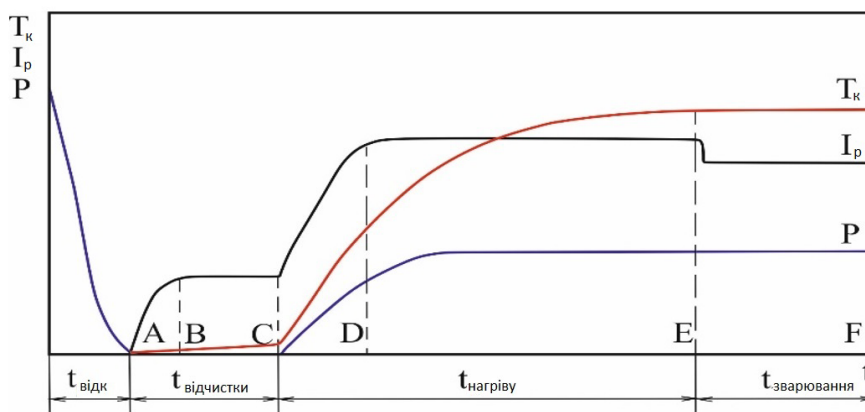


Рис. 3. Циклограма процесу дифузійного зварювання тліючим розрядом:
 I_p – розрядний струм, P – тиск газу, T_k – температура нагріву катода,
 $t_{\text{відк}}$ – тривалість відкачування, $t_{\text{від}}$ – час іонного очищення, $t_{\text{нагр}}$ – тривалість нагріву
заготовок до температури зварювання, $t_{\text{зв}}$ – час зварювання [22]

Нині в більшості сучасних застосовуваних на практиці зварювальних установок тліючого розряду налаштування параметрів режиму здійснюється оператором вручну [23]. При цьому завдання оператора зводиться до безперервного контролю за ходом процесу й підтримання на заданому рівні параметрів режиму на кожному етапі. Це різко погіршує психофізіологічні умови роботи оператора і вимагає підвищення кваліфікації працівників.

З метою покращення умов роботи оператора та відповідно продуктивності процесу нами було розроблено прилади контролю основних параметрів режиму нагріву – струму розряду та тиску газу. Ці пристрої мають зворотний зв'язок за цими параметрами для

контролю та стабілізації їх значення при відхиленні, а також програмні елементи керування (реле затримки часу) для встановлення тривалості процесів іонного очищення та ізотермічної витримки (зварювання). Прилади забезпечують регулювання струму розряду в діапазоні 1 ... 10 А і тиску газу в камері від 1,33 кПа до 13,3 кПа.

Основним елементом схеми регулятора зварювального струму, блок-схема якого наведена на рис. 4, є фазоімпульсний блок керування (ФБК) з кутом спрацьовування силових тиристорів регулятора напруги (РН). Блоки налаштування струмів іонного очищення ($I_{оч}$), нагріву ($I_{нагр}$) і зварювання ($I_{зв}$) підключаються до входу регулятора за допомогою контролера (К), а також реле часу (РЧ). На виході блоків налаштування струму іонного очищення і нагріву підключаються комутаційний інтегруючий блок, які забезпечують регульовану швидкість збільшення розрядного струму за експоненціальним законом у момент запалювання тліючого розряду і при переході від режиму іонного очищення до нагрівання. Сигнал про стан розряду приймається від датчика зварювального струму (ДЗС).

Виконавчими елементами (ВЕ) регулятора тиску газу в камері відкочування (рис. 5) є електропневматичні клапани, підключені до лінії вакууму (ВЕ1) і входу газу (ВЕ2), а також до лінії (ВЕ3). з'єднання камери з атмосферою. Керуючі сигнали U_{04} і U_{05} на вмикання електропневматичних клапанів надходять з виходів порогових елементів (ПЕ1) і (ПЕ2), запрограмованих за допомогою контролерів $K(P_0)$ і $K(P_{зв})$, на спрацьовують при досягненні тиску P_0 в камері (попереднє відкачування) і $P_{зв}$ (робочий тиск) відповідно. Мембранний датчик тиску (ДТ) з електричним вихідним сигналом контролює розрідження в робочій камері. Після закінчення зварювання оператор вручну подає сигнал U_{06} на пороговий елемент (ПЕ3) для пропуску повітря в камеру до атмосферного тиску Па. Порогові елементи, що представляють собою тригери, зібрані на логічних елементах серії K155. Задаючим елементом режиму в обох регуляторах є високо-стабільні регульовані джерела напруги.

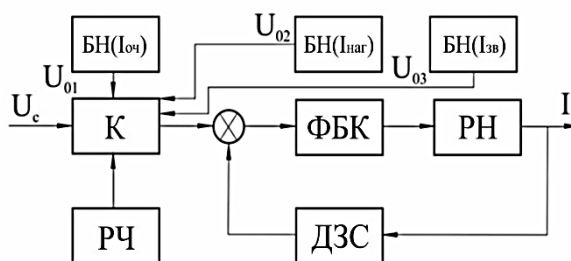


Рис. 4. Структурна схема регулятора зварювального струму: БН($I_{оч}$), БН($I_{нагр}$), БН($I_{зв}$) – блоки налаштування струму іонного очищення, нагріву та зварювання відповідно; К – контролер; ФБК – фазоімпульсний блок керування; РН – регулятор напруги; РЧ – реле часу; ДЗС – датчик зварювального струму

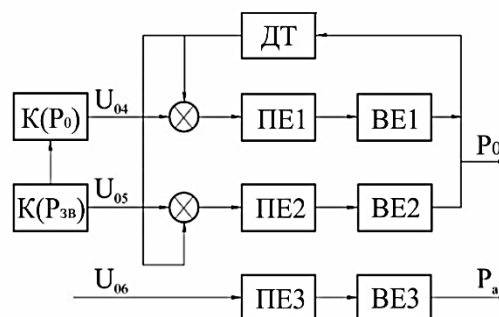


Рис. 5. Структурна схема регулятора тиску газу: ДТ – датчик тиску; ПЕ1, ПЕ2, ПЕ3 – порогові елементи; ВЕ1, ВЕ2, ВЕ3 – виконавчі елементи; $K(P_0)$ – контролер попередньої евакуації; $K(P_{зв})$ – регулятор робочого тиску (тиску зварювання)

При включенні зварювальної установки в регуляторі тиску газу спрацьовує пороговий елемент ПЕ1, який запускає вакуумний насос і відкриває лінію насос-камера, починаючи відкачування останньої. Після досягнення необхідного вакууму на розрядні електроди подається потенціал і регулятор струму встановлює заданий струм іонної очистки $I_{оч}$. Після закінчення часу іонного очищення (60...300 с) реле часу підключає регулятор

струму нагріву. При цьому робочий газ впускається в камеру через клапан (V_2) до певного тиску, встановленого контролером $C(P_{зв})$. Похибка підтримки заданого режиму на всіх стадіях процесу не перевищує 5 %.

Однак слід пам'ятати, що при нагріванні і зварюванні завжди існує ймовірність відхилення параметрів. Останнє неминуче призводить до зниження стійкості тліючого розряду і створення умов для утворення електричної дуги в міжелектродному проміжку. У зв'язку з цим рекомендуємо використовувати ці контрольні пристрої разом з технічними засобами стабілізації тліючого розряду, включеними в розрядний контур. Їхні детальні схеми та опис наведено в роботах [24-26].

Висновки. Таким чином, встановлено, що температура нагріву катода при дифузійному зварюванні в полі тліючого розряду суттєво залежить параметрів режиму, які необхідно враховувати при конкретних технологічних процесах.

Шляхом застосування методів математичного планування експерименту визначено, що основними керуючими впливами, що характеризують зварювальний нагрів у тліючому розряді, є розрядний струм (I_p), який визначає загальну потужність, що виділяється в розрядному проміжку, та тиск газу (P), який змінює питомі енергетичні характеристики розряду.

Розроблено технічні засоби контролю основних параметрів (I_p , P) тліючого розряду при дифузійному зварюванні, які забезпечують регулювання розрядного струму в межах 1...10 А і тиску газу в розрядній камері від 1,33 до 13,3 кПа.

Список використаних джерел

1. Investigation of Mass-Transfer Features with Usage of Ion-Modified Blocking Layer in Commuting Plate of Thermoelements / V. F. Mazanko, Iu. V. Falchenko, O. O. Novomlynets, I. V. Nahorna, S. M. Yushchenko // *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* – 2021. – 43, No. 2. – Pp. 209-217.
2. Vacuum Diffusion Welding of Intermetallic Alloy γ -TiAl with High-Temperature Alloy EI437B Through Nanolayered Interlayers / L. V. Petrushynets, I. V. Falchenko, A. I. Ustinov, O. O. Novomlynets, S. M. Yushchenko // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). – Lviv, Ukraine, 2019. – Pp. 542-546.
3. Котельников Д. И. Технологические особенности применения тлеющего разряда при сварке / Д. И. Котельников // *Технология и организация производства.* – 1976. – №7. – С. 57-59.
4. Котельников Д. И. Нагрев тлеющим разрядом при диффузионной сварке / Д. И. Котельников // *Вестник Киевского политехнического института. Серия «Машиностроение».* – 1968. – № 5. – С. 56-60.
5. Котельников Д. И. Распределение плотности тока в катодном пятне тлеющего разряда. / Д. И. Котельников, Ю. Н. Крисанов // *Автоматическая сварка.* – 1979. – № 11. – С. 27-29.
6. Lima R. S. Thermal Spray Coatings Engineered from Nanostructured Ceramic Agglomerated Powder for Structural, Thermal Barrier and biomedical Applications: A Review / R. S. Lima, B. R. Marpel // *Journal of Thermal Spray Technology.* – 2007. – Vol. 16 (1). – Pp. 40-63.
7. Застосування композиційних порошків системи Al_2O_3 -Ti-Cu для підвищення корозійної стійкості плазмових покриттів / І. В. Смирнов, А. В. Чорний, І. А. Калашнікова, І. А. Селіверстов // *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування.* – 2009. – № 1. – С. 74-81.
8. Селіверстов І. А. Вплив параметрів процесу вакуумно-дугової металізації на якість порошкового матеріалу / І. А. Селіверстов // *Вісник Херсонського національного технічного університету.* – 2008. – № 3 (32). – С. 142-148.
9. Исследование характеристик плазмы в несбалансированной магнетронной распылительной системе / А. А. Соловьев, Н. С. Сочугов, К. В. Оскомов, С. В. Работкин // *Физ. плазмы.* – 2009. – Т. 35, № 5. – С. 443-452.
10. Устрйоство для осаждения тонких пленок с бомбардировкой быстрыми атомами аргона / А. С. Метель, В. П. Болбуков, М. А. Волосова, Ю. А. Григорьев // *Приборы и техника эксперимента.* – 2014. – № 3. – С. 114-121.
11. Данилин Б. С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. / Б. С. Данилин. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 328 с.
12. Рамазанов, К. Н. Ионное азотирование в неоднородной плазме тлеющего разряда / К. Н. Рамазанов, Д. З. Ишмухаметов, Н. С. Садаков // *Вестник УГАТУ.* – 2011. – №3. – С. 67-71.

13. Шехтман С. Р. Использование разряда с полым катодом для обработки поверхности конструкционных материалов. / С. Р. Шехтман, В. В. Будилов, Р. М. Киреев // Физика и химия обработки материалов. – 2001. – №2. – С. 31-35.
14. Болотов Г. П. Керування енергетичними характеристиками тліючого розряду в умовах дифузійного зварювання. / Г. П. Болотов, М. Г. Болотов, М. М. Руденко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2014. – № 1 (71). – С. 145-150.
15. Котельников Д. И. Физико-технические и технологические процессы сварки в тлеющем разряде : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. / Д. И. Котельников. – Москва : МВТУ, 1985. – 32 с.
16. Садовников Б. В. Диффузионная сварка в тлеющем разряде твердого сплава со сталью на опытном образце серийной установки ДС. / Б. В. Садовников // Электротехническая промышленность. Сер. Электросварка. – 1982. – Вып. 4. – С. 3-5.
17. Новик Ф. С. Математические методы планирования экспериментов в металловедении / Ф. С. Новик. – Москва : МИСИС. 1972. – 105 с.
18. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский ; под ред. Ю. П. Адлера. – Москва : Наука, 1976. – 278 с.
19. Налимов В. В. Теория эксперимента. / В. В. Налимов. – Москва : Наука, 1971.
20. Болотов М. Г. Усунення стабілізації електричних дуг у процесах зварювання та паяння в тліючому розряді / М. Г. Болотов, Г. П. Болотов // Наукові вісті КПП. – 2020. – № 3. – С. 50-57.
21. Дятлов В. И. Технология сварки в тлеющем разряде / В. И. Дятлов // Диффузионное соеднение в вакууме металлов, сплавов и неметаллических материалов. – Москва : ПНИЛДСВ, 1970. – С. 89-91.
22. Megalingam, M. Occurrence of ionization instability associated with plasma bubble in glow discharge magnetized plasma / M. Megalingam, B. Sarma // Plasma Sci. Technol. – 2019. – № 2. – С. 1-22.
23. Laimer, J. Glow Discharges Observed in Capacitive Radio-Frequency Atmospheric-Pressure Plasma Jets / J. Laimer, H. Stori. // Plasma Process. Polym. – 2006. – № 3. – Pp. 573-586.
24. Bolotov, M. G. Elimination of Electric Arc Stabilization in Precision Welding with High-Current Glow Discharge / M. G. Bolotov, G. P. Bolotov // 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – 2019. – April. – Pp. 578-583.
25. Болотов, Г. П. Дослідження стійкості тліючого розряду з порожнистим катодом в умовах зварювання / Г. П. Болотов, М. Г. Болотов // Вісник ЧДТУ. – 2008. – № 36. – С. 100-106.
26. Bolotov, G. P. The ways of stabilization of high-current glow discharge in welding” / G. P. Bolotov, M. G. Bolotov, S. A. Stepenko // 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). – 2018. – Pp. 358- 363.

References

1. Mazanko, V. F., Falchenko, Iu. V., Novomlynets, O. O., Nahorna, I. V., & Yushchenko, S. M. (2021). Investigation of Mass-Transfer Features with Usage of Ion-Modified Blocking Layer in Commuting Plate of Thermoelements. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 43(2), 209-217.
2. Petrushynets L. V., Falchenko I. V., Ustinov A. I., Novomlynets, O. O., & Yushchenko, S. M. (2019). Vacuum Diffusion Welding of Intermetallic Alloy γ -TiAl with High-Temperature Alloy EI437B Through Nanolayered Interlayers. *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)* (pp. 542-546).
3. Kotelnikov, D. I. (1976). Tehnologicheskie osobennosti primeneniya tleyushogo razryada pri svarke [Technological features of glow discharge application while welding]. *Tehnologiya i organizaciya proizvodstva – Technology and organization of production*, (7), 57-59.
4. Kotelnikov, D. I. (1968). Nagrev tleyushim razryadom pri diffuzionnoj svarke [Heating by glow discharge while diffusion welding]. *Vestnik Kiev. politehn. In-ta. Ser. «Mashinostroenie» – Bulletin of the Kyiv Polytechnic Institute. Series “Engineering”*, (5), 56-60.
5. Kotelnikov, D. I., & Krisanov, Yu. N. (1979). Raspreделение plotnosti toka v katodnom pyatne tleyushogo razryada [Destrebuton of current density in a cathode spot of a glow discharge] *Avtomaticheskaya svarka – Automatic conflict*, (11), 27-29.
6. Lima, R. S., & Marpel, B. R. (2007). Thermal Spray Coatings Engineered from Nanostructured Ceramic Agglomerated Powder for Structural, Thermal Barrier and biomedical Applications: A Review. *Journal of Thermal Spray Technology*, 16(1), 40-63.

7. Smirnov, I.V., Chornii, A.V., Kalashnikova, I.A., & Seliverstov, I.A. (2009). Zastosuvannya kompozicijnih poroshkiv sistemi Al₂O₃-Ti-Cu dlia pidvishennia koroziinoi stiiikosti plazmovykh pokrittiv [The use of composite powders of the Al₂O₃-Ti-Cu system to increase the corrosion resistance of plasma coatings]. *Zbirnyk naukovykh prats nitsionalnoho universitetu korableubuduvannia – Collection of scientific works of the National University of Shipbuilding*, (1), 74-81.

8. Syeliverstov, I.A. (2008). Vpliv parametriv procesu vakuumno-dugovoyi metalizaciyi na yakist poroshkovogo materialu. [Impact of parameters of the vacuum-arc metallization process on the quality of the powder material]. *Visnik Hersonskogo nacionalnogo tehničnogo universitetu – Bulletin of the Kherson National Technical University*, 3(32), 142-148.

9. Solovev, A.A., Sochugov N.S., Oskomov K.V., & Rabotkin S.V. (2009). Issledovanie harakteristik plazmy v nesbalansirovannoj magnetronnoj raspylitelnoj sisteme [Investigation of plasma characteristics in an unbalanced magnetron sputtering system]. *Fiz. Plazmy – Plasma Phys*, 35(5), 443-452.

10. Metel, A.S., Bolbukov, V.P., Volosova, M.A., & Grigorev, Yu.A. (2014). Ustrojstvo dlya osazhdeniya tonkih plenok s bombardirovkoj bystryimi atomami argona [Device for deposition of thin films with bombardment with fast argon atoms]. *Pribory i tehnika eksperimenta – Instruments and technique of experiment*, (3), 114-121.

11. Danilin, B.S. (1989). *Primenenie nizkotemperaturnoj plazmy dlya naneseniya tonkih plenok [Application of low-temperature plasma for application of thin films]*. Energoatomizdat.

12. Ramazanov, K.N., Ishmuhametov, D.Z., & Sadakov, N.S. (2011). Ionnoe azotirovanie v neodnorodnoj plazme tleyushogo razryada [Ion nitriding in an inhomogeneous glow discharge plasma]. *Vestnik UGATU – Vestnik UGATU*, (3), 67-71.

13. Shehtman S.R., Budilov V.V., Kireev R.M. (2001). Ispolzovanie razryada s polym katodom dlya obrabotki poverhnosti konstrukcionnyh materialov [Use of a discharge with a hollow cathode for processing the surface of structural materials]. *Fizika i himiya obrabotki materialov – Physics and chemistry of material processing*, (2), 31-35.

14. Bolotov, G.P., Bolotov M.G., & Rudenko M.M. (2014). Keruvannya energetichnimi harakteristikami tliyuchogo rozryadu v umovah difuzijnogo zvaryuvannia. [Control of the energy characteristics of a glow discharge in the conditions of diffusion welding.] *Visnik Chernihivskoho derzhavnoho tehnolohichnoho universitetu. Serii: Tehnichni nauki – Bulletin of the Chernihiv State Technological University. Series: Technical sciences*, (1(71)), 145-150.

15. Kotelnikov, D.I. (1985). *Fiziko-tehnicheskie i tehnologicheskie processy svarki v tleyushem razryade [Physico-technical and technological processes of welding in a glow discharge]*. [Doctor dissertation; MVTU].

16. Sadovnikov, B.V. (1982). Diffuzionnaya svarka v tleyushem razryade tverdogo splava so stalju na opytnom obrazce serijnoj ustanovki DS [Diffusion welding in a glow discharge of a hard alloy with steel on a pilot sample of a serial installation of DW]. *Elektrotehnicheskaya promyshlennost. Ser. Elektrosvarka – Electrotechnical industry. Ser. Electric welding*, 4, 3-5.

17. Novik, F.S. (1972). *Matematicheskie metody planirovaniya eksperimentov v metallovedenii [Mathematical methods of planning experiments in metallurgy]*. MISIS.

18. Adler, Yu.P., Markova, E.V., & Granovskii, Yu.V. (1976). *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnyh uslovij [Planning the experiment in search of optimal conditions]*. Nauka.

19. Nalimov, V.V. (1971). *Teoriia eksperimenta [The theory of experiment]*. Nauka.

20. Bolotov, M.G., & Bolotov G.P. (2020). Usunennya stabilizaciyi elektrichnih dug u procesah zvaryuvannia ta payannia v tliyuchomu rozryadi [Elimination of stabilization of electric arcs in the processes of welding and soldering in glow discharge]. *Naukovi visti KPI – Naukovi visti KPI*, (3), 50-57.

21. Diatlov, V.I. (1970). *Tehnologiya svarki v tleyushem razryade. Diffuzionnoe soedinenie v vakuume metallov, splavov i nemetallicheskih materialov [Technology of strife in a smoldering discharge. Diffusion joining of metals, alloys and non-metallic materials in a vacuum]*. PNILDSV.

22. Megalingam, M., & Sarma, B. (2019). Occurrence of ionization instability associated with plasma bubble in glow discharge magnetized plasma. *Plasma Sci. Technol.*, 21, 1–22.

23. Johann Laimer, & Herbert Stori. (2006). Glow Discharges Observed in Capacitive Radio-Frequency Atmospheric-Pressure Plasma Jets. *Plasma Process. Polym.*, 3, 573–586.

24. Bolotov, M.G., & Bolotov, G.P. (April 2019). Elimination of Electric Arc Stabilization in Precision Welding with High-Current Glow Discharge. *2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)* (pp. 578-583).

25. Bolotov G.P., Bolotov M.G. (2008) Doslidzhennya stijkosti tliyuchogo rozryadu z porozhnistim katodom v umovah zvaryuvannya [Investigation of the stability of glow discharge with a hollow cathode under welding conditions]. *Visnik ChDTU – Bulletin of ChDTU*, (36), 100-106.

26. Bolotov G.P., Bolotov M.G., Stepenko S.A. (2018). The ways of stabilization of high-current glow discharge in welding. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)* (pp.358- 363).

Отримано 04.05.23

UDC 621.791.12

Gennady Bolotov¹, Maksym Bolotov², Serhii Oleksienko³, Mykhailo Rudenko⁴

¹Doctor in Technical Sciences, Doctor, Doctor of Department of welding technologies and Construction
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: bolotovgp@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0305-2917>

ResearcherID: [H-5304-2014](https://orcid.org/0000-0003-0305-2917), Scopus Author ID: [6506157907](https://orcid.org/0000-0003-0305-2917)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Welding Technologies and Construction
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: bolotovmg@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0915-4132>

ResearcherID: [H-4183-2014](https://orcid.org/0000-0002-0915-4132), Scopus Author ID: [57190377278](https://orcid.org/0000-0002-0915-4132)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of welding technology and
CAD/CAM/CAE systems of building structures

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: sv.oleks@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5475-4439>

ResearcherID: [F-8197-2014](https://orcid.org/0000-0001-5475-4439), Scopus Author ID: [57190370561](https://orcid.org/0000-0001-5475-4439)

⁴Prime Lecturer of Welding Technologies and Construction

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: rudenko.bear@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9542-7792>

ResearcherID: [G-6235-2014](https://orcid.org/0000-0001-9542-7792), Scopus Author ID: [57190378153](https://orcid.org/0000-0001-9542-7792)

OPTIMIZATION OF THE GLOW DISCHARGE CONTROL PROCESS AS A HEAT SOURCE WHILE DIFFUSION WELDING

Nowadays the diffusion welding is the most effective method to obtain undetachable joints, which is carried out in the solid phase without melting the metals that are welded due to thermomechanical influence. A large nomenclature of types of products performed by diffusion welding presents a set of requirements for diffusion welding heating sources, mainly related to their versatility and specialization in order to obtain the greatest technical and economic effect from its use. The experience of industrial application of diffusion welding shows that of the currently used energy sources (induction, radiation, electric contact, etc.), the heating of products with a glow discharge meets the specified requirements most fully, which allows to regulate the intensity of heating and the distribution of thermal energy in the heating zone within wide limits.

However, the wide industrial application of glow discharge is limited by a number of factors, mainly caused by the lack of understanding of the specifics of heating by this source and management of its main parameters during the welding process. The latter leads to an increase in the level of defectiveness of welded joints due to the human factor, since the operator of the diffusion welding installation in the glow discharge has to work in the conditions of a multifactorial process where it is necessary to control a significant number of technological parameters.

By applying mathematical methods of statistical analysis, the main parameters of the regime, which are most closely related to the temperature of the cathode of the glow discharge in the welding process, are determined in the work. It was determined that the greatest controlling influence on the heating temperature in the glow discharge field is the discharge current (I_p), which determines the total power released in the discharge interval, and the gas pressure (P), which changes the specific energy characteristics of the discharge.

On the basis of the conducted research, we have developed technical means of controlling these parameters during diffusion welding, which provide regulation of the discharge current within 1...10 A and the gas pressure in the discharge chamber from 1.33 to 13.3 kPa.

Keywords: diffusion welding; glow discharge; heating control; gas-discharge plasma.

Fig.: 5. Table: 1. References: 26.