

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.791.4:539.378.3

DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-9-17

Максим Болотов, Геннадій Болотов

ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ В УМОВАХ ЗВАРЮВАЛЬНОГО НАГРІВУ

Актуальність теми дослідження. Для отримання зварних з'єднань із високолегованих сталей, тугоплавких та активних металів, твердих та надтвердих сплавів ефективно застосовують способи зварювання тиском, зокрема, дифузійне зварювання, яке має суттєві переваги поряд з іншими видами зварювання та дозволяє отримувати зварні конструкції складної форми з мінімальними деформаціями.

Постановка проблеми. Серед джерел енергії, що застосовують для дифузійного зварювання, найбільш перспективним є нагрів тліючим розрядом, що горить у середовищі інертних або активних газів при їх тиску нижче за атмосферний і який забезпечує можливість регулювати в широких межах інтенсивність і локальність нагріву. Однак суттєвим недоліком тліючого розряду є його недостатня стабільність і здатність переходити в дугову форму, що може призводити до оплавлення і руйнування деталей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Широка номенклатура зварних виробів визначає необхідність регулювання енергетичних характеристик розряду в значних межах. У цих умовах проблема керуваності тліючого розряду стає безпосередньо пов'язаною із проблемою забезпечення його стабільності. Питанню підвищення стійкості тліючого розряду присвячена значна кількість досліджень, однак у своїй більшості вони відносяться до процесів хіміко-термічної або лазерної обробки матеріалів і не відповідають режимам горіння тліючого розряду, що застосовуються в умовах зварювання.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. До теперішнього часу, всі спроби забезпечити стабільне існування потужнострумового тліючого розряду в межах обраної форми в різних технологічних процесах не є вельми ефективними, оскільки не беруть до уваги мультифакторність проблеми, головним чином зосереджуючись лише на енергетичних аспектах.

Постановка завдання. Метою роботи є вдосконалення методів керування і стабілізації потужнострумового тліючого розряду в процесах дифузійного зварювання.

Виклад основного матеріалу. Для забезпечення стабільності тліючого розряду в роботі запропоновано використовувати певний критерій, який поєднує параметри режиму горіння розряду з умовами переходу його в електричну дугу. Таким критерієм у роботі обрано співвідношення середньої напруги на розрядному проміжку, що визначається частотою виникнення дугових пробіїв, до напруги горіння стабільного тліючого розряду. За відсутності дугових пробіїв значення критерію наближається до максимального $K = 1$, зі збільшенням частоти імпульсів дуги величина K поступово знижується.

Оскільки стійкість тліючого розряду суттєво залежить від основних параметрів режиму, у роботі визначено інтегральний показник, який поєднаний із критерієм стійкості. У ролі такого показника застосовано добуток струму розряду та тиску газу. Встановлено аналітичну залежність критерію стійкості від обраного показника. Розроблено схему автоматичного пристрою переривання процесу нагрівання за умови, якщо фактичне значення коефіцієнта стійкості опуститься нижче його заданого значення.

Висновки відповідно до статті. Оптимальне регулювання тліючого розряду в процесах дифузійного зварювання за умов забезпечення його стабільності може ефективно здійснюватися на основі критерію стійкості, що визначається як співвідношення середнього значення напруги на розрядному проміжку до напруги горіння стабільного тліючого розряду, і величина якого при оптимальному процесі становить $0,5 \dots 1$.

Ключові слова: дифузійне зварювання; тліючий розряд; стійкість розряду.

Рис.: 4. Табл.: 1. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. У багатьох галузях промисловості створення нових конструкцій і машин супроводжується дедалі більш широким застосуванням металів і сплавів, що володіють високими механічними властивостями при різних температурах та навантаженнях, корозійною та ерозійною стійкістю в різних середовищах. До таких матеріалів належать високолеговані корозійностійкі та жароміцні сталі та сплави, тугоплавкі й активні метали, тверді та надтверді сплави. Більшість з цих матеріалів є вартісними, малопластичними, мають високу температуру плавлення і твердість. З'єднання цих матеріалів здебільшого пов'язане з певними труднощами.

Для отримання зварних з'єднань таких матеріалів у однорідних та різнорідних сполученнях ефективно застосовують способи зварювання тиском, зокрема дифузійне зварювання. У порівнянні з іншими видами зварювання воно має суттєві переваги: відносно низьку температуру нагрівання виробів, обмежене зусилля стискання в процесі зварювання, що дає можливість отримувати зварні конструкції складної форми з мінімальними деформаціями.

Постановка проблеми. Для дифузійного зварювання застосовують різні види джерел нагріву, що відрізняються способом перетворення електричної енергії в теплову, інтенсивністю і локальністю нагріву. Широка номенклатура зварних з'єднань висуває до джерел енергії комплекс специфічних вимог, що стосуються їх прийнятності до будь-яких матеріалів, точності регулювання як повної, так і питомої потужності та температури нагріву.

Серед джерел енергії, що використовують для дифузійного зварювання, найбільш повно вказаним вимогам відповідає нагрівання тліючим розрядом, що горить у середовищі інертних або активних газів при їх тиску нижче за атмосферний і який забезпечує можливість регулювання в широких межах інтенсивності й локальності нагріву та розподіл теплової енергії у виробі [1].

Однак у виробничих умовах можуть скластися різні поєднання умов на поверхні виробу, який водночас є одним з електродів розряду – заземленим катодом, які можуть негативно впливати на стабільність горіння розряду й викликати його перехід у електричну дугу. Нагрівання із розподіленого стає концентрованим, що може призводити до оплавлення і руйнування зварюваного виробу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Подальший розвиток і розширення промислового застосування тліючого розряду як джерела енергії для процесів дифузійного зварювання вимагають вирішення проблем, пов'язаних із вдосконаленням способів керування технологічними параметрами розряду. Насамперед це викликано необхідністю автоматизації процесів нагріву металу (зварюваних деталей). Широкий діапазон зварних виробів – масою від одиниць грамів до десятків кілограмів визначає необхідність регулювання потужності розряду в значних межах. У цих умовах проблема керованості тліючого розряду стає безпосередньо пов'язаною з проблемою забезпечення стабільності його горіння. Основним завданням при цьому є визначення припустимих меж регулювання основних енергетичних характеристик тліючого розряду, що забезпечують високу продуктивність процесу при стійкому горінні розряду.

У роботі [2] оптимізація процесу дифузійного зварювання в тліючому розряді здійснюється на основі розробленої детермінованої динамічної моделі іонного нагріву, що дозволяє визначати значення основних параметрів режиму залежно від характеристик зварюваних деталей, але без їх зв'язку з умовами стабільності існування тліючого розряду. У роботах [3; 4; 5] здійснена спроба поєднати стабільність тліючого розряду з його енергетичними характеристиками, однак як параметри регулювання обрані лише один – струм розряду, і не береться до уваги, що процес іонного нагріву є багатофакторним. У роботі [4] сформульовані основні вимоги до керування параметрами нагріву тліючим розрядом та забезпечення стабільності його існування, але без практичних рекомендацій для їх реалізації. У роботах [6; 7] наведені результати застосування технічних засобів для стабілізації та керування тліючим розрядом для конкретних технологічних умов, що не дає змоги їх узагальнення.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Таким чином, до теперішнього часу, всі спроби забезпечити стабільне існування потужнострумового тліючого розряду в межах обраної форми в різних технологічних процесах, включаючи зварювання, паяння та поверхневу обробку матеріалів, не є вельми ефективними, оскільки вони не беруть до уваги мультифакторність проблеми, головним чином зосереджуючись лише на енергетичних аспектах. Це потребує подальших, більш ретельних досліджень цього питання.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Метою роботи є вдосконалення методів керування і стабілізації горіння потужнострумового тліючого розряду в процесах дифузійного зварювання.

Виклад основного матеріалу. Зварювання здійснюється в режимі нормального тліючого розряду при підвищених тисках газу 2...15 кПа і струмах розряду 1...20 А. У цьому режимі величина катодного падіння потенціалу залежить лише від роду газу та зварюваного матеріалу, а густина струму на катоді (зварюваних деталях), при достатньо значній площі катода, залежить від роду газу і прямо пропорційна квадрату тиску газу (закон Гея). При збільшенні струму розряду площа катодної плями (площа тліючого світіння) на поверхні зварюваних деталей зростає пропорційно струму до заповнення всієї площі поверхні катода, після чого починається збільшення катодного падіння потенціалу (режим аномального тліючого розряду). При деякому повному струмі цей режим стає нестабільним, а на поверхні катода утворюється катодна пляма дуги, тобто режим горіння розряду з тліючого переходить у дуговий [8].

Аналогічне явище спостерігається і при підвищенні тиску газу, яке супроводжується збільшенням густини струму в катодній плямі нормального тліючого розряду. Зі збільшенням тиску газу зростає чутливість розряду до стану поверхні катода. У цих умовах на стабільність горіння тліючого розряду суттєво впливає емісійна неоднорідність поверхні катода, тобто його здатність емітувати електрони в результаті бомбардування іонами, обумовлена наявністю на поверхні зварюваних деталей забруднень різного роду, що мають меншу, ніж у метали, роботу виходу електронів [9]. На стабільність горіння тліючого розряду впливає також мікрорельєф поверхні катода, оскільки із підвищенням тиску газу висота шорсткості стає порівняною з протяжністю області катодного падіння потенціалу, що викликає найбільш суттєве викривлення електричного поля в поверхні катода. Це супроводжується виникненням мікродугових розрядів на вершинах мікронерівностей [10].

Підвищення тиску газу поряд зі збільшенням густини струму на катоді, призводить також до зростання питомої об'ємної потужності в позитивному стовпі розряду jE , де j – густина струму в перерізі позитивного стовпа, а E – поздовжня напруженість електричного поля в стовпі. Збільшення jE обмежене можливістю контракції (стискання) тліючого розряду й переходу його у шнурову форму. У шнуровому режимі напруга горіння розряду знижується, а зі зростанням струму або тиску газу шнур перетворюється в дуговий розряд [11].

При відносно незначних струмах і тисках газу переходить тліючого розряду у дуговий здійснюються епізодично і тривають обмежений час – 1...2 напівперіоди (рис. 1, б), після чого самовільно загасають. Частота таких дугових пробоїв визначається як характеристиками поверхні катода, так і режимом горіння розряду. Із підвищенням питомих енергетичних характеристик розряду частота таких пробоїв зростає (табл. 1) [12], і після досягнення певних значень струму і тиску газу тліючий розряд переходить у дугову форму (рис. 1, в).

Таблиця 1

Порівняльна характеристика джерел живлення тліючого розряду

Вид тліючого розряду	Кількість дуг за 1 хв при струмі розряду, А								
	1	1,5	2	2,35	2,5	2,8	3	4	5
З ІСП*	0,1		0,2		0,23		0,25	2	4,75
з R _b **	0,1	0,25		1,25		5		11	18

* – джерело живлення на основі індуктивно-емісійного перетворювача (зовнішня характеристика наближається до вертикальної);

** – джерело живлення із стабілізуючим активним опором у колі розряду (зовнішня характеристика круто спадаюча).

У зв'язку з цим при зварюванні в тліючому розряді, особливо при автоматичному керуванні процесом, дуже важливим стає визначення меж зміни енергетичних параметрів тліючого розряду, що забезпечують високу продуктивність нагріву і водночас за-

хист виробів від оплавлення концентрованими дуговими розрядами. Для цього необхідно виділити будь-який показник (критерій), який дозволить би поєднати параметри горіння тліючого розряду з імовірністю переходу його в електричну дугу.

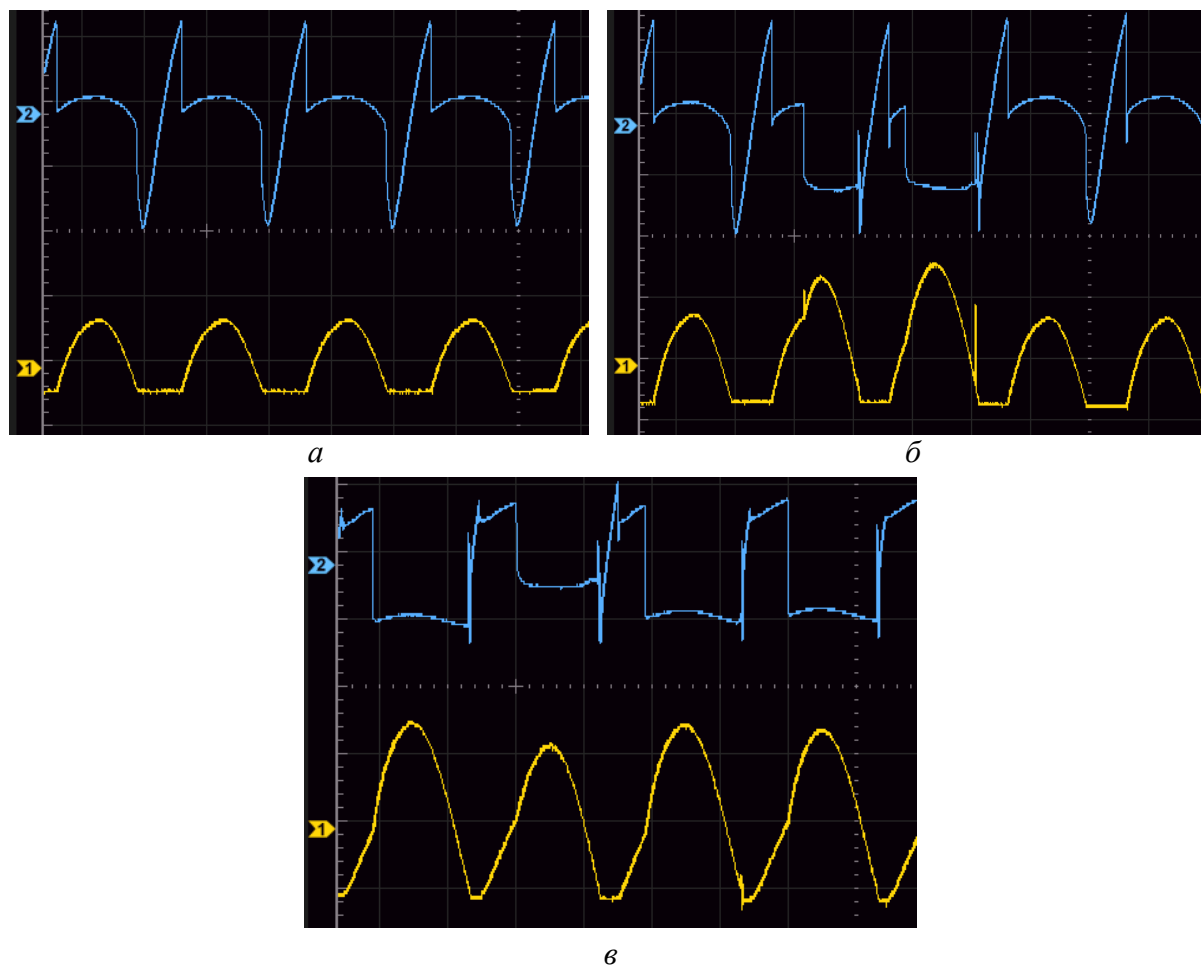


Рис. 1. Осцилограми напруги (зверху) та струму тліючого розряду при стабільному (а) та перехідних (б, в) режимах горіння

Найбільш характерною і однозначною ознакою переходу тліючого розряду в дугувий є значне зниження падіння напруги на розрядному проміжку. Це викликано насамперед, що падіння потенціалу в катодній області тліючого розряду (150...400 В) значно перевищує аналогічне значення в електричній дузі (10...30 В).

У цьому випадку як критерій стійкості горіння тліючого розряду можливо прийняти відношення:

$$K = \frac{U_{p.cp}}{U_{p.o}}, \quad (1)$$

де $U_{p.cp}$ – середнє значення напруги на розрядному проміжку за контрольний період, що визначається частотою виникнення дугових пробоїв;

$U_{p.o}$ – напруга стабільного горіння тліючого розряду при заданих параметрах режиму.

У свою чергу, співвідношення (1) буде пропорційним такому співвідношенню:

$$\frac{U_{p.cp}}{U_{p.o}} \sim \frac{\tau_p}{\tau_p + \tau_d}, \quad (2)$$

де τ_p – тривалість горіння тліючого розряду за контрольний проміжок часу;

τ_d – тривалість дугових пробоїв, що виникають у міжелектродному проміжку за той самий період.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

За відсутності дугових пробоїв, коли нагрів здійснюється стабільним тліючим розрядом, тобто $\tau_0 = 0$, а середня напруга на розряді $U_{p.cр}$ дорівнює $U_{p.o}$, критерій стійкості наближається до максимального значення $K = 1$. Зі збільшенням частоти імпульсів дуги або їх тривалості величина K поступово знижується.

Як свідчать результати осцилографування перехідних процесів у тліючому розряді (рис. 1), формування електричної дуги в напівперіодах струму здійснюється через стабільність тліючого розряду, тому середнє значення напруги на розрядному проміжку буде становити орієнтовно:

$$U_{p.cр} \approx \frac{U_{p.o} + U_d}{2}. \quad (3)$$

Зі збільшенням потужності тліючого розряду момент формування електричної дуги зміщується ближче до початку напівперіоду і при певних струмах розряду дугові пробої починають займати більшу його частину. У цих умовах критерій стійкості прагне до деякого мінімального значення $U_d/U_{p.o}$ (де U_d – падіння напруги на розрядному проміжку при дугових пробоях), тобто $K \rightarrow \min$.

Беручи до уваги різні наслідки для зварюваних деталей від дії дугових розрядів різної потужності та частоти виникнення, величину критерія стійкості можна варіювати в деяких межах. Електричні дуги, що виникають при горінні тліючого розряду малої потужності (малоамперного розряду), також будуть малопотужними і не забезпечать критичного впливу на зварювані деталі, тому можна прийняти $K < 1$. Зі збільшенням потужності виникаючих дугових розрядів та/або їх частоти критерій стійкості необхідно підвищувати $K \rightarrow 1$.

Оскільки стійкість тліючого розряду, як вказано вище, великою мірою залежить від основних параметрів режиму його горіння – струму та тиску газу, доцільно визначити деякий інтегральний показник, що характеризує режим горіння тліючого розряду, і пов'язати його з критерієм стійкості K .

У роботі [13] у ролі такого показника прийнято струм розряду. Оскільки стійкість тліючого розряду визначається не тільки абсолютними значеннями його потужності, а й питомими енергетичними характеристиками в плямі нагріву та об'ємі розряду, які визначаються тиском газу, такий показник не можна вважати адекватним. У роботі [14] як інтегральний показник стійкості приймається критична величина добутку струму розряду і тиску газу $(I \cdot P)_{кр}$. Однак у цій роботі розглядається стійкість протяжного циліндричного та малоамперного тліючого розряду (струм менше 1 А) у трубках обмеженого діаметра. При цьому, як впливає з наведеного критерію, між струмом і тиском газу обраний лінійний зв'язок.

При зварюванні тліючий розряд не обмежується стінками і при зміні струму розряду і тиску газу може природним чином змінювати свої поперечні розміри. У таких умовах залежність між струмом і тиском газу, що характеризує стійкість розряду, має більш складний характер. На рис. 2 наведено отримані експериментально значення параметрів режиму, що відповідають початку появи дугових пробоїв (початку нестабільності розряду) $P_{нн}$, та стабільного переходу тліючого розряду в дуговий $P_{кр}$ для декількох газових середовищ – гелію, аргону, азоту.

Обробка кривих, наведених на рис. 2, свідчить, що в цьому випадку (для вільного тліючого розряду) інтегральний показник, що поєднує граничні значення струму розряду і тиску газу може бути представлений у вигляді добутку $(I^{1/2} \cdot P)_{кр}$. При цьому, згідно з рис. 2, гранична величина цього добутку становить для гелію – 82, аргону – 39, азоту – $26,6 \text{ A}^{1/2} \cdot \text{kPa}$.

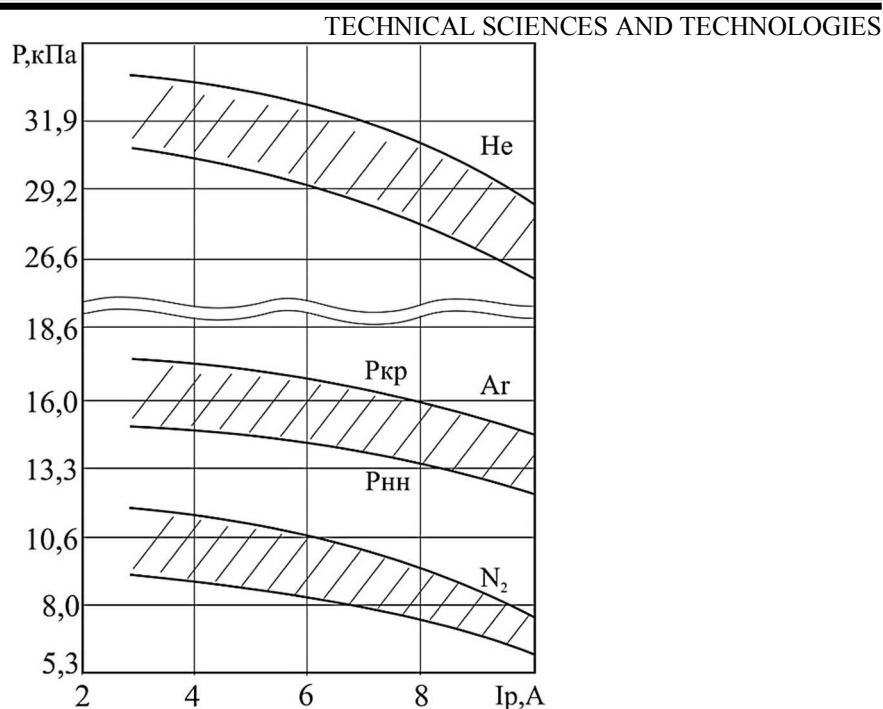


Рис. 2. Експериментальні залежності граничних значень тиску газу (аргону, азоту та гелію) у робочій камері від струму тліючого розряду I_p . ($P_{нн}$ – тиск газу, що відповідає початку появи нестабільностей тліючого розряду, $R_{кр}$ – критичні значення тиску газу, при яких спостерігається перехід тліючого розряду у дуговий)

Граничну величину критерію стійкості процесу нагріву, як було вказано, можливо задавати попередньо, зважаючи на конструктивні особливості зварюваних деталей – маси, товщини, форми перерізу. На рис. 3 наведена орієнтовна залежність граничних значень цього критерію від параметра $(I^{1/2} \cdot p)$ при зварюванні в середовищі азоту. При зварюванні на режимах, що суттєво нижче критичних $(I^{1/2} \cdot p) \ll (I^{1/2} \cdot p)_{кр}$, можливо помітно знизити значення критерію стійкості (до 0,5...0,6).

Водночас підвищення продуктивності нагріву вимагає проведення процесу на режимах, коли значення параметра $(I^{1/2} \cdot p)$ наближається до критичних, тобто нагрів здійснюється на значних струмах розряду.

У цих умовах навіть короточасний вплив потужних дуг на виріб здатний призвести до його оплавлення, тому вимоги до критерію стійкості зростають, що проявляється в підвищенні його значення до 0,9...0,95.

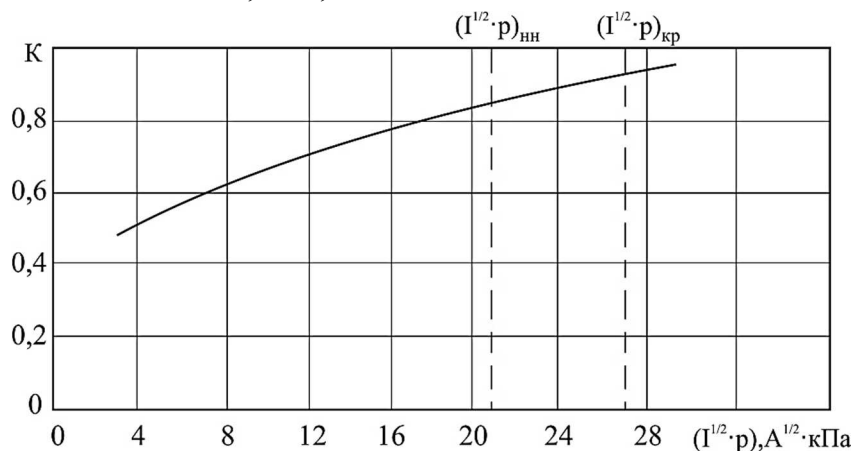


Рис. 3. Залежність граничних значень критерію стійкості тліючого розряду K від інтегрального параметра $(I^{1/2} \cdot p)$

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Якщо в процесі зварювання фактична величина K опуститься нижче заданого рівня, процес нагріву повинен бути перерваним для попередження руйнування деталей, або при незмінному тиску газу здійснено зниження струму розряду до значень, коли $(I^{1/2} \cdot p) < (I^{1/2} \cdot p)_{кр}$.

Ця операція може бути здійснена як оператором, так і автоматично. На рис. 4 наведено структурну схему автоматичного виконання цієї операції.

На один із входів порівняльного елемента 1 подається задана напруга $K \cdot U_{p,0}$, яка дорівнює припустимому для цього процесу значенню середньої напруги на розряді $U_{p,сп}$, визначеному з урахуванням заданої величини критерію стійкості (рис. 3). На другий вхід цього елемента через датчик напруги 5 та інтегратор 6 поступає фактичне значення U_p . Інтегратор забезпечує реєстрацію не миттєвих значень напруги на розрядному проміжку U_p , а деякого середнього значення з урахуванням короточасних перехідних процесів, що супроводжуються стрибками напруги.

Величина напруги горіння тліючого розряду $U_{p,0}$ може бути визначена попередньо, оскільки вона залежить переважно від роду й тиску газу p та міжелектродної відстані l і меншою мірою від струму розряду. Для визначення орієнтовної величини цієї напруги можна скористатись залежністю $U_{p,0} = A p_{mln}$, де A , m , n – емпіричні коефіцієнти, значення яких становлять для аргону 531; 0,12 та 0,11, а для азоту – 812; 0,19 та 0,15 відповідно.

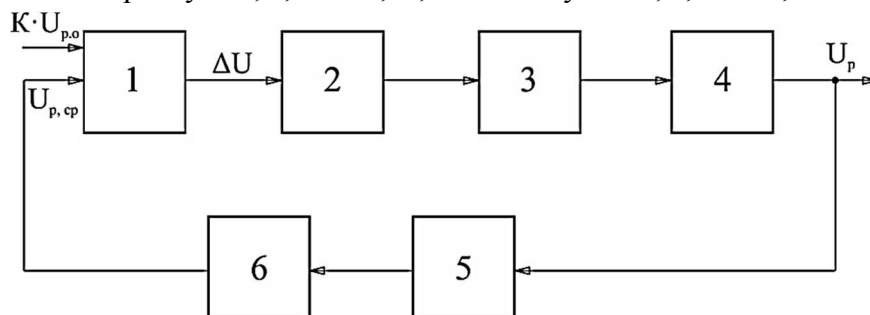


Рис. 4. Структурна схема автоматичної стабілізації тліючого розряду на основі критеріальної оцінки межі стійкості горіння

Якщо в процесі зварювання фактичне значення середньої напруги опуститься нижче заданого значення, пороговий елемент 2 відключить тиристорний випрямляч 3 живлення тліючого розряду 4, або за допомогою фазорегулятора на його вході змінить кут відхилення тиристорів у бік зменшення струму розряду.

Висновки відповідно до статті. Оптимальне регулювання тліючого розряду в процесах дифузійного зварювання за умов забезпечення його стабільності може ефективно здійснюватися на основі критерія стійкості, що визначається як співвідношення середнього значення напруги на розрядному проміжку до напруги горіння стабільного тліючого розряду, і величина якого при оптимальному процесі становить 0,5...1.

Список використаних джерел

1. Котельников Д. И. Сварка давлением в тлеющем разряде. Москва: Металлургия, 1981. 116 с.
2. Болотов М. Г. Анализ основных нестабильностей тлеющего разряда средних давлений в условиях обработки материалов. *Технічні науки та технології*. 2018. № 2 (12). С. 103–116.
3. Сиваков А. Л. Управление процессом диффузионной сварки. *Обмен опытом в радиопромышленности*. 1987. № 5. С. 58–62.
4. Котельников Д. И. Технологические особенности применения тлеющего разряда при сварке. *Технология и организация производства*. 1976. № 7. С. 57–59.
5. Напартович А. Л., Старостин А. Н. Механизмы неустойчивости тлеющего разряда повышенного давления. *Химия плазмы*. 1979. Вып. 6. С. 153.

6. 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. P. 365–369.
7. Bolotov G. P., Bolotov M. G., Yushchenko S. M. Stabilization of high-current glow discharge under the welding conditions. *IEEE 38th International Conference «Electronics and Nanotechnology ELNANO'2018»*. April 2018. P. 521–525
8. Абильтситов Г. А., Велихов Е. П., Голубев В. С., Лебедев Ф. В. Мощные газоразрядные СО₂-лазеры. Москва: Наука, 1984. 106 с.
9. Елецкий А. В., Рахимов А. Т. Неустойчивости в плазме газового разряда. *Химия плазмы*. 1974. Вып. 4. С. 123.
10. Котельников Д. И. Применение оборудования для сварки и пайки в тлеющем разряде. Чернигов: Облсовет НТО, 1980. 56 с.
11. Недоспасов А. В., Хайт В. Д. Колебания и неустойчивости низкотемпературной плазмы. Москва: Наука. 1979. 189 с.
12. Гайсин Ф. М., Саттаров Р. К., Халиков Р. А. Исследование перехода тлеющего разряда в электрическую дугу при высоких температурах. Казань: КАИ, 1975. 12 с.
13. Ульянов К. Н. Теория нормального тлеющего разряда при среднем давлении. *Теплофизика высоких температур*. 1972. Т. 10, № 5. С. 931.
14. Ecker, G., Kroll W., Zoller O. Thermal Instability of the plasma column. *Phys. Fluids*. 1964. V. 7, № 12. P. 2001.

References

1. Kotelnikov D. I. (1981) *Svarka davleniem v tleyuschem razryade [Glow discharge welding]*. Moscow: Metallurgiiia [in Russian].
2. Bolotov, M. G. (2018). Analiz osnovnih nestabilnostei tliuchoho rozriada serednikh tiskiv v umovakh obrobki materialiv [Analysis of the main instabilities of medium pressure glow discharge in the conditions of materials treatment]. *Tekhnichni nauki ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 2 (12), 103–116 [in Ukrainian].
3. Sivakov, A. L. (1987). Upravlenie protsessom diffuzionnoi svarki [Diffusion welding process control]. *Obmen opytom v radiopromyshlennosti – Exchange of experience in the radio industry*, 5, 58–62 [in Russian].
4. Kotelnikov, D. I. (1976). Tekhnologicheskie osobennosti primenenisa tlesushcheho razriada 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. Napartovich, A. L., Starostin, A. N. (1979). Mekhanizmy neustoichivosti tleiushchego razriada povyshennogo davleniia [Mechanisms of instability of glow discharge of high pressure]. *Khimiia plazmy – Chemistry of plasma*, 6, 153 [in Russian].
6. Bolotov, G. P., Bolotov M. G. (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). Kyiv [in Ukrainian].
7. Bolotov, G. P., Bolotov M. G., Yushchenko, S. M. (2018). Stabilization of high-current glow discharge under the welding conditions. *IEEE 38th International Conference «Electronics and Nanotechnology ELNANO'2018»* (pp. 521–525). Kyiv [in Ukrainian].
8. Abiltitov, H. A., Velikhov, E. P., Golubev, V. S., Lebedev, F. V. (1984). *Moschnyie gazorazryadnyie SO2-lazeryi [Powerful CO2 discharge lasers]*. Moscow: Nauka [in Russian].
9. Eletsii, A. V., Rakhimov, A. T. (1974). Neustoichivosti v plazme gazovogo razriada [Instabilities in plasma gas discharge]. *Khimiia plazmy – Chemistry of plasma*, 4, 123 [in Russian].
10. Kotelnikov, D. I. (1980). *Primenenie oborudovaniya dlya svarki i payki v tleyuschem razryade [The use of equipment for welding and soldering in a glow discharge]*. Chernigov: Oblsovnet NTO [in Russian].
11. Nedospasov, A. V., Khait V. D. (1979). *Kolebaniia i neustoichivosti nizkotemperaturnoi plazmy [Oscillations and instability of low-temperature plasma]*. Moscow: Nauka [in Russian].
12. 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].

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

13. Ulianov, K. N. (1972). Teoriia normalnogo tleiushchego razriada pri srednem davlenii [The theory of normal glow discharge at average pressure] // Teplofizika vysokikh temperatur – Thermophysics of high temperatures, 10 (5), 931 [in Russian].

14. Ecker, G., Kroll W., Zoller O. (1964). *Thermal Instability of the plasma column. Phys. Fluids*, 7 (12), 2001.

UDC 621.791.4:539.378.3

Maksym Bolotov, Gennady Bolotov

CRITERIA DETERMINATION OF THE BORDERS OF GLOW DISCHARGE ENERGY STABILITY IN THE WELDING HEATING CONDITIONS

Introduction. To obtain welded joints from high-alloy steels, refractory and active metals, hard and superhard alloys, pressure welding methods, in particular, diffusion welding, which has significant advantages along with other types of welding and allows to obtain complex-shaped welded structures with minimal deformations, are effectively used.

Problem statement. Among the energy sources used for diffusion welding, the most promising is the heating by a glow discharge, which burns in an environment of inert or active gases at their pressure below atmospheric, and which makes it possible to regulate the intensity and locality of heating over wide limits. However, a significant drawback of a glow discharge is its lack of stability and the ability to transform into an arc shape, which can lead to the melting and destruction of parts.

Actual scientific researches and issues analysis. A wide range of welded products determines the need to regulate the energy characteristics of the discharge in considerable limits. Under these conditions, the problem of controllability of a glow discharge becomes directly related to the problem of ensuring its stability. A significant amount of research is devoted to the issue of increasing the stability of a glow discharge, but most of them are related to the processes of chemical-thermal or laser processing of materials and do not correspond to the burning discharge glow regimes used under welding conditions.

The research objective. The aim of the work is to improve the management and stabilization of a high-current glow discharge in the processes of diffusion welding.

The statement of basic materials. To ensure the stability of a glow discharge in the work, it was proposed to use a certain criterion that combines the parameters of the discharge mode with the conditions for its transition into an electric arc. The ratio of the average voltage across the discharge gap, which is determined by the frequency of occurrence of arc breakdowns, to the burning voltage of a stable glow discharge, is chosen as such a criterion. In the absence of arc breakdowns, the criterion value approaches the maximum $K = 1$, with an increase in the frequency of arc pulses, the K value gradually decreases.

Since the stability of a glow discharge significantly depends on the basic parameters of the mode, an integral index is defined in the work, which is connected to the stability criterion. As such an indicator, the product of discharge current and gas pressure was used. The analytical dependence of the stability criterion on the selected indicator is established. A scheme has been developed for an automatic device for interrupting the heating process, provided that the actual value of the stability coefficient drops below its specified value.

Conclusions. Optimal regulation of a glow discharge in diffusion welding processes, provided that it is stable, can be effectively carried out on the basis of the stability criterion, defined as the ratio of the average value of the voltage across the discharge gap to the burning voltage of a stable glow discharge, and its value at the optimal process is 0.5 ... 1.

Keywords: diffuse welding; glow discharge; discharge stability.

Fig.: 4. Table: 1. References: 9.

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).

Bolotov Maksym – PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer 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

Scopus: 57190377278

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

Болотов Геннадій Павлович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Bolotov Gennady – Doctor in Technical Sciences, Doctor, Doctor 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: bolotovgp@mail.ua

ResearcherID: H-5304-2014

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0305-2917>