

РОЗДІЛ IV. ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ

УДК 621.791.01.6

Г.П. Болотов, д-р техн. наук

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ НАГРІВУ ТЛІЮЧИМ РОЗРЯДОМ В УМОВАХ ЗВАРЮВАННЯ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

Здійснено аналіз процесу нагріву тліючим розрядом середнього тиску як теплового об'єкта керування. Охарактеризовано основні збурення, що негативно впливають на стабільність процесу. Визначено основні керуючі дії та їх зв'язок із абсолютними та питомими енергетичними характеристиками тліючого розряду.

Ключові слова: тліючий розряд, нагрів, об'єкт керування.

Произведен анализ процесса нагрева тлеющим разрядом среднего давления как теплового объекта управления. Охарактеризованы основные возмущения, негативно влияющие на стабильность процесса. Определены основные управляющие воздействия и их связь с абсолютными и удельными энергетическими характеристиками тлеющего разряда.

Ключевые слова: тлеющий разряд, нагрев, объект управления.

The analysis of the process of heating medium pressure glow discharge as thermal control object. Describes major disturbances that affect the stability of the process. The basic control actions and their relation to the absolute and specific characteristics of the glow discharge.

Key words: glow discharge, heating, control object.

Постановка проблеми. У промисловості знаходять все більш широке застосування зварні з'єднання складної форми, виконані з однорідних та різнорідних металів та сплавів, що мають високі механічні та експлуатаційні характеристики, але обмежену здатність до зварювання. Для отримання таких з'єднань найбільш ефективно застосовуються способи зварювання тиском, зокрема, дифузійне зварювання без розплавлення вихідних матеріалів, що здійснюється одночасно по значній площі без помітної деформації вихідних заготовок. Це вимагає розроблення та застосування джерел енергії, що мають невисокий коефіцієнт зосередженості, забезпечують плавне регулювання термічного циклу і мають адаптивність до зміни номенклатури виробів.

Результати попередніх досліджень. Серед застосованих нині для дифузійного зварювання джерел енергії (радіаційні, індукційні, електроконтактні) найбільш повно вказаним вимогам відповідає нагрів виробів тліючим розрядом, що горить у середовищі захисних газів при тисках, нижче атмосферного [1]. Дослідження, виконані у різні часи В.С. Ваніним, Д.І. Котельниковим, І.М. Мухою, Є.О. Жилвим та ін., показали високу ефективність та перспективність використання тліючого розряду як інструменту та джерела нагріву в процесах фізико-технічного оброблення та з'єднання металів. Технологічні властивості іонного нагріву роблять ефективним його застосування під час зварювання виробів як відносно простої, так і складної форми у серійному, одиничному і ремонтному виробництвах. Однак подальший розвиток і широке промислове застосування зварювання в тліючому розряді на сьогодні обмежуються недостатньо розвиненими уявленнями щодо механізму нагріву тліючим розрядом середніх тисків та засобів керування його енергетичними характеристиками, нестабільністю якісних показників з'єднань та недостатньою продуктивністю процесу.

Мета роботи. Метою роботи є аналіз процесу нагріву тліючим розрядом в умовах зварювання як теплового об'єкта керування, що сприятиме вдосконаленню засобів регулювання енерговиділенням у розрядній плазмі і підвищенню техніко-економічних характеристик зварювання в плазмі тліючого розряду.

Виклад основного матеріалу. Дифузійне зварювання відноситься до термомеханічних процесів, які забезпечують як тепловий, так і силовий вплив на деталі, що сполучаються. Однак для створення необхідного зусилля стискання деталей застосовують, як правило, типові схеми і конструктивні рішення. Тому принципова відмінність способів

дифузійного зварювання полягає у фізичній природі джерела нагрівання і теплового впливу на виріб. Це дозволяє обмежитися розглядом процесу нагрівання і зварювання як теплового об'єкта, що характеризується певною послідовністю перетворення енергії, зовнішніми і внутрішніми факторами, які впливають на його функціонування [2].

В умовах нагріву тліючим розрядом деталі, що зварюється, є один з електродів розряду – заземлений катод. Катодна пляма, через яку здійснюється введення теплової енергії у зварювані вироби, розташовується на бічних поверхнях деталей, внаслідок чого тліючий розряд є поверхневим джерелом теплоти. Це обумовлює такі особливості нагрівання в умовах дифузійного зварювання, як:

- 1) нагрів зварних з'єднань (зварного контакту) здійснюється за допомогою теплопровідності від зовнішньої поверхні виробу, що сприймає енергію джерела тепла;
- 2) нагрівання виробу, що зварюється, пов'язане у багатьох випадках із одночасним нагріванням пристосувань, які забезпечують його стиснення, що обумовлює енергетичну надмірність процесу.

Для зниження втрат енергії зварювальний нагрів здійснюють, як правило, нормальним тліючим розрядом, в якому катодна пляма має обмежені розміри, що зменшує об'єм деталей, який піддається прямому нагріванню. Аномальний тліючий розряд, в якому катодна пляма покриває повністю поверхню деталей і частково (або також повністю) складальні пристосування, використовується, зазвичай, при хіміко-термічній або термічній обробці.

Процес нагріву тліючим розрядом, аналогічно до інших способів зварювання (дугове, електронно-променеве, електрошлакове та ін.), що включають термічну складову, може бути представлений як результат функціонування системи "джерело живлення-джерело нагріву-виріб" (рис. 1) [3].

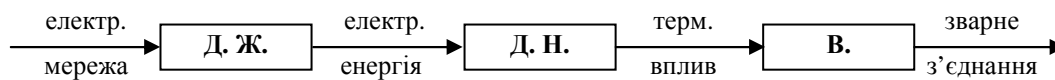


Рис. 1. Узагальнена схема зварювального процесу

Для вивчення особливостей технологічного процесу нагріву деталей як об'єкта керування необхідно деталізувати наведену узагальнену схему з урахуванням основних взаємозалежностей, властивих цьому способу нагріву. Схема процесу нагріву тліючим розрядом з урахуванням можливих функціональних взаємозв'язків між окремими її елементами може бути представлена у вигляді двохконтурної електротермічної системи (рис. 2):

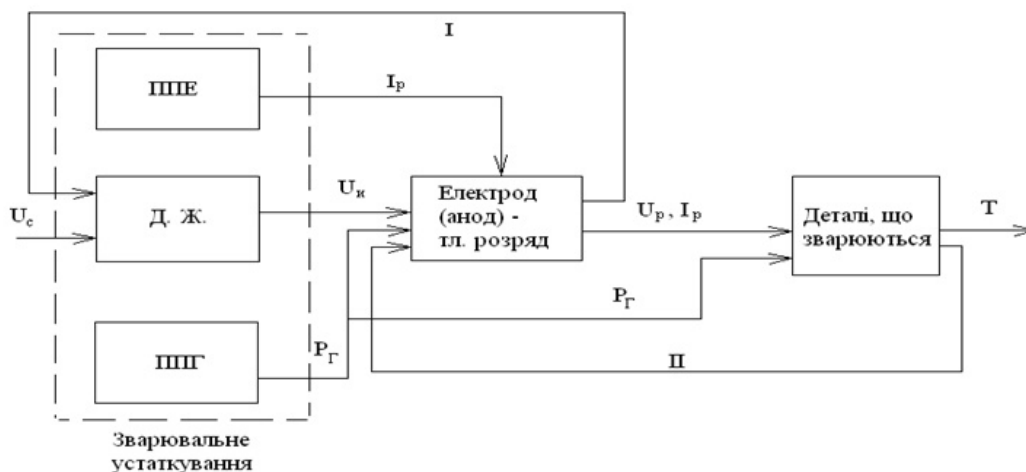


Рис. 2. Схема управління нагріванням у тліючому розряді: ДЖ – джерело живлення тліючого розряду; ППГ – пристрій подачі робочого газу; ППЕ – пристрій переміщення електрода (анода) розряду

Замкнений контур I включає у себе джерело живлення, анод (електрод) та тліючий розряд, тобто елементи системи, що визначають перетворення електричної енергії мережі в електричну та теплову енергію тліючого розряду. Контур характеризує вплив налаштувань зварювального устаткування – джерела живлення (ДЖ) й пристрою подачі газу ППГ на забезпечення підтримки горіння тліючого розряду. Зовнішніми керуючими впливами у цьому контурі, що визначають режим тліючого розряду і його енергетичні характеристики, є: напруга на виході джерела живлення, величина зовнішнього опору в розрядному колі, а також струм розряду, що задається ними, який, у свою чергу, визначає повну потужність розряду. За допомогою пристрою подачі газу в камері створюється захисне газове середовище, в якому горить тліючий розряд при певному тиску газу, величина якого характеризує питому об'ємну потужність, що виділяється в одиниці об'єму розрядної плазми.

Контур II включає у себе тліючий розряд та деталі, що зварюються, і характеризує вплив режиму горіння тліючого розряду на температурний стан останніх. Параметрами режиму горіння розряду й одночасно керуючими впливами в цьому контурі є струм розряду, напруга на міжелектродному проміжку і знову ж тиск газу в камері, бо в цьому випадку, крім об'ємної питомої потужності в позитивному стовпі розряду, він визначає також густину енергії, що виділяється в катодній плямі, розташованій на бічних поверхах зварюваних деталей.

Наявність місцевих зворотних зв'язків, наведених на схемі, обумовлена взаємним впливом параметрів процесу. Так, конструктивна недосконалість зварного вузла (наявність щілин, зазорів та ін.) може призводити до порушення режиму горіння тліючого розряду аж до переходу його в іншу форму.

Кінцевим елементом схеми є зварне з'єднання, температурний стан якого як під час виходу на режим зварювання, так і в процесі ізотермічної витримки визначає експлуатаційні властивості виробу.

У реальних умовах нагріву заготовок у процесі зварювання або паяння кожен з елементів, представлених у схемі, функціонує в умовах збурень, які можуть носити тривалий, короткочасний, випадковий чи періодичний характер. Збурення мають різну фізичну природу, але всі вони призводять до порушення необхідного теплового стану об'єкта.

Основні збурення, що діють на процес іонного нагрівання під час зварювання і паяння з урахуванням характеру їх зміни і місця, в якому вони виникають, можна розділити на дві групи (таблиця):

– енергетичні, до яких відносяться непрогнозовані відхилення параметрів, що характеризують режим нагріву;

– технологічні збурення, зумовлені недосконалістю конструкції зварного вузла, похибками підготовки деталей до зварювання або появою цих похибок у процесі нагріву.

Таблиця

Основні збурення, що порушують стабільність енерговиділення тліючого розряду

№ п/п	Характер збурення	Місце виникнення (прикладання)	Характер зміни
1	2	3	4
Енергетичні збурення			
1.1	Коливання напруги мережі (напруги джерела живлення)	Джерело живлення	Плавний, стрибкоподібний
1.2	Зміна опору зварювального кола	Джерело живлення, зовнішнє електричне коло, тліючий розряд	Плавний, стрибкоподібний
1.3	Коливання тиску газу в робочій камері	Газ, тліючий розряд	Плавний

Закінчення табл.

1	2	3	4
Технологічні збурення			
2.1	Порушення еквідистантності розташування електрода (анода) відносно поверхні деталей	Анод, деталі, що зварюються	Плавний
2.2	Зміна емісійних властивостей поверхонь деталей	Деталі, що зварюються, тліючий розряд	Плавний, стрибкоподібний
2.3	Зміна первинної геометричної форми деталей із утворенням неприпустимих зазорів та щілин	Деталі, що зварюються	Плавний

Коливання напруги мережі живлення можуть призводити внаслідок практично жорсткої статичної вольтамперної характеристики тліючого розряду до значних відхилень розрядного струму i , відповідно, потужності розряду, що спричиняє нестабільність теплового стану деталей у зоні з'єднання з можливою появою відповідних дефектів.

Зміна опору зварювального кола, викликана як зовнішніми (зміна провідності регулюючих пристроїв – тиристорів, транзисторів, опору зовнішнього баластного резистора), так і внутрішніми (зміна провідності розрядної плазми, зміна емісійних властивостей поверхні деталей у зоні катодної плями) факторами, призводить до зміни струму розряду і його повної потужності, яка прикладається до виробу, що нагрівається.

Збурення за тиском газу викликані як недостатньою герметизацією камери, так і його розігрівом у процесі зварювання або паяння, що приводить до його розширення та підвищення середнього тиску в об'ємі камери. Зміна тиску газу в камері впливає на питому потужність розряду і здатна призводити до порушення теплового стану деталей і стійкості самого розряду.

Порушенню необхідного теплового стану зварюваних деталей сприяють також неправильні форма або встановлення електродів розряду (рис. 3) відносно один одного, або зміна міжелектродної відстані в процесі нагріву внаслідок термічної деформації електродного вузла, що може приводити до локальних флуктуацій струму на ділянках найменшої протяжності позитивного стовпа, які викликають місцевий перегрів та оплавлення поверхні деталей.

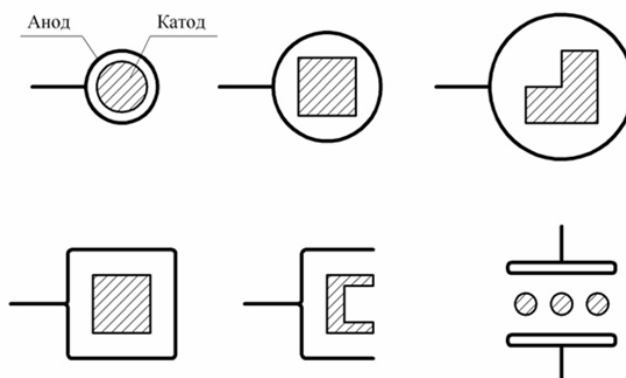


Рис. 3. Різновиди форм анодів тліючого розряду залежно від форми перерізу зварюваних деталей

Недостатньо чисті захисні гази, що мають підвищений вміст кисню або водяної пари, сприяють утворенню при підвищених температурах на поверхні катода ділянок, вкритих окислами, внаслідок чого змінюються емісійні властивості поверхні, що порушують розподіл густини струму в катодній плямі і сприяють локальному перегріванню поверхні деталей. До аналогічного результату може призводити також недостатньо якісна механічна і хімічна обробка поверхонь зварюваних заготовок у зоні розташування катодної плями розряду, яка сприяє спотворенню електричного поля на вершинах мік-

ронерівностей, а також появи емісійної плямистості поверхні деталей, що приводять до утворення окремих короточасних дугових розрядів на ділянках із зниженою роботою виходу електронів або підвищеною напруженістю електричного поля (вершини шорсткостей, жирові і масляні забруднення та ін.).

Як вже зазначалося, у зоні дії тліючого розряду неприпустима наявність на поверхні деталей щілин і зазорів певних розмірів, у які може проникати катодна пляма розряду, оскільки це може приводити до формування розряду у порожнистому катоді з підвищеною густиною струму, здатною перегрівати та оплавляти деталі (рис. 4). Для усунення розряду в порожнистому катоді, який достатньо легко може переходити у дуговий, необхідно, щоб у зоні нагріву були відсутні щілини, зазори й отвори, що мають розміри $4d_k > a > d_k$, де d_k – протяжність області катодного падіння потенціалу тліючого розряду для цього тиску газу (рис. 5) [1].

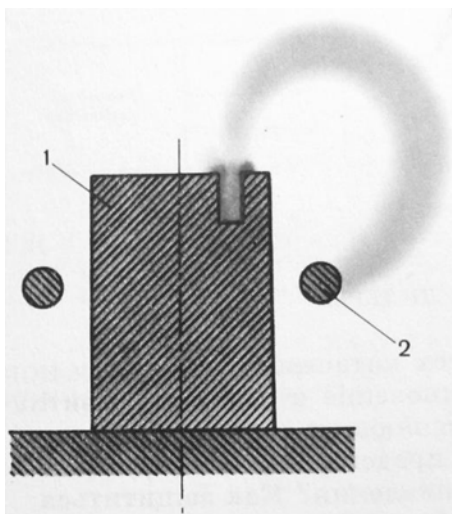


Рис. 4. Схема встановлення дугового розряду в порожнині на катоді: 1 – катод; 2 – анод

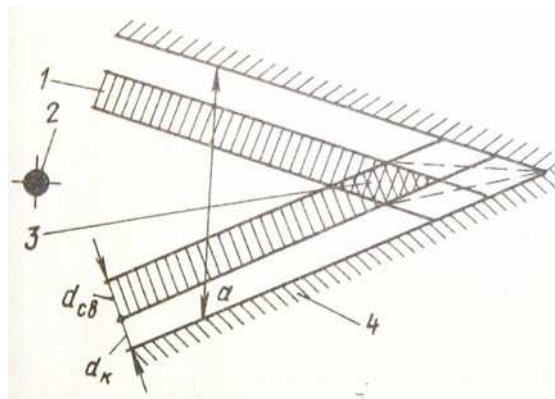


Рис. 5. Схема утворення ефекту порожнистого катода у клиновій щілині: 1 – тліюче світіння; 2 – анод; 3 – зона злиття тліючих світінь; 4 – катод

Відсутність таких зазорів у вихідній конструкції деталей, що сполучаються, і після їх складання перед зварюванням ще не є гарантією їх відсутності надалі. Вони можуть з'явитися у процесі нагріву й одночасного стиснення деталей. Основна причина полягає в порушенні співвісності дії зусилля, що стискає деталі, й геометричної осі останніх, що призводить у результаті до спотворення первісної форми деталей. Це може бути викликано неякісним складанням вузла у пристосуванні перед зварюванням. Друга причина пов'язана з недосконалістю конструкції зварного вузла, що сприяє зміні форми деталей під час нагрівання в результаті термодформаційних процесів.

Енергетичні збурення 1.1-1.3 призводять до коливань величини зварювального струму і тому можуть бути відносно легко виявлені й виміряні за допомогою відповідних вимірювальних пристроїв. Технологічні збурення контролю і виміру в процесі нагріву практично не піддаються. Однак характерним для цих збурень є те, що вони приводять до локальної концентрації густини струму в катодній плямі, що сприяє порушенню стійкості тліючого розряду і переходу його в дуговий з відповідними змінами струму і напруги в розрядному колі.

Висновки

1. Процес нагріву тліючим розрядом під час зварювання, як об'єкт керування, може бути представлений і проаналізований як результат функціонування замкненої двохконтурної електротермічної системи, в якій основними керуючими діями, що визначають термічні характеристики процесу, є напруга джерела живлення та струм розряду, що

задається нею, а також тиск газу в робочій камері. Струм розряду визначає повну потужність, що виділяється в розрядному проміжку, а тиск газу – питомі енергетичні характеристики розряду.

2. Збурення, що впливають на процес іонного нагріву, мають різну фізичну природу, інтенсивність, періодичність та тривалість дії, однак, усі вони призводять до порушення заданого теплового стану зони з'єднання деталей і тому їх вплив повинен бути скомпенсований або мінімізований.

Список використаних джерел

1. Котельников Д. И. Сварка давлением в тлеющем разряде / Д. И. Котельников. – М. : Металлургия, 1981. – 116 с.
2. Львов Н. С. Автоматика и автоматизация сварочных процессов / Н. С. Львов, Э. А. Гладков. – М. : Машиностроение, 1982. – 302 с.
3. Болотов Г. П. Тлеющий разряд как источник нагрева в процессах сварки и пайки / Г. П. Болотов // Автоматическая сварка. – 2001. – № 8. – С. 41-44.

УДК 621.924.1/6

Л.И. Маркашова, д-р техн. наук

Т.А. Алексеенко, мл. науч. сотруд.

С.Л. Жданов, канд. техн. наук

Институт электросварки им. Е.О. Патона Национальной академии наук Украины, г. Киев, Украина

Т.В. Ганеева, ассистент

Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО СТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА УЧАСТКА ПЕРЕГРЕВА ЗТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

Проведенные исследования показали, что ЗТВ сварных соединений высокопрочной стали 17Х2М, выполненных сварочной проволокой Св-10ХН2ГСМФТЮ со скоростью охлаждения $W_{6/5} = 20^\circ\text{C}/\text{с}$, обладает оптимальным сочетанием свойств прочности и трещиностойкости как после сварки, так и в условиях воздействия внешнего нагружения. Это обеспечивается формированием в участке перегрева максимального количества структур бейнита нижнего, а также мартенсита отпуска.

Ключевые слова: дуговая сварка, микроструктура, высокопрочные стали, статическое нагружение.

Проведені дослідження показали, що ЗТВ зварних з'єднань високоміцної сталі 17Х2М, виконаних зварювальним дротом Св-10ХН2ГСМФТЮ зі швидкістю охолодження $W_{6/5} = 20^\circ\text{C}/\text{с}$, має оптимальне поєднання властивостей міцності та тріщиностійкості як після зварювання, так і в умовах впливу зовнішнього навантаження. Це забезпечується формуванням у ділянці перегріву максимальної кількості структур бейніту нижнього, а також мартенсита відпуску.

Ключові слова: дугове зварювання, микроструктура, високоміцні сталі, статичне навантаження.

The research showed that the HAZ of welded joints made of high-strength steel 17X2M welding wire Св-10ХН2ГСМФТЮ cooling rate $W_{6/5} = 20^\circ\text{C}/\text{s}$, has the best combination of strength and fracture toughness properties, as-welded and in the conditions of an external load. This is ensured by the formation of hot spots in the maximum number of structures of the lower bainite and martensite vacation.

Key words: arc welding, microstructure, high-strength steel, static loading.

Постановка проблеми. Сварные соединения из высокопрочных сталей должны обеспечивать высокий уровень прочности и трещиностойкости, что во многом определяется структурно-фазовым составом в зоне термического влияния.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время для изготовления ответственных тяжело нагруженных конструкций широко применяются высокопрочные стали с пределом текучести более 590 МПа. Основные проблемы при сварке таких сталей связаны с необходимостью обеспечения требуемого уровня прочностных свойств и высокой сопротивляемости хрупкому разрушению в процессе дальнейшей эксплуатации [1; 2]. Анализ литературных данных показывает, что свойства высокопрочных сталей в значительной степени зависят от структурно-фазового состава металла ЗТВ [3; 4].