

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2025-1(39)-9-21

УДК 621.791.11

**Геннадій Павлович Болотов¹, Максим Геннадійович Болотов²,
Владислав Володимирович Гречка³, Максим Олегович Ососок⁴**

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

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

³аспірант кафедри технологій зварювання та будівництва,
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: deadsilence166@gmail.com

⁴здобувач вищої освіти, кафедри технологій зварювання та будівництва,
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: ososokmaksim@gmail.com

КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ УСТАНОВОК ДЛЯ ДИФУЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ

Розглянуто технічні та технологічні особливості тліючого розряду як перспективного високотехнологічного та економічного джерела енергії для процесів дифузійного зварювання, що отримують даним часом значного поширення. Розглянута будова установок дифузійного зварювання у тліючому розряді. Наведено основні складові механічного та енергетичного комплексів установок. Сформульовано основні технічні вимоги до окремих вузлів установок та наведені практичні приклади їх виконання, що допоможе фахівцям у проектуванні та виготовленні відповідного обладнання.

Ключові слова: дифузійне зварювання; тліючий розряд; установки тліючого розряду; газорозрядна плазма.

Рис.: 8. Табл.: 1. Бібл.: 32.

Постановка проблеми. Для отримання прецизійних з'єднань з різномірних матеріалів у промисловості здебільшого застосовують дифузійне зварювання, яке здійснюється тиском у твердому стані при температурах нижче температури плавлення з'єднуваних матеріалів [1-3]. Відсутність розплавлення дозволяє подолати бар'єр металургійної несумісності для багатьох металевих композицій і забезпечити їх зварювання. Відносно невисокі значення температур нагріву та зусиль стискання деталей не призводять до їх деформації та зміни властивостей металу в зоні з'єднання, що підвищує якість і термін експлуатації зварних вузлів [4; 5].

Особливості технологічного процесу дифузійного зварювання визначають і особливості конструкції установок, за допомогою яких здійснюється цей процес.

Зварювальні дифузійні установки зазвичай складаються з таких основних вузлів:

- вакуумна система для отримання вакууму в камері, де здійснюється зварювання;
- система створення тиску на зварювані деталі;
- джерело енергії для нагріву зварюваних деталей;
- нагрівальний елемент (вузол).

На практиці конструкція установок може відрізнятися відповідно до їх призначення (універсальні чи спеціалізовані) та способу нагріву деталей, що зварюються [6-13]. У наш час у дифузійному зварюванні знайшли застосування індукційний (високочастотний), радіаційний нагрів та нагрів у низькотемпературній плазмі тліючого розряду [14-16]. Перші

два способи в силу своїх технологічних особливостей потребують для здійснення зварювання глибокого вакууму (порядку $10^{-2} \dots 10^{-4}$ Па) і, відповідно, наявності у складі установок конструктивно складних і вартісних систем вакуумування [17].

Розроблений пізніше спосіб дифузійного зварювання у тліючому розряді виявився суттєво більш технологічним та економічним, оскільки перетворення електричної енергії в теплову в цьому випадку здійснюється безпосередньо на поверхні деталей, що зварюються, тобто реалізується прямий нагрів із високою термічною ефективністю [18].

Зварювання у тліючому розряді здійснюється в розрідженому газовому середовищі при тиску захисного газу в робочій камері $0,01 \dots 15$ кПа, що дозволяє суттєво спростити конструкцію вакуумної системи і установки загалом.

Наведені особливості зварювання в тліючому розряді дозволили, у порівнянні, зокрема, з індукційним нагрівом, знизити витрати електроенергії у $6 \dots 8$ разів, а вартість устаткування – у $4 \dots 5$ разів [19].

Як уже зазначалось, дифузійне зварювання, внаслідок своїх особливостей, ефективно застосовується для отримання прецизійних з'єднань з різнорідних матеріалів у відповідальних виробках багатьох галузей промисловості. Номенклатура таких виробів надзвичайно широка, а обсяг їх виробництва коливається від одиничного до серійного [20; 21]. Тому нині устаткування для дифузійного зварювання промисловістю серійно не випускається. Окремі галузі, а у багатьох випадках і окремі підприємства та наукові організації створюють обладнання для дифузійного зварювання, виходячи з власних задач і максимально застосовуючи при цьому існуючі технічні рішення. Зокрема, для будови установок для дифузійного зварювання з індукційним та радіаційним нагрівом, які потребують глибокого вакууму, за основу приймають вакуумні пости установок вакуумного наплення (УВН) та розпилення (УРМ) матеріалів. Як джерело енергії застосовують стандартні генератори високої частоти та силові понижуючі трансформатори необхідної потужності. Самостійній розробці підлягає переважно внутрішньокамерне обладнання, яке визначається характеристиками зварюваних деталей та способом їх нагріву.

Аналогічно і при проектуванні установок для дифузійного зварювання у тліючому розряді перед розробниками постає задача вибору оптимальних конструкторських рішень, які б максимально мірою задовольняли потребам виробництва. Однак у такому випадку ця задача суттєво ускладнюється, оскільки значна кількість елементів установки, передусім тих, що стосуються джерела живлення тліючого розряду, є нестандартними і підлягають самостійній розробці.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питанням створення та вдосконалення обладнання для дифузійного зварювання, як доволі складного та прецизійного, приділяється значна увага з моменту його розробки. У роботах [13; 15] сформульовані основні принципи побудови зварювальних установок із індукційним та радіаційним способами нагріву. У роботах [22; 23] наведено конструктивні схеми та методики розрахунку основних елементів енергетичної системи установок.

У роботі [24] охарактеризовані результати досліджень технологічних властивостей тліючого розряду в умовах зварювання та сформульовані основні підходи та технічні умови до створення відповідного устаткування. Основна увага у більшості публікацій, що розглядають питання технічної реалізації способу зварювання у тліючому розряді, також приділяється вдосконаленню енергетичного комплексу обладнання, насамперед джерела живлення розряду, способам його регулювання та забезпечення стабільного горіння.

У роботі [25] запропонована оригінальна схема трансформатора системи живлення тліючого розряду, який надає на виході форму кривої напруги, що забезпечує стабільне запалювання розряду на початку кожного напівперіода та підтримує його стабільне горіння протягом напівперіода. Однак, складність конструкції магнітної системи трансформатора, особливо в умовах їх одиничного виготовлення, робить їх застосування нерентабельним.

Особливістю застосування тліючого розряду як джерела нагріву для дифузійного зварювання, в умовах підвищених тисків газу та значних струмів, є імовірність появи нестабільності його горіння, що проявляється у вигляді короткочасних або тривалих переходів тліючого розряду в електричну дугу, яка може призводити до оплавлення зварюваних деталей. У роботах [26; 27] розглянуто основні флуктуаційні процеси в розряді, що сприяють утворенню таких нестабільностей. У роботі [28] показано, що для підвищення стабільності тліючого розряду у його зовнішнє коло необхідно вмикати баластний опір. Без такого опору тліючий розряд завжди нестійкий і достатньо легко переходить у дуговий. Із збільшенням величини такого опору стабільність тліючого розряду зростає, однак, надмірне його підвищення призводить до зниження енергетичної ефективності нагріву внаслідок зростання втрат на цьому опорі. У роботі [29] наведена методика визначення величини такого зовнішнього баластного опору, що вмикається у коло живлення тліючого розряду. Показано, що оптимальна величина цього опору складає 0,5...0,8 від величини опору самого розряду.

Виділення нерозкритих частин загальної проблеми. Якщо до проектування та будови установок для дифузійного зварювання з індукційним та радіаційним нагрівом вже визначені концептуальні підходи, розроблені технічні та технологічні рішення, то щодо устаткування із застосуванням тліючого розряду, як відносно нового способу зварювання, такі рекомендації на даний час в достатній мірі ще не сформовані і є розрізненими. Тому розробникам устаткування доводиться часто діяти методом спроб і помилок, що ускладнює процес створення установки і підвищує її вартість.

Мета роботи. Метою роботи є аналіз фізико-технічних характеристик тліючого розряду як джерела енергії для процесів дифузійного зварювання і визначення основних конструктивних підходів до практичної реалізації цих процесів.

Виклад основного матеріалу. У технологічних процесах застосовують тліючий розряд, що горить у розрідженому газовому середовищі при тисках газу нижче за атмосферний між двома електродами, роль одного з яких – катода, виконують самі зварювані деталі. При цьому в діапазоні тисків 10...1000 Па позитивні іони робочого газу внаслідок їх обмеженої кількості можуть набувати великої швидкості і бомбардувати поверхню катода зі значною енергією, видаляючи з неї забруднення та оксидні плівки, що є необхідною умовою для процесів зварювання тиском. При тисках газу вище 3...4 кПа енергія іонів знижується, однак унаслідок значної їх кількості зростає колективний ефект бомбардування ними складної вакуумної арматури поверхні виробу, що призводить до його значного нагріву й реалізації процесу зварювання.

З наведених вище технологічних режимів видно, що установки для зварювання в тліючому розряді можуть будуватись за суттєво спрощеною схемою, без застосування складної вакуумної арматури та високовакуумних насосів, застосовуючи лише насоси попереднього розрідження (форвакуумні насоси), які забезпечують вакуум до 10^{-1} Па у робочому об'ємі. При цьому металеві вакуумпроводи можуть бути замінені шланговими, виконаними із вакуумної гуми із внутрішнім каналом діаметром 12...15 мм. Це дає змогу розташовувати форвакуумний насос не тільки у корпусі установки, а й у будь-якому зручному місці за її межами. У якості вакуумних насосів доцільно застосовувати компактні двохступеневі пластинчасто-роторні насоси серії НВР (НВР-5Д, НВР-5ДМ та ін.), які забезпечують більш високу продуктивність, ніж пластинчасто-статорні та золотникові насоси, і мають значно менший рівень шуму, ніж двохроторні насоси Рутса.

Система стискання деталей установок тліючого розряду принципово не відрізняється від аналогічних систем установок з індукційним та радіаційним нагрівом. Тип системи стискання обирається в залежності від площі зварного контакту деталей і, відповідно, необхідного зусилля стискання. При зусиллях до 1 кН доцільно обирати просту механічну (важільну) або електромеханічну систему, до 10 кН – електромеханічну систему із приводом постійного струму, яка забезпечує плавне прикладання навантаження, а при зусиллях вище 10 кН – гідравлічну систему, оскільки габарити електромеханічної системи в цих умовах суттєво зростають.

Більш помітно на будову установок дифузійного зварювання впливає спосіб нагріву, який визначає конструкцію внутрішньокамерного нагрівального пристрою, джерела його живлення та засобів керування процесом нагріву. Зокрема, при застосуванні в установках у якості джерела енергії високочастотних лампових генераторів або силових трансформаторів регулювання режиму нагріву здійснюється за допомогою одного параметру – анодного струму ламп генератора або напруги холостого ходу трансформатора, яким задається тільки повна потужність нагріву. Це суттєво обмежує їх технологічні властивості.

Тліючий розряд, як джерело нагріву навпаки є багатофакторним об'єктом регулювання. Основними параметрами нагріву тліючим розрядом (іонного нагріву) є струм розряду, напруга на електродах, міжелектродна відстань та тиск газу в робочій камері. Такий широкий спектр керуючих дій дозволяє задавати не тільки повну, а й питому потужність нагріву, корегувати форму і площу зони нагріву та розподіл енергії в ній. Це суттєво розширює технологічні можливості тліючого розряду, до яких можна віднести [30]:

- 1) можливість роздільно регулювати струм і напругу на розряді, тобто окремо змінювати як кількість електричних зарядів, що бомбардують катод, так і їхню енергію.
- 2) можливість при низьких струмах і високій напрузі на розряді здійснювати попереднє іонне очищення зварюваних поверхонь деталей, а при значних струмах і понижений напрузі здійснювати їх ефективний нагрів.
- 3) можливість плавного регулювання площі зони нагріву (катодної плями розряду S_n) та густини енергії (q_n) у ній зміною величини струму розряду (I_p) та тиску газу (P) у робочій камері. Ця можливість проілюстрована на рис.1.

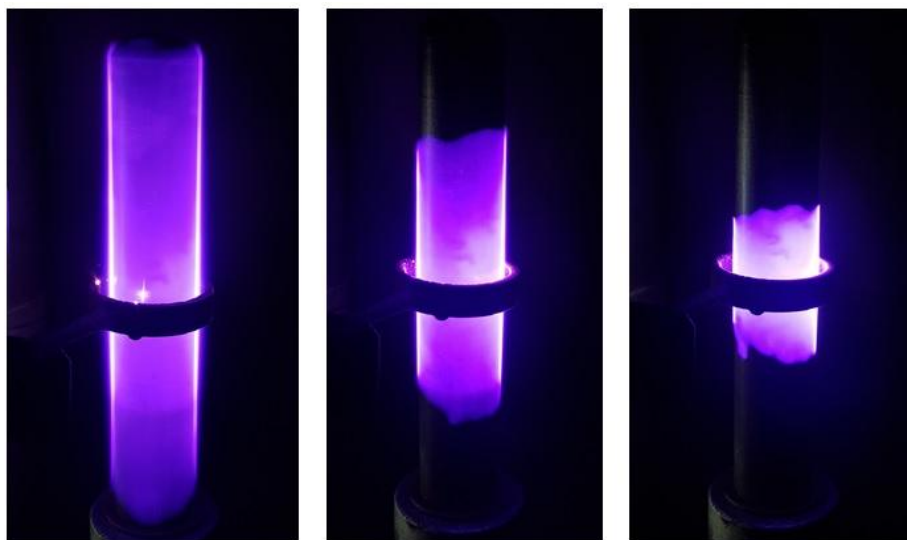


Рис. 1. Характер розподілу плями нагріву циліндричного катода (30×160 мм) нормальним тліючим розрядом зі збільшенням розрядного струму та тиску газу в робочій камері [27]

4) можливість регулювання в широких межах напруги на розряді як зміною тиску газу у робочому об'ємі, так і зміною величини міжелектродного проміжку. На рис. 2 наведений орієнтовний діапазон цих регулювань для основних газів, що застосовуються при дифузійному зварюванні.

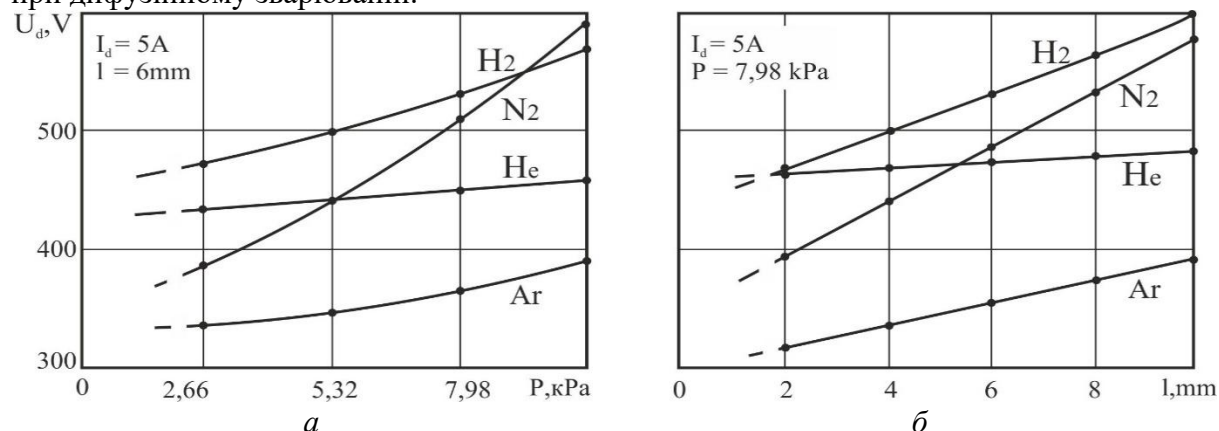


Рис. 2. Залежність напруги на тліючому розряді від тиску газу (а) та її прирощення при зміні міжелектродного проміжку (б) для ряду газів [28]

5) можливість регулювання процесу нагріву зміною величини і форми міжелектродного проміжку. Густина струму на катоді тліючого розряду має нормальну форму розподілу. Максимум її знаходиться в точках, найбільш близьких до анода. Тому анод повинен розташовуватись еквідистантно відносно поверхні нагріву, якщо міжелектродна відстань набагато менша, ніж характерний розмір зварюваного перерізу (рис. 3, а).

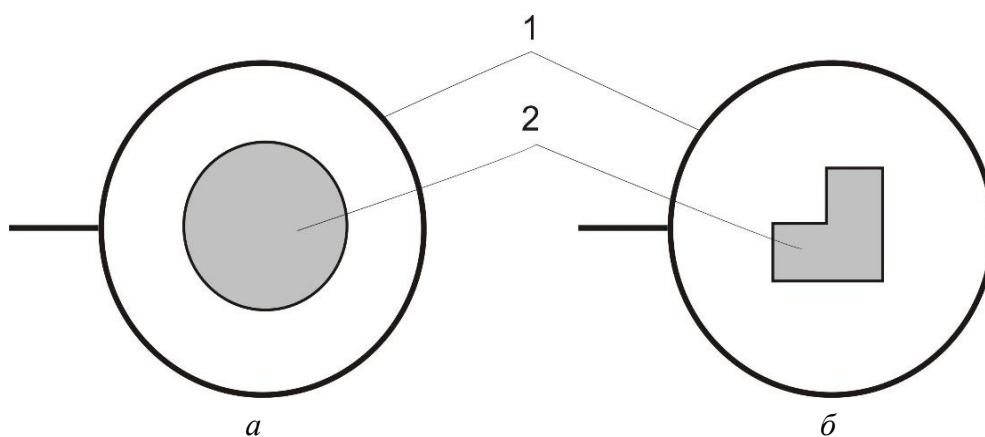


Рис. 3. Схеми нагріву деталей:
а – циліндричного перерізу; б – складного перерізу

Змінюючи форму анода можливо регулювати характер прогріву всього перерізу деталей, запобігаючи перегріву кутів та виступів. У тих випадках, коли міжелектродна відстань порівняна з розмірами перерізу деталей, залежність між формою анода і катода зменшується або зникає зовсім. Тоді можливо застосовувати аноди простої форми для нагріву тліючим розрядом складних перерізів (рис. 3, б). Така взаємозалежність форм анода та катода є важливою технологічною властивістю тліючого розряду, що забезпечує його адаптивність в умовах широкої номенклатури виробництва.

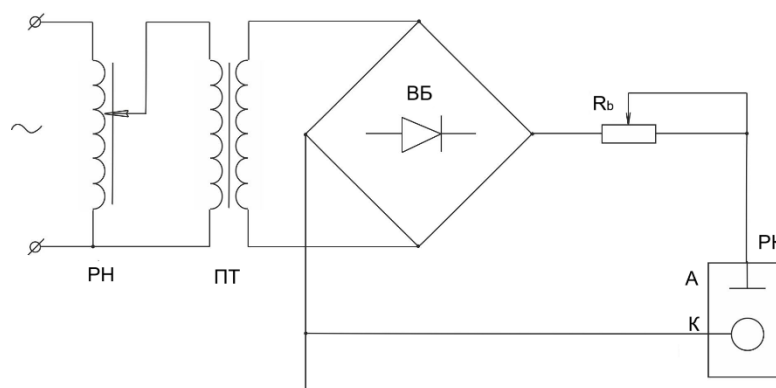


Рис. 4. Принципова електрична схема енергетичної системи установки зварювання у тліючому розряді: РН – регулятор напруги; ПТ – підвищувальний трансформатор; ВБ – блок випрямлення змінного струму; R_b – баластний реостат (регулятор струму); ПК – розрядна камера; А – анод; К – катод (зварювані деталі) [25]

Для забезпечення перелічених технологічних можливостей енергетичний комплекс установок дифузійного зварювання в тліючому розряді, схема якого наведена на рис. 4, повинен включати:

– **регулятор напруги** РН, який вмикається, як правило, на вході схеми у первинній обмотці підвищувального трансформатора і повинен забезпечувати плавне регулювання. Найбільш ефективним типом такого регулятора слід вважати автотрансформатор, який забезпечує неперервне амплітудне регулювання без зміни форми синусоїди вхідної напруги. Сучасні тиристорні регулятори напруги, побудовані за принципом фазо-імпульсного регулювання, мають значно менші габарити і вагу, однак суттєво спотворюють форму вхідної напруги, призводячи до появи у електричному колі небажаних гармонік, які негативно впливають на роботу підвищувального трансформатора.

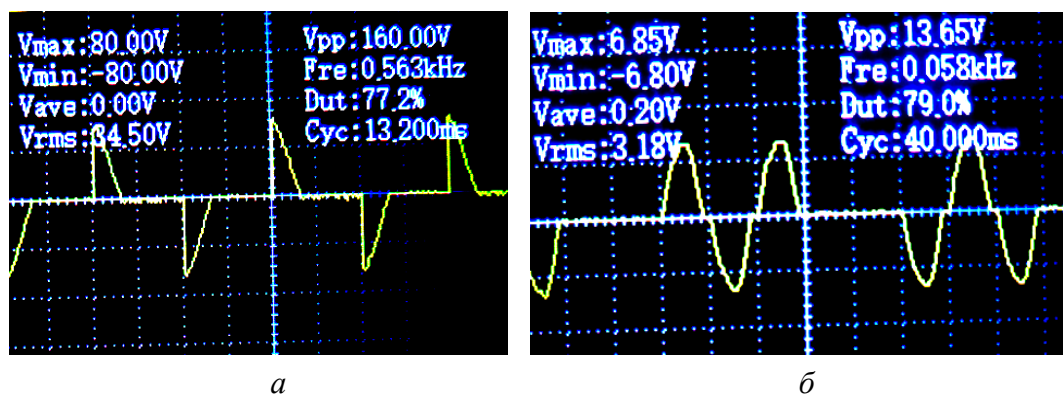


Рис. 5. Осцилограми регулювання напруги на вході джерела живлення тліючого розряду фазо-імпульсним (а) та число-імпульсним (б) тиристорними регуляторами

Тиристорні регулятори із число-імпульсним принципом регулювання не мають такого недоліку, однак, при їх застосуванні на малій потужності у електричному колі живлення розряду з'являються значні за тривалістю паузи струму (рис. 5), що призводить до нестабільності горіння тліючого розряду із можливістю його згасання.

Одним з можливих варіантів регулятора напруги для установок тліючого розряду можна вважати вмикання фазо-імпульсного регулятора у коло вторинної обмотки підвищувального трансформатора. Однак, у даному випадку необхідно застосовувати у регуляторі тиристори не нижче 14...16-го класів за напругою.

– *підвищувальний трансформатор* може виконуватись як на броньовому, так і на стержньовому типах магнітопроводу, і повинен забезпечувати на виході напругу холостого ходу 800...1000 В. Для зменшення втрат і підвищення коефіцієнта потужності вторинну обмотку трансформатора доцільно розташовувати безпосередньо поверх первинної із мінімальним повітряним зазором.

– *регулятор струму*, у якості якого використовують баластний реостат, який водночас виконує роль стабілізуючого зовнішнього опору, величина якого змінюється ступінчасто в межах 30...100 Ом. Відповідно, ступінчасто змінюються струм і потужність розряду.

– *анод*, положення якого відносно зварного виробу (катода) впливає на напругу на розряді та його потужність. Для простих за формою виробів можуть застосовуватись монолітні контурні аноди (рис. 6), виготовлені із сталевого дроту, або сталевий чи молибденовий стрічки, які розташовують еквідистантно поверхні виробу на відстані 0,005...0,015 м. Для більш складних форм виробів рівномірність нагріву по периметру зварного контакту може бути досягнута збільшенням відстані між анодом і виробом. Однак у цьому випадку слід враховувати, що надмірне збільшення міжелектродної відстані (на практиці більше 0,025...0,03 м) призводить до зниження ефективності нагріву виробу внаслідок одночасного нагріву значних об'ємів навколишнього газу. Для виробів складної форми ефективним є застосування секціонованих анодів (рис. 6, б), окремі секції яких виконуються рухомими і можуть встановлюватись еквідистантно поверхні виробу на оптимальній відстані. Кількість секцій може визначатись особливостями форми виробу. Окремі секції аноду через баластні опори величиною 50...150 Ом з'єднуються із позитивним виводом блоку спрямлення струму.



а



б

Рис. 6. Форми анодів тліючого розряду:

а – монолітні; б – секціоновані

– *електропневмоклапани або вентилі* (при ручному регулюванні) забезпечують вмикання подачі газу або його відкачування з робочої камери. Зміна величини тиску газу впливає на густину струму у зоні нагріву і, відповідно, на термічний цикл зварювання.

– *контрольно-вимірювальна апаратура* забезпечує контроль та реєстрацію основних параметрів процесу зварювання. Електричні параметри тліючого розряду вимірюються відповідними стандартними вимірювальними приладами. Значна увага повинна приділятися контролю головного параметру дифузійного зварювання – температури в зоні контакту зварюваних деталей, що у визначальній мірі забезпечує якість зварного з'єднання.

У дифузійному зварюванні, в основному, застосовують контактний метод контролю температурного стану в зоні з'єднання за допомогою термоелектричних перетворювачів (термопар), які закріплюються на боковій поверхні зварюваних деталей із надійним контактом між ними. Однак, при зварюванні у тліючому розряді цей метод може застосовуватись

обмежено, Викликано це тим, що робочий спай термопари розташовується в безпосередній близькості від зони контакту деталей, де у тліючому розряді спостерігається найвища густина струму і, відповідно, найбільша густина теплової енергії, що може призводити до перегрівання і оплавлення тонких дрітів термопари. Крім того, термопара локально порушує рельєф поверхні виробу, що призводить до викривлення ліній електростатичного поля у цій зоні і сприяє виникненню електричної дуги, яка спалює термопару.

Більш ефективним при зварюванні у тліючому розряді є застосування безконтактних методів контролю температури за допомогою оптичних або фотоелектричних пірометрів, які забезпечують реєстрацію електромагнітного випромінювання у інфрачервоному та оптичному діапазоні спектру. Однак, слід мати на увазі, що оптичні пірометри (зокрема, типів ОППР-09, ОППР-017) забезпечують вимірювання температури не нижче 1073 К, що обмежує їх використання при зварюванні багатьох металів та сплавів (алюміній, мідь, латунь та ін.). Найбільш доцільним методом контролю температур при зварюванні у тліючому розряді є застосування фотоелектричних мікропірометрів (наприклад, типу ФЕП-4), які мають широкий діапазон вимірювань – від 573 до 2473 К і забезпечують високу точність вимірювання на відстані до 1 м на досить обмеженій площі поверхні виробу.

Контроль пірометрами здійснюється через вікна у вакуумній камері. При цьому слід враховувати імовірність їх забруднення в процесі роботи, зокрема в результаті катодного розпилення, та погіршення їх прозорості, що може привести до похибки вимірювання. Це вимагає очищення скла вікон після кожного циклу зварювання та періодичної їх заміни.

З урахуванням перелічених вузлів загальна схема установки дифузійного зварювання у тліючому розряді, що включає як механічний, так і енергетичний комплекси, має вигляд, наведений на рис. 7.

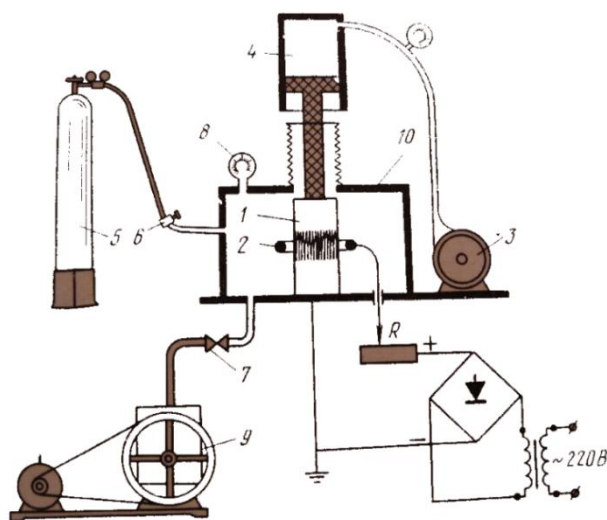


Рис. 7. Схема установки для дифузійного зварювання у тліючому розряді:
1 – зварювані деталі; 2 – анод; 3 – гідронасос; 4 – гідроциліндр системи стискання деталей; 5 – балон із робочим газом; 6, 7 – вентилі; 8 – вакууметр;
9 – вакуумний насос; 10 – вакуумна камера [16]

Практичні схеми установок можуть доповнюватись окремою малопотужною системою іонного очищення зварюваних поверхонь деталей, електрична схема якої аналогічна схемі, наведеній на рис. 4, а також, системами стабілізації горіння тліючого розряду та запобігання виникнення у ньому електричних дуг [31], які можуть призвести до руйнування деталей.

У таблиці нижче наведені межі зміни основних параметрів, що характеризують процеси дифузійного зварювання в тліючому розряді, досягнуті на існуючому обладнанні.

Таблиця 1 – Основні параметри дифузійного зварювання в тліючому розряді

№ п/п	Параметр і його розмірність	Межі регулювання параметра
1	Сила струму, А	$10^{-3} \dots 10^2$
2	Напруга на аноді, В	0 ... 1000
3	Тиск газу в робочій камері, кПа	$10^{-2} \dots 10^2$
4	Питоме зусилля стиснення деталей, МПа	0 ... 100
5	Максимальна температура нагріву деталей, К	1500...2000
6	Густина струму на катоді, А/см ²	$10^{-3} \dots 1$
7	Міжелектродна відстань, м	0,005...0,05

На рис. 8 представлені деякі з діючих на даний час установок для дифузійного зварювання у тліючому розряді, що застосовуються в різних галузях промисловості.

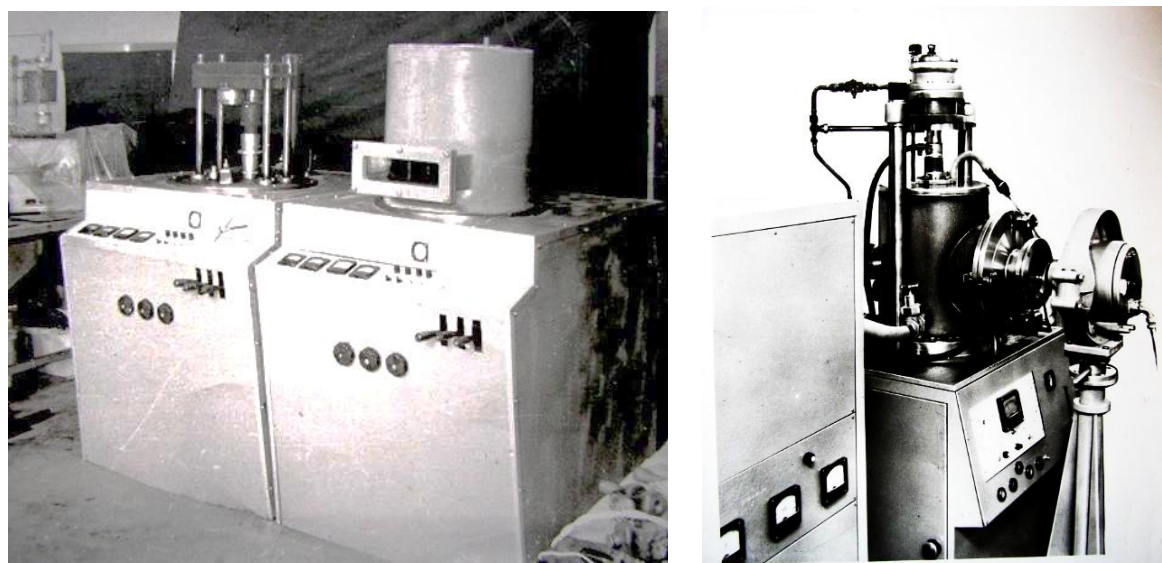


Рис. 8. Зовнішній вигляд установок для дифузійного зварювання у тліючому розряді:
 а – установка ІОН-30 для зварювання магнітострикційних перетворювачів;
 б – установка ІОН-8 для зварювання твердосплавних штампів, оснащена фотоелектричним пірометром [32]

Висновки. На підставі аналізу фізико-технічних характеристик та технологічних особливостей тліючого розряду як ефективного і перспективного джерела енергії для дифузійного зварювання, визначені основні складові установок для реалізації цього способу, сформульовані технічні вимоги до елементів устаткування та наведені практичні рекомендації по їх вибору та проектуванню.

Список використаних джерел

1. Казаков, Н. (1981). *Диффузионная сварка материалов* (Н. Казаков, Ред.). Машиностроение.
2. John, B., Letsch, H., Wölck, J., Hess, M., & Hensel, J. (2023). Process technology for diffusion welding with cyclically pulsative joining forces. *Metals*, 13(3), 547. <https://doi.org/10.3390/met13030547>.
3. Kolukisa, S. (2007). The effect of the welding temperature on the weldability in diffusion welding of martensitic (AISI 420) stainless steel with ductile (spheroidal graphite-nodular) cast iron. *Journal of Materials Processing Technology*, 186(1-3), 33–36. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.148>.
4. Yuan, X. J., Sheng, G. M., Qin, B., Huang, W. Z., & Zhou, B. (2008). Impulse pressuring diffusion bonding of titanium alloy to stainless steel. *Materials Characterization*, 59(7), 930–936. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2007.08.003>.
5. Yang, Y., Liu, X., & Wang, S. (2020). Thermal characteristics of induction heating with stepped diameter mold during two-phase zone continuous casting high-strength aluminum alloys. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 152, 119479. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119479>.

6. Бачина, В. (1991). *Теория, технология и оборудование диффузионной сварки* (В. Бачина, Ред.). Машиностроение.
7. Lin Shuyi, Li Hui. (1996). Manufacture process and equipment for welded stainless steel pipes. *Steel pipe*, 25(1), 4-5.
8. Bao Tailai, Zhu Xin, & Wang Xinju. (1995). Automatic measuring/control of technological data for hi-frequency welding process. *Steel pipe*, 24(6), 46-51.
9. Ravi, B., Kumar, G. Raja, Rambabu K. & Narendar, D. Dec. (2021) Optimization of a Diffusion Welding System Using the TRIZ Methodology. *Indo-American Journal of Mechanical Engineering*, 10(4), 120-124. <https://iajme.com/index.php/iajme/article/view/55>.
10. Avagyan, V. S., Tounyan, I. V., & Erevanskij Fizicheskij Inst., Erevan (Armenia). (1992). Vacuum set-up overall size for diffusion welding and soldering of copper pieces.
11. Розанов, Д. (1982). *Вакуумная техника*. Высшая школа.
12. Каменев, В. (1987). Состояние и перспективы развития систем откачки. У *Достижения и перспективы развития диффузионной сварки* (с. 76–77).
13. Авагян, В., & Антонов, В. (1990). Установка диффузионной сварки в вакууме. У *Достижения и перспективы развития диффузионной сварки* (с. 74–75). МДНТП.
14. Haufler, G., & Mayer, H. (1975). Set-up and operational experience with a new diffusion welding equipment. *Deutscher Verlag fuer Schweisstechnik*, (38), 101–105.
15. Слухоцкий, А. (1981). *Установки индукционного нагрева* (А. Слухоцкий, Ред.). Энергоиздат.
16. Котельников, Д. И. (1981). *Сварка давлением в тлеющем разряде*. Металлургия.
17. Уэймаус, Д. (1977). *Газоразрядные лампы*. Энергия.
18. Staack, D., Farouk, B., Gutsol, A., & Fridman, A. (2008). DC normal glow discharges in atmospheric pressure atomic and molecular gases. *Plasma Sources Science and Technology*, 17(2), 025013. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/17/2/025013>
19. Ecker, G., Kröll, W., & Zöller, O. (1964). Thermal instability of the plasma column. *Physics of Fluids*, 7(12), 2001. <https://doi.org/10.1063/1.1711110>.
20. Lavrishchev, A. V., Prokopen, S. V., Tynchenko, V. S., Myrugin, A. V., Kukartsev, V. V., Bashmur, K. A., Sergienko, R. B., Tynchenko, V. V., & Lysyannikov, A. V. (2021). Investigation of the solid-phase joint of VT-14 titanium alloy with 12KH18N10T stainless steel obtained by diffusion welding through intermediate layers. *Metals*, 11(8), 1325. <https://doi.org/10.3390/met11081325>.
21. Lyushinsky, A. V. (2009). Diffusion Welding of Tungsten, Molybdenum, Titanium and Copper to each other through Intermediate Layers. *Weld. Diagn*, 4, 42–44.
22. Данилов, В.В. (1999). Установка диффузионной термокомпрессионной сварки. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 5 (6), 28-30.
23. Азаматов, З.Т., Мамаджанов, Ф.Д., & Расулов, Х.Х. (1993). Устройство для диффузионной сварки пьезоэлектрических преобразователей акустических устройств. *ПТЭ*, 4, 213-218.
24. Болотов, М. Г. (2013). Дослідження локальних властивостей плазми тліючого розряду з порожнистим катодом стосовно до умов зварювального нагріву. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки.* – 1 (63), 112-119.
25. Bolotov, M. & Bolotov, G. (2019). Criterial definition of the limits of glow discharge energy stability in welding. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). <https://doi.org/10.1109/ukrcon.2019.8879992>.
26. Болотов, М. Г. (2018). Аналіз основних нестабільностей тліючого розряду середніх тисків в умовах обробки матеріалів. *Технічні науки та технології*, 2 (12), 103-115.
27. Болотов, М.Г., & Болотов, Г. П. (2021). Визначення меж енергетичної стабільності тліючого розряду в умовах зварювального нагріву. *Технічні науки та технології*, 1(19), 009–017. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-1\(19\)-9-17](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-1(19)-9-17).
28. Bolotov, G., Ryzhov, R., & Bolotov, M. (2018). Stabilization of high-current glow discharge by the active (ballast) resistor while the precision welding. *Mechanics and Advanced Technologies*, 83(2). <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2018.83.124415>.

29. Bolotov, H. P., Ryzhov, R. M., & Bolotov, M. H. (2019). Increasing of glow discharge stability in welding by means of multisectional electrode systems. *KPI Science News*, (2), 57–63. <https://doi.org/10.20535/kpi-sn.2019.2.167770>.

30. Недоспасов, А. В., Хайт, В. Д. (1979). *Колебания и неустойчивости низкотемпературной плазмы*. Наука.

31. Напартович, А. П., Наумов, В. Г., & Шашков, В. М. (1975). О распаде плазмы тлеющего разряда в постоянном электрическом поле. *Физика плазмы*, 1(5), 821–829.

32. Болотов, М. Г., Прибитько, І. О., & Нагорна, І. В. (2020). Тліючий розряд як джерело поверхневого нагріву в процесах з'єднання різнорідних матеріалів (огляд). *Технічні науки та технології*, (2(20)), 22–36. <http://tst.stu.cn.ua/article/view/215560/215683>.

References

1. Kazakov, N.F. (Ed.). (1981). *Dyffuzyonnaia svarka materyalov [Diffusion welding of materials]*. Mashynostroenye.

2. John, B., Letsch, H., Wölck, J., Hess, M., Hensel, J. (2023). Process Technology for Diffusion Welding with Cyclically Pulsative Joining Forces. *Metals*, 13, 547. <https://doi.org/10.3390/met13030547>.

3. Kolukisa, S. (2007). The effect of the welding temperature on the weldability in diffusion welding of martensitic (AISI 420) stainless steel with ductile (spheroidal graphite-nodular) cast iron. *J. Mater. Process. Technol.*, 186, 33–36.

4. Yuan, X.J., Sheng, G.M., Qin, B., Zhou, W.Z.H.B. (2008). Impulse pressuring diffusion bonding of titanium alloy to stainless steel. *Mater. Charact.*, 59, 930–936.

5. Yang, Y., Wang, X.L.S. (2020). Thermal characteristics of induction heating with stepped diameter mold during two-phase zone continuous casting high-strength aluminum alloys. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 152, 119479. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119479>.

6. Bachyn, V.A. (Ed.). (1991). *Teoriya, tekhnolohiya y oborudovanye dyffuzyonnoi svarky [Theory, technology and equipment of diffusion welding]*. Mashynostroenye.

7. Lin Shuyi, Li Hui. (1996). Manufacture process and equipmfmt for welded stainless steel pipes. *Steel pipe*, 25(1), 4-5.

8. Bao Tailai, Zhu Xin, Wang Xinju. (1995). Automatic measuring/control of technological data for hi-frequency welding process. *Steel pipe*, 24(6), 46-51.

9. Ravi, B., Kumar, G. Raja, Rambabu, K., and Narendar, D. (2021). Optimization of a Diffusion Welding System Using the TRIZ Methodology. *Ind-Am. J Mech. Eng.*, 10(4), 120–124.

10. Avagyan, V.S., Tounyany, I.V. (1992). Erevanskij Fizicheskij Inst., Erevan (Armenia), «Vacuum set-up overall size for diffusion welding and soldering of copper pieces».

11. Rozanov, D.N. (1982). *Vakuumnaia tekhnika [Vacuum technique]*. Vysshaya shkola.

12. Kamenev, V.N. (1987). Sostoianie y perspektivy razvitiia sistem otkachki. Tezisy dokladov [The state and prospects of the development of pumping systems. Thesis of reports]. *XII Vsesoiuznaia nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Dostyazheniya i perspektivy razvitiya dyffuzyonnoi svarky" – MDNTP – XII All-Union scientific and technical conference "Achievements in perspective of development of diffusion welding"* (pp. 76-77).

13. Avahian, V.Sh., Antonov, V.P. *Ustanovka dyffuzyonnoi svarky v vakuume [Installation of diffusion welding in a vacuum]*. XIII Vsesoiuznaia nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Dostyazheniya y perspektivy razvitiya dyffuzyonnoi svarky – MDNTP XII All-Union scientific and technical conference "Achievements in perspective of development of diffusion welding. (pp. 74-75).

14. Haufler, G., Mayer, H.G. (1975). Set-up and operational experience with a new diffusion welding equipment. *Deutscher Verlag fuer Schweisstechnik*, 38, 101-105.

15. Slukhotskyi, A.E. (Ed.). (1981). *Ustanovky induktsionnoho nahreva [Installations of induction heating]*. Energoizdat.

16. Kotelnikov, D.Y. (1981). *Svarka davleniim v tleiushchem razriade [Pressure welding in a glow discharge]*. Metallurgy.

17. Weimaus, D. (1977). *Hazorazriadnyie lampy [Gas discharge lamps]*. Energy.

- 18.David Staack et al. (2008). DC normal glow discharges in atmospheric pressure atomic and molecular gases. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 17. DOI 10.1088/0963-0252/17/2/025013.
- 19.Ecker, G., Kroll, W., Zoller, O. (1964). Thermal Instability of the plasma column. *Phys. Fluids.*, 7(12), 2001.
- 20.Lavrishchev, A.V., Prokopenko, S.V., Tynchenko, V.S., Myrugin, A.V., Kukartsev, V.V., Bashmur, K.A., Sergienko, R.B., Tynchenko, V.V., Lysyannikov, A.V. (2021). Investigation of the Solid-Phase Joint of VT-14 Titanium Alloy with 12KH18N10T Stainless Steel Obtained by Diffusion Welding through Intermediate Layers. *Metals*, 11, 1325. <https://doi.org/10.3390/met11081325>.
- 21.Lyushinsky, A.V. (2009). Diffusion Welding of Tungsten, Molybdenum, Titanium and Copper to each other through Intermediate Layers. *Weld. Diagn.*, 4, 42–44.
- 22.Danylov, V.V. (1999). Ustanovka dyffuzyonnoi termokompressyonnoi svarky [Installation of diffusion thermo-compression welding]. *Tekhnolohyia y konstruyrovanye v elektronnoi apparature – Technology and construction in electronic units*, 5(6), 28-30.
- 23.Azamatov, Z.T., Mamadzhanov, F.D., Rasulov, Kh.Kh. (1993). Ustroistvo dlia dyffuzyonnoi svarky pezoelektrycheskykh preobrazovatelei akusticheskikh ustroystv [Device for diffusion welding of piezoelectric transducers of acoustic devices]. *RTE*, (4), 213-218.
- 24.Bolotov, M.G. (2013). Doslidzhennia lokalnykh vlastyvostei plazmy tliuchoho rozriadu z porozhnystym katodom stosovno do umov zvaryvalnoho nahrivu [Investigation of local properties of hollow cathode glow discharge plasma in relation to welding heating conditions]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Journal of Chernihiv State Polytechnical University. Series: Technical Sciences*, (1(63)), 112-119.
- 25.Bolotov, M.G., Bolotov, G. P. (2019). Criterial Definition of the Limits of Glow Discharge Energy Stability in Welding. *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)* (pp. 497-501). doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879992.
- 26.Bolotov, M.G. (2018). Analiz osnovnykh nestabilnostei tliuchoho rozriadu serednikh tyskv v umovakh obrobky materialiv [Analysis of the main instabilities of a medium-pressure glow discharge under materials processing conditions]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii. – Technical sciences and technologies*, (2(12)), 103-115.
- 27.Bolotov, M.H., & Bolotov, H. P. (2021). Vyznachennia mezh enerhetychnoi stabilnosti tliuchoho rozriadu v umovakh zvaryvalnoho nahrivu [Determination of the limits of energy stability of a glow discharge under welding heating conditions]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (1(19)), 009–017. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-1\(19\)-9-17](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-1(19)-9-17).
- 28.Bolotov, G.P., Ryzhov, R.M., Bolotov, M.G. (2018). Stabilizatsiia potuzhnostrumovoho tliuchoho rozriadu aktyvnym (balastnym) oporom v umovakh pretsyziinoho zvaryvannia [Stabilization of high-current glow discharge by active (ballast) resistance in precision welding conditions]. *Mechanics and Advanced Technologies*, (2(83)), 94-99. <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2018.83.124415>.
- 29.Bolotov, G.P., Ryzhov, R.M., Bolotov, M.G. (2019). Pidvyshchennia stiikosti tliuchoho rozriadu v umovakh zvaryvannia zastosuvanniam multyseksiinykh elektrodnykh system [Increasing the stability of the glow discharge under welding conditions by using multi-section electrode systems]. *Naukovi visti KPI: mizhnarodnyi naukovo-tekhnicnyi zhurnal. Scientific news of KPI: international and scientific journal*, (2(124)), 57–63. <https://doi.org/10.20535/kpi-sn.2019.2.167770>.
- 30.Nedospasov, A.V., Khait, V.D. (1979). *Kolebaniya y neustoiichyvosti nyzkotemperaturnoi plazmy [Fluctuations and instabilities of low-temperature plasma]*. Nauka.
- 31.Napartovych, A.P., Naumov, V.H., Shashkov, V.M. (1975). O raspade plazmy tleiushcheho razriada v postoiannom elektrycheskom pole [On the decay of glow discharge plasma in a constant electric field]. *Fyzyka plazmy – Physical plasma*, 1(5), 821–829.
- 32.Bolotov, M.G., Prybytko I.O., Nahorna I.V. (2020). Tliuchy rozriad yak dzherelo poverkhevnogo nahrivu v protsesakh ziednannia riznorodnykh materialiv (ohliad) [Glow discharge as a source of surface heating in the processes of joining dissimilar materials (review)]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (2(20)), 22-36. DOI: 10.25140/2411-5363-2020-2(20)-22-36.

Отримано 20.03.2025

Gennady Bolotov¹, Maksym Bolotov², Vladislav Grechka³, Maksym Ososok⁴

¹Doctor in Technical Sciences, Doctor, Doctor of Department of welding technologies and Construction, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: bolotovgp@mail.ua **Researcher ID:** H-5304-2014

ORCID: 0000-0003-0305-2917 **Scopus:** 6506157907

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Welding Technologies and Construction, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: bolotovmg@gmail.com **Scopus:** 57190377278

Researcher ID: H-4183-2014 **ORCID:** 0000-0002-0915-4132

³Postgraduate student, Department of Welding Technologies and Construction, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: deadsilence166@gmail.com

⁴Student, Department of Welding Technologies and Construction, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: ososokmaksim@gmail.com

DESIGN FEATURES OF DEVICES FOR DIFFUSION WELDING IN A GLOW DISCHARGE

Nowadays, to obtain precision joints from dissimilar materials, industry mainly uses diffusion welding, which is carried out by pressure in the solid state at temperatures below the melting point of the materials being joined. Currently, diffusion welding uses induction (high-frequency), radiation heating, and heating in low-temperature glow discharge plasma. The first two methods, due to their technological features, require deep vacuum for welding and, accordingly, the presence of structurally complex and expensive vacuum systems in the installations.

The later developed method of diffusion welding in a glow discharge turned out to be significantly more technological and economical, since the conversion of electrical energy into thermal energy in this case is carried out directly on the surface of the parts being welded, i.e. direct heating with high thermal efficiency is implemented.

The purpose of the work is to analyze physical and technical characteristics of the glow discharge as an energy source for diffusion welding and to determine the main design approaches to the practical implementation of these processes.

Technical and technological features of glow discharge as a promising high-tech and economical energy source for diffusion welding processes, which are currently gaining significant popularity, are considered. The structure of glow discharge diffusion welding installations is considered. The main components of the mechanical and energy complexes of the installations are given. The main technical requirements for individual installation components are formulated and practical examples of their implementation are given, which will help specialists in the design and manufacture of appropriate equipment.

Keywords: diffusion welding, glow discharge, glow discharge installations, gas discharge plasma.

Fig.: 8. Table: 1. References: 32.