

УДК 621.791.12

DOI: 10.25140/2411-5363-2020-2(20)-22-36

Максим Болотов, Ірина Прибитько, Ірина Нагорна

**ТЛІЮЧИЙ РОЗРЯД ЯК ДЖЕРЕЛО ПОВЕРХНЕВОГО НАГРІВУ
В ПРОЦЕСАХ З'ЄДНАННЯ РІЗНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ (ОГЛЯД)**

Вступ. Тліючий розряд, відомий своїми яскравими світловими ефектами, знайшов значне поширення в різних галузях науки і техніки, зокрема, для отримання електронних та світлових пучків, поверхневої обробки матеріалів, для отримання захисних покриттів тощо. Як джерело зварювального нагріву тліючий розряд застосовується порівняно нещодавно, і його розвиток у цій галузі пов'язаний із дуже цікавими, а іноді й зовсім суперечливими фактами.

Мета роботи. Метою цієї роботи є ознайомити читача з основними історичними віхами становлення тліючого розряду як джерела поверхневого нагріву в процесах зварювання та паяння матеріалів, а також із труднощами, з якими стикалися вітчизняні дослідники на шляху досягнення своєї мети.

Основні етапи розвитку тліючого розряду як джерела поверхневого нагріву в процесах дифузійного зварювання та паяння. Історично перші спроби застосування тліючого розряду в процесах з'єднання матеріалів припали ще на 60-і роки ХХ століття. Уже тоді вітчизняні вчені відмічали цілий спектр його особливостей, таких як рівномірний нагрів, можливість регулювання технологічних параметрів у досить широких межах, можливість здійснювати обробку та модифікування поверхонь перед зварюванням. Але водночас було виявлено й певні недоліки, що обмежують його поширення в цих технологічних процесах, головним чином пов'язаних із частковою або повною втратою його стійкості й переходом в інші, більш стабільні форми газового розряду.

Тліючий розряд із порожнистим катодом в умовах прецизійного зварювання та паяння. Тривалий пошук способів удосконалення плазмових технологій, стосовно до умов зварювального нагріву, призвів до розробки нового джерела енергії для дифузійного зварювання та паяння на базі тліючого розряду, ініційованого в катодній порожнині. Володіючи більшою високою цілісністю енергії в плямі нагріву, в порівнянні з нормальним тліючим розрядом, унаслідок осциляції електронів у катодній порожнині, він дозволяє значно розширити номенклатуру з'єднуваних матеріалів і забезпечувати нагрів як струмопровідних матеріалів, так і діелектриків.

Висновки. Досвід застосування тліючого розряду в процесах зварювання в твердій фазі показує, що найбільш перспективними напрямками подальших розробок стануть створення автоматизованих установок та систем керування процесом дифузійного зварювання в тліючому розряді на базі мікропроцесорної техніки з використанням математичних моделей для формування оптимальних алгоритмів керування.

Ключові слова: плазма; тліючий розряд; порожнистий катод; дифузійне зварювання; паяння.

Рис.: 6. Бібл.: 50.

Вступ. Стрімке зростання потреби в новітніх матеріалах для різних галузей промисловості (атомної енергетики, ракетобудування, електроніки та ін.) змушує відшукувати та розвивати нові шляхи та способи їх нагріву, обробки та з'єднання. Постійні пошуки найбільш досконалого джерела нагріву для різних технологічних цілей пробудили цікавість як вітчизняних, так і закордонних учених до газорозрядних технологій із використанням низькотемпературної розподіленої плазми тліючого розряду.

Відкрите в середині ХІХ ст. Фарадеєм явище тліючого розряду завдяки своїй оригінальності та яскравим світловим ефектам стає дуже цікавим дослідникам у галузі спектрального аналізу. Однак необхідність у промисловому використанні настільки потужного джерела енергії, що забезпечує температуру в плямі нагріву понад 2000 °С, з'явилося лише через сто років, що пов'язано з бурхливим розвитком в другій половині ХХ ст. процесів поверхневої обробки матеріалів, нанесення покриття, зокрема й методів зварювання без розплавлення.

До теперішнього часу тліючий розряд при середніх тисках широко використовується для безпосереднього впливу на оброблюваний матеріал [1; 2], для отримання електронних [3; 4] та світлових пучків [5; 6; 7].

У промисловості тліючий розряд при тисках 0,1...1000 Па застосовують для нанесення покриттів катодним розпиленням [8; 9], травлення кремнію при виробництві мікроелектронних приладів [10; 11], хіміко-термічної обробки виробів [12; 13; 14; 15]. Проведено лабораторні дослідження процесів осаджування металів із газової фази [16; 17], які здійснюються при тиску 0,13...6,65 кПа, напрузі на розряді до 1500 В і густині енергії на катоді до 100 Вт/см². Максимальна повна потужність розряду, що використовується в промислових умовах для азотування сталей, досягає 100 кВт [18].

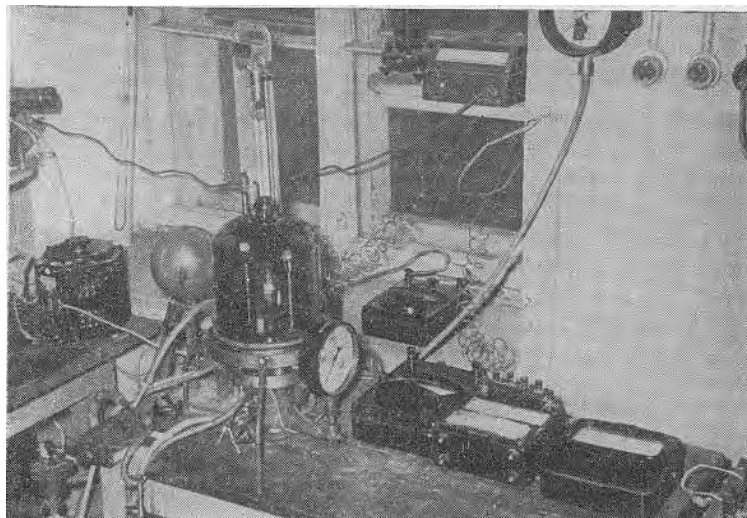
Відносно нещодавно тліючий розряд знайшов своє застосування як потужне джерело поверхневого нагріву в процесах дифузійного зварювання та паяння. Барвисте явище проходження струму в газі, назване тліючим розрядом, здатне забезпечувати концентрований або розподілений потік енергії. Саме в другому випадку в тліючого розряду виявляють абсолютно несподівані властивості як у зварювального джерела енергії. Однак, на жаль, як і будь-який інший винахід або явище, воно повинно пройти досить складний шлях, перш ніж стане в пригоді в різних галузях людської діяльності і тліючий розряд як джерело зварювального нагріву також не є винятком.

Мета роботи. Метою цієї роботи є ознайомити читача з основними історичними віхами становлення тліючого розряду як джерела поверхневого нагріву в процесах зварювання та паяння матеріалів та труднощами, з якими стикалися вітчизняні дослідники на шляху досягнення своєї мети.

Слід зауважити, що оскільки жодних претензій на наукову новизну в цій роботі автори не висловлюють, тому вся подальша оповідь буде вестись у дещо публіцистичному стилі.

Основні етапи розвитку тліючого розряду як джерела поверхневого нагріву в процесах дифузійного зварювання та паяння. Перші спроби застосування тліючого розряду в технологічних процесах з'єднання матеріалів припадають на 60-і роки ХХ ст., коли український учений В. С. Ванін у стінах Миколаївського кораблебудівельного інституту вперше здійснив дифузійне зварювання та паяння в плазмі аномального тліючого розряду. Він вважав, що оскільки практично вся величина падіння потенціалу концентрується у вузькій області поблизу катода, то не виникне жодних проблем із зарядом катода (деталей, що зварюються) потоком бомбардуючих його поверхню іонів, що стане причиною нагрівання деталей.

У своїх роботах [19; 20] В. С. Ванін наводить перші результати щодо дифузійного зварювання та наплавлення Сталі 15 та У8 в аномальному тліючому розряді, коли при щільності струму 150 A/cm^2 , робочій напрузі 2500 В у середовищі ацетону та вуглеводів була отримана температура $1000...1200 \text{ }^\circ\text{C}$. У цьому ж повідомленні він вказує на можливість використання тліючого розряду в процесах паяння металів із застосуванням різного роду припоїв і наводить схему першої установки для зварювання та паяння з використанням іонного нагріву потужністю в декілька кіловат, здатної забезпечувати високотемпературний нагрів (рис. 1).



а

Рис. 1. Загальний вигляд установки В. С. Ваніна (а) та реактора для зварювання в аномальному тліючому розряді (б):

- 1 – зона зварювання; 2 – термомпара; 3 – гумова прокладка; 4 – гідроциліндр; 5 – манометр;
6 – ізоляційна підкладка; 7 – анод; 8 – зварні зразки (катод); 9 – вакуумна камера;
10 – стійка; 11 – поришень

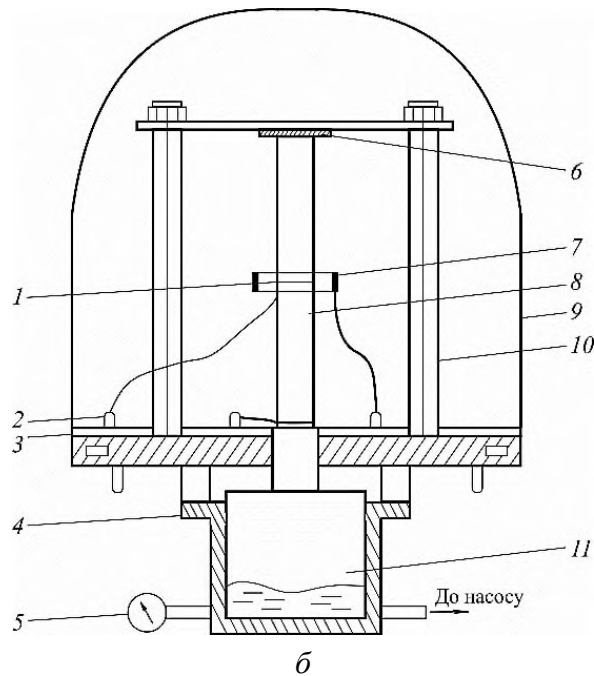


Рис. 1. Аркуш 2

Дослідження, проведене В. С. Ваніним, активізувало роботу інших українських учених у сфері застосування розподіленої газорозрядної плазми тліючого розряду в технологічних процесах зварювання та паяння. Так, роботи українських науковців: В. Ф. Квасницького, Д. І. Котельникова, Г. П. Болотова, І. М. Мухи стали основою розвитку вітчизняної науки у сфері застосування ресурсозберігаючих іонних технологій у процесах поверхневої обробки, модифікації, прецизійного зварювання та паяння металевих виробів.

Дмитро Іванович Котельников, почавши свою роботу в середині 60-х років ХХ ст., під керівництвом завідувача кафедрою зварювального виробництва при КПІ В. І. Дятлова, стає автором понад 160 наукових праць та 11 авторських свідоцтв у галузі зварювання тиском у тліючому розряді. У своїх роботах [21; 22; 23; 24], виконаних у 1968-1976 роках, Д. І. Котельников відзначає специфічні особливості тліючого розряду як джерела поверхневого нагріву, серед яких він виділяє можливість регулювання у широких межах інтенсивності та площі розподілу теплової енергії, що вводиться у виріб.

Перші спроби застосування газорозрядної плазми в умовах, характерних для дифузійного зварювання [19; 22; 25; 26] (при тисках 1,3...13,3 кПа) виявило певні труднощі переважно пов'язані з частковою або повною втратою стійкості тліючого розряду і переходом його в більш стабільну форму – електричну дугу. Як основну причину такого переходу Дмитро Котельников виділяв: наявність на поверхні деталей, що зварюються (катода розряду), різного роду оксидів, забруднень та інших часток, що стають причиною виникнення короткочасних електричних дуг; нагрів нейтрального газу в результаті імпульсної зміни напруги в розрядному проміжку, що сприяє формуванню стабільного дугового розряду.

У цих же роботах він вказує і на інші причини втрати стійкості тліючого розряду в умовах зварювання, пов'язаних із його видозміною в межах однієї форми газового розряду. Такі видозміни, на його думку, зумовлені насамперед конструктивно-геометричними характеристиками деталей, що зварюються. Так, він зауважував, що наявність на поверхнях з'єднаних заготовок різного роду щілин, зазорів, отворів або поглиблень можуть стати причиною появи іншої форми тліючого розряду – розряду з ефектом порожнистого катода. Володіючи високою щільністю струму (понад 50 А/см²), він може стати причиною порушення технологічного процесу зварювання.

Дослідження характеристик різних форм тліючого розряду та їхній вплив на нагрів Д. І. Котельников здійснював на прикладі дифузійного зварювання сталі 45 з хромнікелтитановою сталлю (12X18H9T) і армко-залізом у середовищі азоту при тиску газу 10 кПа і температурі 1125...1200 °С протягом 360 с. Аналізуючи отримані результати, він дійшов висновку, що найкращими технологічними властивостями володіє нормальний тліючий розряд, як найбільш стабільна форма тліючих розрядів він легко піддається регулюванню (рис. 2, а). Максимальну швидкість нагріву з найбільшою щільністю енергії в плямі нагріву забезпечує розряд у порожнистому катоді (рис. 2, б). Абсолютно непридатною для дифузійного зварювання при середніх тисках він виділяв аномальну форму тліючого розряду, що пов'язано з підвищеною його схильністю до переходу в електричну дугу (рис. 2, в) [27].

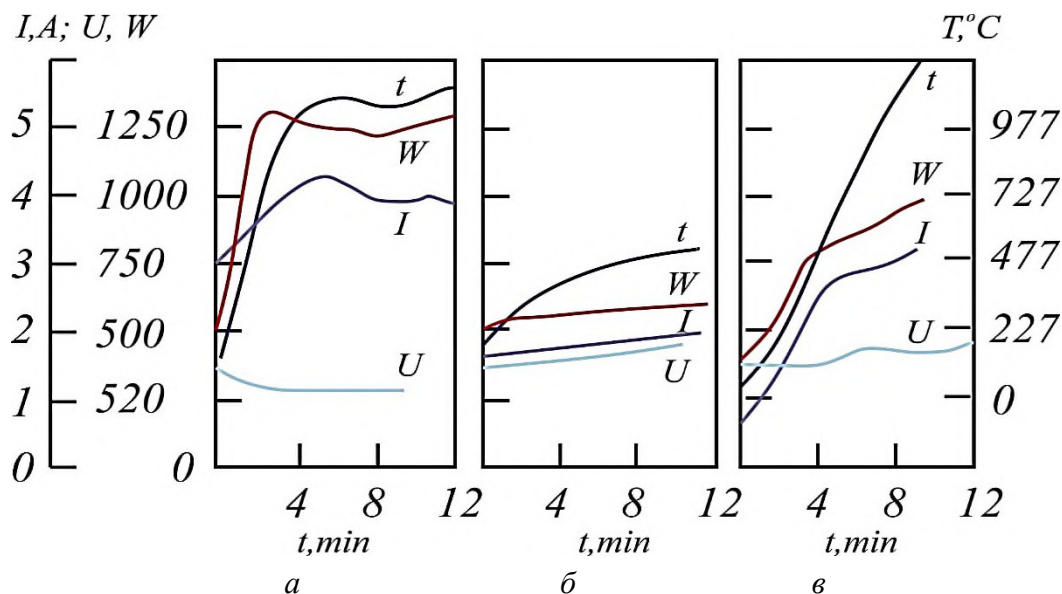


Рис. 2. Характеристика процесу нагрівання при різних формах тліючого розряду:
а – ненормальний ТР; б – нормальний ТР; в – ТР у порожниці

Отже, Дмитро Іванович Котельников уперше запропонував використовувати як джерело нагріву для дифузійного зварювання саме нормальний тліючий розряд і став автором першої у світі установки напівпромислового типу потужністю 10 кВт для дифузійного зварювання різномірних металів і сплавів із іонним нагрівом [28] (рис. 3). При безпосередній його участі й консультації застосування тліючого розряду в промисловості вперше здійснено в нашій країні на виробничому об'єднанні ім. С. П. Корольова м. Київ у середині 70-х років ХХ ст. для дифузійного зварювання металів та твердих сплавів із неметалами [23].

На нашу думку, цьому факту посприяла гостра потреба того часу в розробці прогресивних методів відновлення твердосплавного технологічного оснащення та ріжучого інструменту, елементи якого, до цього часу, з'єднувались між собою за допомогою паяння. Так, у 1973 році вченими, співробітниками київського ВО ім. С. П. Корольова І. М. Мухомою, М. Н. Довбищуком розроблена технологія реставрації вольфрамового (ВК6 і ВК15) і безвольфрамового (ТН2О) твердосплавного ріжучого інструменту методом дифузійного зварювання з іонним нагрівом у розподіленій плазмі тліючого розряду. Зварювання здійснювали в середовищі водню через тонкі металеві прошарки сталі 50НХС та нікелю, отриманих шляхом вакуумного термічного осадження. Як оптимальні параметри, що забезпечують високу міцність зразків на вигин, було виділено: температуру нагріву 1250 °С, час ізотермічної витримки 7...10 хв, тиск газу в камері 13,3 кПа, робочу напругу 400...600 В та струм розряду 3...5 А.

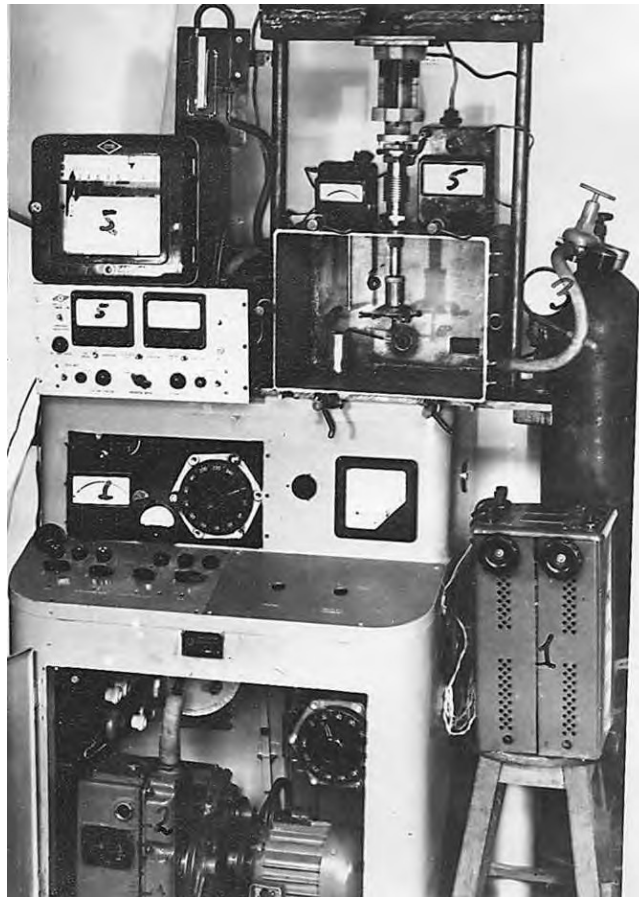
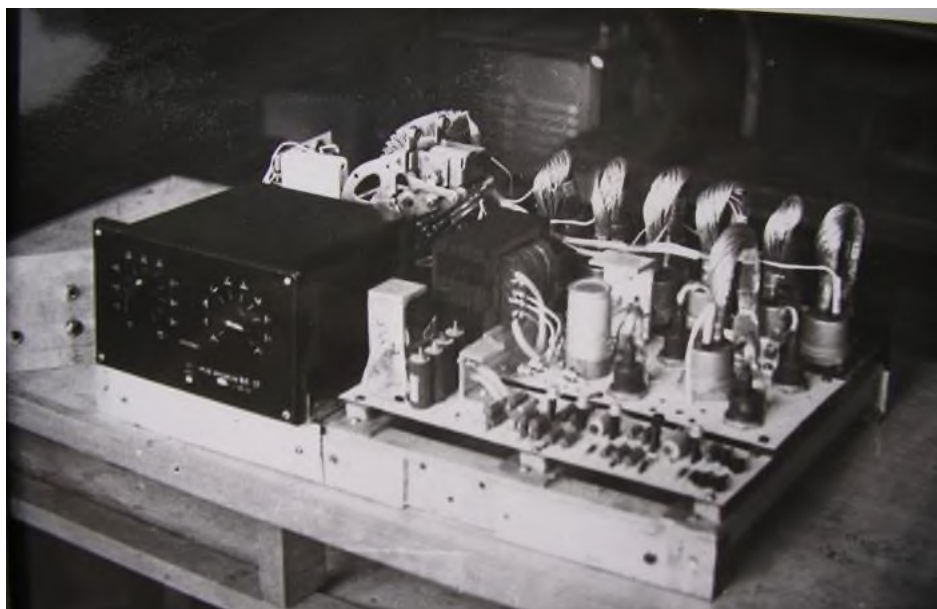


Рис. 3. Зовнішній вигляд установки іонного нагріву для дифузійного зварювання та паяння, розробленої Д. І. Котельниковим

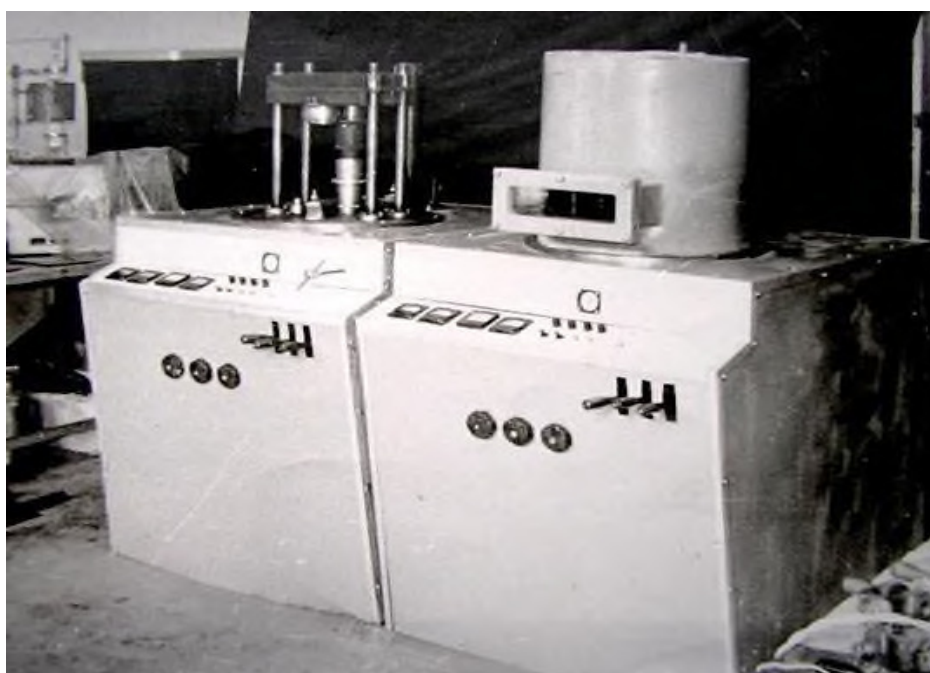
На проблеми стійкості тліючого розряду в умовах дифузійного зварювання та паяння вказували й інші радянські вчені. У роботах [29; 30; 31] зазначено можливість порушення технологічного процесу внаслідок появи тривалих потужних дугових розрядів, що супроводжується значними ударними струмовими перевантаженнями джерела живлення та деталей, що зварюються.

Тривалий пошук способів усунення вказаного недоліку призвів до розробки в 1976 році Д. І. Котельниковим разом із Г. П. Болотовим у стінах Чернігівського філіалу «Київського політехнічного інституту» перших пристроїв релейно-тиристорного та тиристорно-напівпровідникового типів, які суміщають захист виробу, що зварюється та джерела живлення від перевантажень в умовах формування стійкого дугового розряду [32]. Дія таких захисних пристроїв заснована на використанні сигналу від електричної дуги, поява якої супроводжується стрибкоподібним зростанням струму в колі розряду й покрокового його зниження доти, поки не зникнуть ознаки дугового розряду, тобто поки параметри електричного кола не повернуться до початкового режиму горіння тліючого розряду. Ці пристрої отримали назву СУ-1, СУ-2 (СУ – система управління), перевагами яких є комбінований захист виробу і джерела живлення та можливість самоналагоджування системи (рис. 4, а). Швидкодія спрацювання релейної схеми становить близько 0,1 с, а напівпровідникової – 0,01 с.

Такі пристрої автоматичної стабілізації тліючого розряду були впроваджені Д. І. Котельниковим і Г. П. Болотовим при виготовленні промислової універсальної установки для зварювання твердосплавного штампового й ріжучого інструменту в Ленінградському конструкторському бюро технологічного оснащення (ЛКБТО) в 1975 році та пізніше при виготовленні 2-камерної установки для зварювання магніострикторів на Московському радіотехнічному заводі (МРТЗ) на початку 80-х років (рис. 4, б) [33; 34].



a



б

Рис. 4. Загальний вигляд пристрою стабілізації тліючого розряду (CV-1) (а) та зовнішній вигляд двокамерної багатопозиційної установки для зварювання магніострикторів у тліючому розряді (б)

У подальшому, було встановлено, що специфічні особливості тліючого розряду в умовах зварювального нагріву вимагають розробки поряд із дугогасячими системами і нових типів джерел живлення, стабілізуючих розрядний струм та здатних витримувати потужні його стрибки. Така стабілізуюча дія може бути досягнута лише за умови узгодженості статичної вольт-амперної характеристики розряду й зовнішньої характеристики джерела живлення.

У зв'язку з цим, наприкінці 70-х – початку 80-х років Д. І. Котельников і Г. П. Болотов розробили і впровадили ряд джерел живлення потужнострумовевого тліючого розряду із зовнішньою характеристикою близькою до крутопадаючої [35]. Найбільш простим варіан-

том отримання такої характеристики, що знайшло значне поширення в промисловості, виявилось застосування джерела із зовнішнім активним (баластним) опором, значення якого, за їхньою рекомендацією, вибирають у межах від $1/3$ до повного опору розряду (рис. 5, а). Проте, як виявилось, така схема вносить значні енергетичні втрати – ККД такого джерела не перевищувало 0,4...0,6. У майбутньому заміна в джерелі живлення активного опору на індуктивно-ємнісний перетворювач [36] дозволила отримати зовнішню характеристику близьку до вертикальної (штикової), що значно розширило діапазон стійкого існування системи «джерело-розряд». Однак застосування реактивних перетворювачів значно ускладнює конструкцію джерела та підвищує його вартість. Крім того, збільшується і вага такого джерела (від 11 до 22 кг на 1 кВт залежно від потужності). Для установок підвищеної потужності ними було розроблено і впроваджено більш економні джерела живлення з можливістю керування параметрами у широких межах на основі вентильних перетворювачів (тиристорів), крутопадаюча характеристика в яких забезпечується автоматичним регулюванням струму (рис. 5, б).

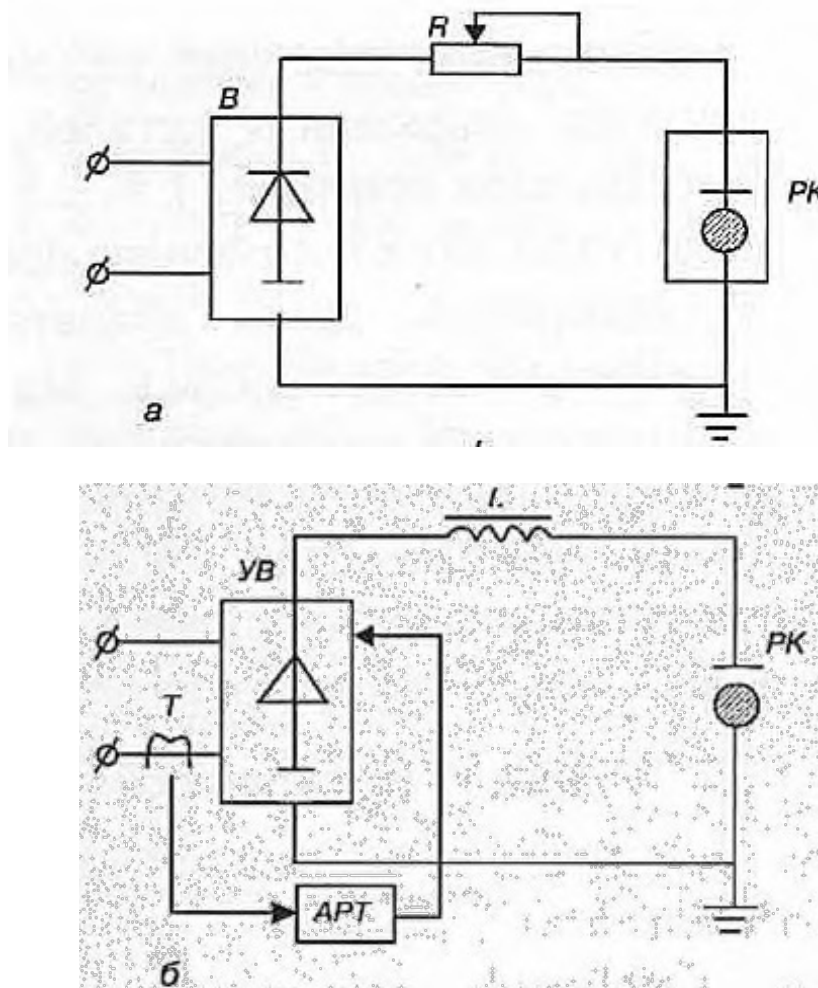


Рис. 5. Схеми джерел живлення тліючого розряду з активним баластним опором в колі розряду (а) та перетворювачами клапанів (б):

B – випрямляч; *UB* – керований випрямляч; *APT* – автоматичний регулятор струму;
PK – розрядний проміжок; *R* – резистор; *L* – згладжуючий фільтр; *T* – трансформатор

Таким чином, розглянутий період завершується опублікуванням в 1981 році Д. І. Котельниковим монографії [37], в якій він узагальнює результати досліджень та досвід промислового застосування тліючого розряду при зварюванні різномірних металів, сплавів та неметалевих матеріалів із металами; розглядає процеси в газорозрядній плазмі середніх

тисків; наводить характеристики розробленого і впровадженого в промисловість обладнання та вказує на основні проблеми та перспективи застосування тліючого розряду при дифузійному зварюванні та паянні. Як основні фактори, що обмежують широке промислове застосування такого джерела енергії в технологічних процесах з'єднання матеріалів, він виділяв недостатню стійкість тліючого розряду в межах обраної форми, викликаної флуктуацією його енергетичних параметрів, та обмежений діапазон матеріалів, що зварюються, оскільки деталі, у цьому випадку, є одним з електродів розряду (катодом).

У зв'язку з цим основна увага вчених у щодо іонного нагріву в газорозрядній плазмі протягом останніх десятиліть була прикута до пошуку способів розширення технологічних можливостей тліючого розряду, зокрема, шляхом розробки та впровадження нових, більш досконалих джерел енергії для зварювання та паяння на його основі.

Тліючий розряд із порожнистим катодом в умовах прецизійного зварювання та паяння. З тліючим розрядом, що горить у порожнистому катоді, відкритим Пашеном на початку ХХ століття, пов'язано безліч різноманітних наукових і прикладних напрямів застосування електричного струму, що протікає в газовому середовищі. Передусім історично це область дослідження спектра світіння. Уже тоді перші дослідники відзначали виняткові особливості розряду у випадку використання не плоского, а порожнистого катода.

Передумовою для використання тліючого розряду в процесах нагріву та обробки матеріалів стали роботи англійського вченого Вільяма Крукса, виконані ще наприкінці ХІХ ст. Досліджуючи електричні явища в газах всередині вакуумної трубки він дійшов висновку, що відкриті в 1859 році вченим Юліусом Плюккером катодні промені є ніщо інше як заряджені частинки (електрони), що вилітають із катода з великою швидкістю під прямим кутом до нього. Він також показав можливість їх фокусування, використовуючи при цьому не плоский, а порожнистий катод напівсферичної форми.

У подальшому й до сьогодні тліючий розряд з осциляцією електронів у катодній порожнині знайшов поширення в різних галузях промисловості – від електронної (при виготовленні іонних джерел з порожнистим катодом: стабілітрони, тиратрони з холодним порожнистим катодом, газорозрядні лампи; для отримання тонких металевих плівок та захисних покриттів тощо) до металообробної (у процесах іонної обробки та модифікації металевих поверхонь, поверхневої хіміко-термічної обробки в тліючому розряді, з метою надання необхідних властивостей поверхонь деталей, що обробляються, а також для з'єднання матеріалів концентрованими електронними пучками).

Однак знадобилося майже сотні років, щоб таке потужне джерело енергії знайшло своє застосування для з'єднання матеріалів. Так, поставлене завдання розширення можливостей дифузійного зварювання із застосування іонних технологій була вирішена наприкінці 2000-х років, коли вченими Чернігівського національного технологічного університету Г. П. Болотовим та М. Г. Болотовим було вперше опубліковано результати досліджень стійкості тліючого розряду, ініційованого в порожнистому катоді стосовно до умов зварювального нагріву [38; 39].

Головною особливістю такого джерела нагріву, що відрізняє його від інших газорозрядних джерел, запропонованих В. С. Ваніним та Д. І. Котельніковим, в яких забезпечується прямий нагрів деталей, що зварюються, шляхом бомбардування їхньої поверхні прискореними позитивними іонами робочого газу (рис. 6, а), є відсутність гальванічного зв'язку виробу з електродами розряду [40; 41]. Тобто зварювані деталі є електронейтральними, що дозволяє здійснювати зварювання як металевих, так і неметалевих виробів у різних їх поєднаннях. Із заміною катода в розрядній системі на металевий порожнистий циліндр зазнав змін і сам механізм зварювального нагріву в ТРПК, при якому здійснюється не прямий нагрів у результаті бомбардування поверхні деталей електронами, емітованими з поверхні порожнистого катода внаслідок іонно-електронної емісії і прискорених в електричному полі області катодного падіння потенціалів тліючого розряду (рис. 6, б) [42; 43].

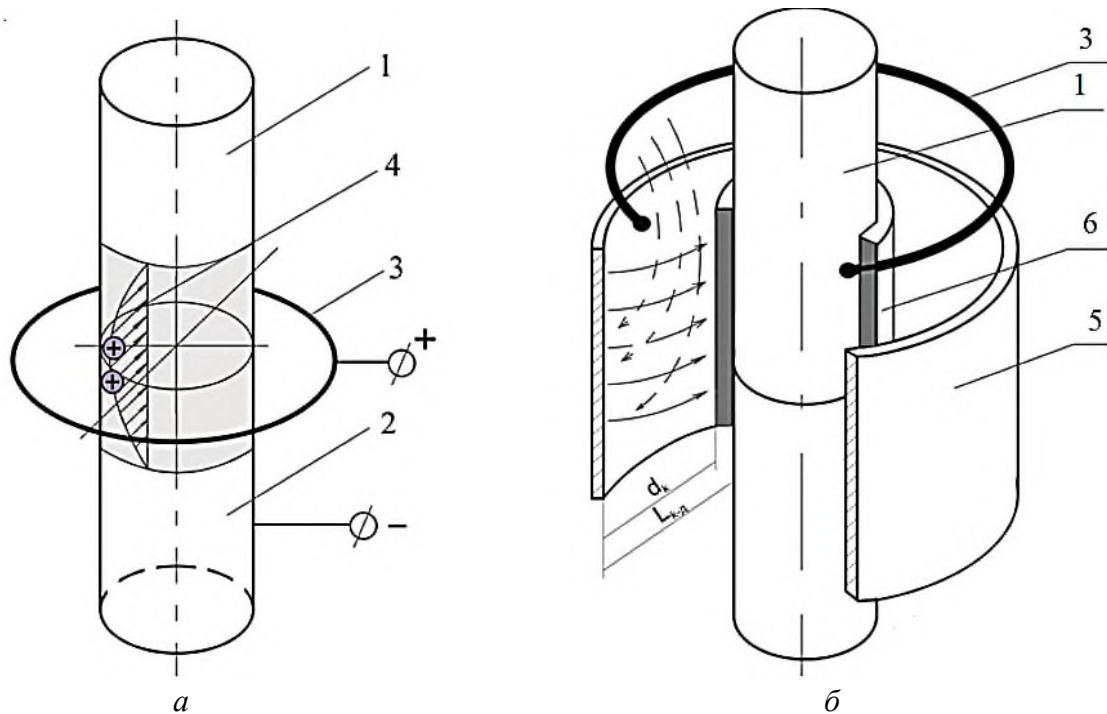


Рис. 6. Схеми зварювального нагріву в нормальному тліючому розряді (а) та розряді в порожнистому катоді (б):

1, 2 – деталі, що зварюються (катод у випадку нормального тліючого розряду); 3 – циліндричний анод; 4 – траєкторія руху іонів; 5 – циліндричний порожнистий катод; 6 – область від'ємного тліючого світіння; d_k – темний катодний простір; $L_{к-д}$ – відстань катод – деталь

Джерело: [44].

У подальші роки (2009–2014) ними було здійснено комплекс експериментальних досліджень фізико-технічних, технологічних та енергетичних характеристик тліючого розряду з порожнистим катодом в умовах, притаманних високотемпературному нагріванню в газорозрядній плазмі, а також визначенню сфери його існування [45; 46]. Також у роботах [48; 49] показано застосування тліючого розряду з метою активації та модифікування активних металів перед зварюванням. У жовтні 2014 року Г. П. Болотовим та М. Г. Болотовим було отримано патент на корисну модель [47].

У 2016 році Г. П. Болотовим було опубліковано монографію [50], яка, по суті, є другою спробою узагальнення даних зі зварювання та паяння в тліючому розряді з моменту видання монографії Д. І. Котельнікова. У ньому узагальнені фізика, техніка й досвід промислового застосування плазми тліючого розряду при зварюванні та обробці матеріалів.

Висновки відповідно до статті. Застосування тліючого розряду в дифузійному зварюванні, початок якому було покладено ще в 1962 році дослідженнями В. С. Ваніна і продовжене роботами Д. І. Котельнікова, Г. П. Болотова та іншими українськими вченими привело до того, що це джерело нагріву досить швидко посіло гідне місце серед інших джерел енергії для дифузійного зварювання та паяння. Однак подальший розвиток і широкі промислове впровадження цього джерела нагріву обмежувалося насамперед недостатньою його технологічністю, що пов'язано з обмеженою номенклатурою матеріалів, що зварюються.

Підвищити технологічні можливості тліючого розряду як джерела зварювального нагріву вдалося лише за рахунок розробки та створення нового, більш досконалого газорозрядного джерела на основі тліючого розряду, що горить у порожнистому катоді.

Досвід застосування тліючого розряду в процесах зварювання в твердій фазі показує, що найбільш перспективними напрямками подальших розробок стануть створення автоматизованих установок та систем керування процесом дифузійного зварювання в тліючому розряді на базі мікропроцесорної техніки з використанням математичних моделей для формування оптимальних алгоритмів керування.

Список використаних джерел

1. Бабад – Захряпин А. А., Кузнецов Г. Д. Химико-термическая обработка в тлеющем разряде. Москва : Атомиздат, 1975. 176 с.
2. Диффузионная сварка в тлеющем разряде / В. И. Дятлов и др. Ленинград : ЛДНТП, 1968. 26 с.
3. Москалев Б. И. Разряд с полым катодом. Москва : Энергия, 1969. 212 с.
4. Назаренко О. К. Электроннолучевая сварка. Москва : Машиностроение, 1981. 146 с.
5. Абильсиитов Г. А., Велихов Е. П., Голубев В. С. Мощные газоразрядные CO₂ лазеры и их применение в технологии. Москва : Наука, 1984. 105 с.
6. Газовые лазеры / под ред. Р. И. Солоухина. Новосибирск – Москва: СО, Наука, 1947. 360 с.
7. Коваленко В. С. Технология и оборудование электрофизических и электрохимических методов обработки материалов. Київ : Вища школа, 1983. 176 с.
8. Акишин А. И. Ионная бомбардировка в вакууме. Москва : Госэнергоиздат, 1963. 288 с.
9. Ройх И. Л., Колтунова Л. Н. Защитные вакуумные покрытия на стали. Москва : Машиностроение, 1971. 279 с.
10. Готра З. Ю. Технология микроэлектронных устройств. Москва : Радио и связь, 1991. 528 с.
11. Данилин Б. С. Получение тонкопленочных элементов микросхем. Москва : Энергия, 1972.
12. Бабад – Захряпин А. А., Кузнецов Г. Д. Радиационно – стимулируемая химико – термическая обработка. Москва : Энергоиздат, 1982. 94 с.
13. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д. Азотирование стали. Москва : Машиностроение, 1976. 256 с.
14. Лахтин Ю. М., Крымский Ю. Н. Физические процессы при ионном азотировании. *Защитные покрытия на металлах*. 1968. Вып. 2. С. 225–229.
15. Лахтин Ю. М. Современное состояние и пути развития технологии химико – термической обработки стали. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1965. № 8. С. 34.
16. Данилин Б. С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. Москва : Энергоатомиздат, 1989. 328 с.
17. Прокошкин Д. А. Получение покрытий на металлах в тлеющем разряде. *Защитные покрытия на металлах*. 1970. Вып. 3. С. 81–86.
18. Рамазанов К. Н., Ишмухаметов Д. З., Садаков Н. С. Ионное азотирование в неоднородной плазме тлеющего разряда. *Вестник УГАТУ*. 2011. № 3. С. 67–71.
19. Ванин В. С. Сварка и пайка металлов в тлеющем разряде. *Автоматическая сварка*. 1962. № 4. С. 23–25.
20. Ванин В. С. Наплавка в тлеющем разряде. *Автоматическая сварка*. 1975. № 6. С. 75–76.
21. Котельников Д. И. Исследование соединения стали, полученного диффузионной сваркой. *Автоматическая сварка*. 1970. № 4. С. 25–27.
22. Котельников Д. И. Нагрев тлеющим разрядом при диффузионной сварке. *Вестник Киев. политехн. ин-та. Сер. «Машиностроение»*. 1968. № 5. С. 56–60.
23. Котельников Д. И. Сварка твёрдых сплавов с применением тлеющего разряда. *Твердосплавная штамповая оснастка и ее применение в электротехнической промышленности*. Таллин : НИИ ТЭЗ, 1975. С. 153–159.
24. Котельников Д. И. Технология и оборудование диффузионной сварки в тлеющем разряде. *Диффузионное соединение в вакууме металлов, сплавов и неметаллических материалов*. Москва : ПНИЛДСВ, 1970. С. 298–303.
25. Квасницкий В. Ф., Кох Б. А., Сазонов А. И. Технология диффузионной сварки жаропрочных сплавов. Ленинград : ЛДНТП, 1969. 26 с.
26. Котельников Д. И. Тлеющий разряд как источник тепла в сварочных процессах. *Автоматическая сварка*. 1978. № 4. С. 15–21.
27. Котельников Д. И., Крысанов Ю. Н. Распределение плотности тока в катодном пятне тлеющего разряда. *Автоматическая сварка*. 1979. № 11. С. 27–29.

28. А.с. 927451, СССР, кл. В 23К 20/14. Способ нагрева в тлеющем разряде / Д. И. Котельников, Г. П. Болотов (СССР). Заявл. 23.05.80. Опубл. 1982, Бюл. № 18.
29. А.с. 525257, СССР, кл. Н 05В 7/16. Устройство для стабилизации сильноточного тлеющего разряда / Блинов В. И., Кириченко В. В., Сизова Н. Е., Денисов В. Е. (СССР). Заявл. 26.06.74, опубл. 1976, Бюл. № 30.
30. Использование энергии тлеющего разряда в качестве источника тепла для пайки / А. М. Большова и др. *Пайка в машиностроении*. Москва : МАТИ, 1974. С. 136–138.
31. Жилов Е. А. Установка для диффузионной сварки в тлеющем разряде при изготовлении штампов, армированных твердым сплавом. *Информ. лист № 73 – 0465*. Москва : ВИМИ, 1976. С. 2–4.
32. Болотов Г. П., Збань В. И., Котельников Д. И. Устройство для автоматической защиты изделий при сварке. *Информ. лист № 76 – 03*. Чернигов : Укр НИИНТИ, 1976. С. 1–4.
33. А.с. 927451, СССР, кл. В 23К 20/14. Способ нагрева в тлеющем разряде / Д. И. Котельников, Г. П. Болотов (СССР). Заявл. 23.05.80. Опубл. 1982, Бюл. № 18.
34. Котельников Д. И., Болотов Г. П., Романенков А. П., Сиваков А. Л. Установка для диффузионной сварки в тлеющем разряде. *Автоматическая сварка*. 1985. № 7. С. 71–72.
35. А.с. 872091, СССР, В 23К 9/00. Источник питания / Д. И. Котельников, Г. П. Болотов, Ю. Н. Крысанов (СССР). Заявл. 04.07.79. Опубл. 1981, Бюл. № 38.
36. Болотов Г. П., Котельников Д. И. Источники питания тлеющего разряда при сварке и пайке. *Деп. в ГНТБ Украины*. 1994. № 596 – Ук 94. 9 с.
37. Котельников Д. И. Сварка давлением в тлеющем разряде. Москва : Металлургия, 1981. 116 с.
38. Болотов Г. П., Болотов М. Г. Дослідження стійкості тліючого розряду з порожнистим катодом в умовах зварювання. *Вісник ЧДТУ*. 2008. № 36. С. 100–106.
39. Болотов Г. П., Болотов М. Г. Розрахункове визначення температури нагріву деталей при дифузійному зварюванні в тліючому розряді з порожнистим катодом. *Вісник ЧДТУ*. 2009. № 40. С. 29–37.
40. Болотов Г. П., Рыжов Р. Н., Болотов М. Г. Очистка тлеющим разрядом металлических поверхностей перед диффузионной сваркой и пайкой в вакууме. *Вестник НТУУ «КПИИ», сер. «Машиностроение»*. 2009. № 57. С. 124–127.
41. Болотов Г. П., Рыжов Р. М., Болотов М. Г. Активационная дія тліючого розряду в умовах дифузійного зварювання. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2011. № 1. С. 18–21.
42. Болотов М. Г. Дослідження локальних властивостей плазми тліючого розряду з порожнистим катодом стосовно до умов зварювального нагріву. *Вісник ЧДТУ*. 2013. № 1(63). С. 112–119.
43. Болотов М. Г. Анализ основных нестабильностей тліючого розряду середніх тисків в умовах обробки матеріалів. *Вісник ЧНТУ, Серія «Технічні науки та технології»*. 2018. № 2 (12). С. 103–116.
44. Болотов М. Г., Ганєєв Т. Р. Эффективность нагріву при зварюванні в тліючому розряді з порожнистим катодом. *Вісник ЧДТУ*. 2012. №1(55). С. 126–131.
45. Болотов М. Г., Болотов Г. П. Порівняльна оцінка ефективності джерел енергії для дифузійного зварювання у вакуумі. *Вісник ЧДТУ*. 2010. № 42. С. 144–147.
46. Болотов М. Г., Руденко М. М. Застосування тліючого розряду з порожнистим катодом у процесах поверхневої обробки металів. *Вісник ЧНТУ. Серія «Технічні науки»*. 2014. № 2(73). С. 100–103.
47. Патент України на корисну модель № 93483. Джерело енергії для дифузійного зварювання та паяння на основі тліючого розряду з порожнистим катодом / Болотов М. Г., Болотов Г. П. 10 Жовтень 2014 р.
48. Олексієнко С. В., Савченко О. М., Ющенко С. М. Флюсове видалення оксидних плівок під час паяння алюмінію та сплавів на його основі (літературний огляд). *Вісник ЧДТУ*. 2013. № 1(63). С. 119–124.
49. Олексієнко С. В., Куликовський Р. А., Мартиненко В. О., Ющенко С. М. Спосіб реактивно-флюсового паяння алюмінію. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2013. № 2. С. 84–87.
50. Болотов Г. П. Зварювання та паяння в плазмі тліючого розряду. Чернігів : ЧНТУ, 2016. 144 с.

References

1. Babad – Zahryapin, A. A., Kuznetsov, G. D. (1975). *Himiko-termicheskaja obrabotka v tleuschem razryade [Chemical-heat treatment in a glow discharge]*. Moscow: Atomizdat [in Russian].

2. Dyatlov, V. I. et. al. (1968). *Diffuzionnaia svarka v tleiuschem razryade [Diffusion welding in a Glow Discharge]*. Leningrad: LDNTP [in Russian].
3. Moskalev, B. I. (1969). *Razriad s polym katodom [Hollow Cathode Glow Discharge]*. Moscow: Energiia [in Russian].
4. Nazarenko, O. K. (1981). *Elektronnoluchevaia svarka [Electron beam welding]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
5. Abilsiitov, G. A., Velihov, E. P., Golubev, V. S. (1984). *Moschnyie gazorazryadnyie SO₂ lazery i ih primenenie v tehnologii [Powerful gas-discharge CO₂ lasers and their application in technology]*. Moscow: Nauka [in Russian].
6. Solouhina, R. I. (1947). *Gazovyie lazery [Gas lasers]*. Novosibirsk – Moscow: Nauka [in Russian].
7. Kovalenko, V. S. (1983). *Tehnologiia i oborudovanie elektrofizicheskikh i elektrohimicheskikh metodov obrabotki materialov [Technology and equipment of electrophysical and electrochemical methods of material processing]*. Kyiv: Vischa shkola [in Russian].
8. Akishin, A. I. (1963). *Ionnaia bombardirovka v vakuume [Ion bombardment in vacuum]*. Moscow: Gosenergoizdat [in Russian].
9. Royh, I. L., Koltunova, L. N. (1971). *Zaschitnye vakuumnye pokryitiia na stali [Defending vacuum coatings on steel]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
10. Gotra, Z. Yu. (1991). *Tehnologiia mikroelektronnykh ustroystv [The technology of microelectrjn devices]*. Moscow: Radio i sviaz [in Russian].
11. Danilin, B. S. (1972). *Poluchenie tonkoplnochnnyih elementov mikroshem [The obtaining of thing films elements of microscheme]*. Moscow: Energiia [in Russian].
12. Babad – Zahryapin, A. A., Kuznetsov, G. D. (1982). *Radiatsionno-stimuliruemaya himiko – termicheskaya obrabotka [Radiation-stimulated chemical – thermal treatment]*. Moscow: Energoizda [in Russian].
13. Lahtin, Yu. M., Kogan, Ya. D. (1976). *Azotirovanie stali [The nitriding of steel]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
14. Lahtin, Yu. M., Kryimskiy, Yu. N. (1968). Fizicheskie protsessy pri ionnom azotirovanii [Physical processes in steel nitriding]. *Zaschitnye pokryitiia na metallakh – Protective coatings on metals*, 2, 225–229 [in Russian].
15. Lahtin, Yu. M. (1965). Sovremennoe sostoianie i puti razvitiia tehnologii khimiko-termicheskoi obrabotki stali [Current state and ways of development of technology of chemical – heat treatment of steel]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov – Metallurgy and heat treatment of metals*, 8, 34 [in Russian].
16. Danilin, B. S. (1989). *Primenenie nizkotemperaturnoi plazmy dlia naneseniia tonkikh plenok [Application of low temperature plasma for thin films deposition]*. Moscow: Energoatomizdat [in Russian].
17. Prokoshkin, D. A. (1970). Poluchenie pokrytii na metallakh v tleiuschem razriade [Obtaining of a metal coatings in the glow discharge]. *Zaschitnye pokryitiia na metallakh – Protective coatings on metals*, 3, 81–86 [in Russian].
18. Ramazanov, K. N., Ishmuhametov, D. Z., Sadakov, N. S. (2011). Ionnoe azotirovanie v neodnorodnoi plazme tleiuschego razriada [Ion nitriding in unhomogenous plasma of a glow discharge]. *Vestnik UGATU – Bulletin of USATU*, 3, 67–71 [in Russian].
19. Vanin, V. S. (1962). Svarka i payka metallov v tleyuschem razryade [Welding and brazing in a glow discharge]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic welding*, 4, 23–25 [in Russian].
20. Vanin, V. S. (1975). Naplavka v tleiuschem razriade [Glow discharge surfacing]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic welding*, 6, 75–76 [in Russian].
21. Kotelnikov, D. I. (1970). Issledovanie soedineniia stali, poluchennogo diffuzionnoi svarkoy [Study of the connection of steel obtained by diffusion welding]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic welding*, 4, 25–27 [in Russian].
22. Kotelnikov, D. I. (1968). Nagrev tleiuschim razriadom pri diffuzionnoi svarke [The heating by the glow discharge while diffusion welding]. *Vestnik Kiev. politehn. in-ta. Ser. «Mashinostroenie» – Bulletin of Kiev. Polytechnic Institute. Ser. “Engineering”*, 5, 56–60 [in Russian].
23. Kotelnikov, D. I. (1975). Svarka tverdykh splavov s primeneniem tleiuschego razriada [Welding hard alloys with application of a glow discharge]. In *Tverdospлавnaia shtampovaia osnastka i ee primenenie v elektrotehnicheskoi promyshlennosti – Tungsten carbide tooling and its application in the electrical industry* (pp. 153–159). Tallin: NII TEZ [in Russian].

24. Kotelnikov, D. I. (1970). Tehnologiya i oborudovanie diffuzionnoy svarki v tleuschem razryade [The technology and equipment of diffusion welding in a glow discharge]. *Diffuzionnoe soedinenie v vakuume metallov, splavov i nemetallicheskih materialov – Diffusion compound in a vacuum of metals, alloys and non-metallic materials* (298–303). Moscow: PNILDSV [in Russian].
25. Kvasnitskiy, V. F., Kokh, B. A., Sazonov, A. I. (1969). *Tehnologiya diffuzionnoi svarki zharoprochnykh splavov [Technology of diffusion welding of heat-resistant alloys]*. Leningrad: LDNTP [in Russian].
26. Kotelnikov, D. I. (1978). Tleuschii razriad kak istochnik tepla v svarochnykh protsessakh [The glow discharge as a heating source in a welding processes]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, 4, 15–21 [in Russian].
27. Kotelnikov, D. I., Krysanov, Yu. N. (1979). Raspredelenie plotnosti toka v katodnom pyatne tleuschego razryada [The spreading of a current density in a cathode spot of a glow discharge]. Kotelnikov. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, 11, 27–29 [in Russian].
28. Kotelnikov, D. I., Bolotov, G. P. (SSSR). (1982). A.s. 927451, SSSR, kl. V 23K 20/14. *Sposob nagreva v tleuschem razryade [The way of heating in a glow discharge]* [in Russian].
29. Blinov, V. I., Kirichenko, V. V., Sizova, N. E., Denisov, V. E. (SSSR). (1976). A.s. 525257, SSSR, kl. N 05V 7/16. *Ustroystvo dlia stabilizatsii silnotochnogo tleuschego razryada [The seating for stabilization of a high-current glow discharge]* [in Russian].
30. Bolkova, A. M. et. al. (1974). Ispolzovanie energii tleuschego razriada v kachestve istochnika tepla dlia paiki [The usage of energy of a glow discharge as a heating source for brazing]. In *Paika v mashinostroenii – Soldering in mechanical engineering* (136–138). Moscow: MATI [in Russian].
31. Zhilov, E. A. (1976). Ustanovka dlia diffuzionnoi svarki v tleuschem razryade pri izgotovlenii shtampov, armirovannykh tverdym splavom [Installation for a diffusion welding in a glow discharge during manufacturing of stamps reinforced with hard alloy]. *Inform. listok – Information letter № 73 – 0465* (pp. 2–4). Moscow: VIMI [in Russian].
32. Bolotov, G. P., Zban, V. I., Kotelnikov, D. I. (1976). Ustroystvo dlia avtomaticheskoy zaschity izdeliy pri svarke. [The installation for automatic defending of specimens during welding]. *Inform. listok – Information letter № 76 – 03* (pp. 1–4). Chernigov: Ukr NIINTI [in Russian].
33. Kotelnikov, D. I., Bolotov, G. P. (SSSR) (1982). A.s. 927451, SSSR, kl. V 23K 20/14. *Sposob nagreva v tleuschem razryade [The way of heating in a glow discharge]* [in Russian].
34. Kotelnikov, D. I., Bolotov, G. P., Romanenkov, A. P., Sivakov, A. L. (1985). Ustanovka dlia diffuzionnoy svarki v tleuschem razryade [The installation for a diffusion welding in a glow discharge]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, 7, 71–72 [in Russian].
35. Kotelnikov, D. I., Bolotov, G. P., Krysanov, Yu. N. (SSSR). (1981). A.s. 872091, SSSR, V 23K 9/00. *Istochnik pitaniya [Power source]* [in Russian].
36. Bolotov, G. P., Kotelnikov, D. I. (1994). Istochniki pitaniya tleuschego razriada pri svarke i paike [Power sources of a glow discharge in welding and brazing]. *Dep. v GNTB Ukrainyi – Dep. in SSTL of Ukraine*, 596, Uk 94 [in Russian].
37. Kotelnikov, D. I. (1981). *Svarka davleniem v tleuschem razryade [Pressure welding in a glow discharge]*. Moscow: Metallurgiya [in Russian].
38. Bolotov, G. P., Bolotov, M. G. (2008). Doslidzhennia stiikosti tliuchoho rozriadu z porozhnistim katodom v umovakh zvariuvannia [The investigation of a hollow cathode glow discharge in welding]. *Visnyk ChDTU – Bulletin of ChSTU*, 36, 100-10 [in Ukrainian].
39. Bolotov, G. P., Bolotov, M. G. (2009). Rozrahunkove viznachennya temperaturi nagrIvu detaley pri difuziynomu zvariuvanni v tliuchomu rozryadi z porozhnistim katodom [The calculation of heating temperature of samples in diffusion welding with a hollow cathode glow discharge]. *Visnyk ChDTU – Bulletin of ChSTU*, 40, 29–37 [in Ukrainian].
40. Bolotov, G. P., Ryzhov, R. N., Bolotov, M. G. (2009). Ochistka tleuschim razryadom metallicheskih poverhnostey pered diffuzionnoy svarkoy i paykoy v vakuume [Glow discharge cleaning of metal surfaces before diffusion welding and vacuum soldering]. *Vestnik NTUU «KPI», ser. «Mashinostroenie» – Bulletin of NTUU «KPI», ser. «Engineering»*, 57, 124–127 [in Russian].
41. Bolotov, G. P., Rizhov, R. M., Bolotov, M. G. (2011). Aktivatsiina diia tliuchoho rozriadu v umovah difuziynogo zvariuvannia [Activation action of a glow discharge in diffusion welding]. *Visnik Donbaskoi derzhavnoi mashinobudivnoi akademii – Bulletin of the Donbass State Engineering Academy*, 1, 18–21 [in Ukrainian].

42. Bolotov, M. G. (2013). Doslidzhennia lokalnykh vlastyvostei plazmy tliuchoho rozriadu z porozhnystym katodom stosovno do umov zvaryvalnogo nagrivu [Investigation of local properties of glow discharge plasma with a hollow cathode in relation to welding heating conditions]. *Visnyk ChDTU – Bulletin of ChSTU*, 1(63), 112-119 [in Ukrainian].

43. Bolotov, M. G. (2018). Analiz osnovnykh nestabilnosti tliuchogo rozryadu serednikh tiskiv v umovakh obrobky materialiv [Analysis of the main instabilities of the glow discharge of medium pressures in the processing of materials]. *Visnyk ChDTU – Bulletin of ChSTU*, 2 (12), 103-116 [in Ukrainian].

44. Bolotov, M. G., Ganieiev, T. R. (2012). EfektivnIst nagrIvu pri zvaryuvanni v tIlyuchomu rozryadi z porozhnistim katodom. [Heating efficiency during welding in a glow discharge with a hollow cathode]. *Visnyk ChDTU – Bulletin of ChSTU*, 1(55), 126–131 [in Ukrainian].

45. Bolotov, M. G., Bolotov, G. P. (2010). PorIvnyalna otsInka effektivnostI dzhherel energIyi dlya difuzynogo zvaryuvannya u vakuumI [Comparative evaluation of the efficiency of energy sources for diffusion welding in vacuum]. *Visnyk ChDTU – Bulletin of ChSTU*, 42, 144–147 [in Ukrainian].

46. Bolotov, M. G., Rudenko, M. M. (2014). Zastosuvannya tliuchoho rozriadu z porozhnistim katodom u protsesakh poverhnevoi obrobky metaliv [Application of a glow discharge with a hollow cathode in the processes of surface treatment of metals]. *Visnyk ChDTU – Bulletin of ChSTU*, 2(73), 100–103 [in Ukrainian].

47. Bolotov, M. G., Bolotov, G. P. (October 2014). Patent Ukraini na korisnu model № 93483. *Dzherelo energii dlia difuziinoho zvaryuvannya ta paiannia na osnovy tliuchoho rozriadu z porozhnistim katodom [Energy source for diffusion welding and soldering based on a glow discharge with a hollow cathode]* [in Ukrainian].

48. Oleksiienko, S. V., Savchenko, O. M., Yuschenko, S. M. (2013). Flusove vidalennia oksydneykh plivok pid chas paiannia aliumIniu ta splaviv na yoho osnovy (literaturnii ohliad) [Flux removal of oxide films during soldering of aluminum and alloys based on it (literature review)]. *Visnyk ChDTU – Bulletin of ChSTU*, 1(63), 119–124 [in Ukrainian].

49. Oleksiienko, S. V., Kulikovskiy, R. A., Martinenko, V. O., Yuschenko, S. M. (2013). Sposib reaktivno-flusovoho paiannia aliuminiu [The method of reactive-flux soldering of aluminum]. *Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashinobuduvanni. ZNTU – New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*, 2, 84-87 [in Ukrainian].

50. Bolotov, G. P. (2016). *Zvaryuvannya ta paiannia v plazmi tliuchoho rozriadu [Welding and brazing in the glow discharge plasma]*. Chernihiv: ChNTU [in Ukrainian].

UDC 621.791.12

Maksym Bolotov, Iryna Prybytko, Iryna Nahorna

GLOW DISCHARGE AS A HEATING SOURCE FOR THE PROCESSES OF JOINING OF DIFFERENT MATERIALS (REVIEW)

Introduction. The glow discharge, known for its bright light effects, has become widespread in various fields of science and technology, in particular, for the production of electron and light beams, surface treatment of materials, for protective coatings, etc. As a source of welding heat, glow discharge is used relatively recently and its development in this area is associated with very interesting and, sometimes, completely contradictory facts.

The purpose of the work. The purpose of this work is to acquaint the reader with the main historical milestones of the formation of the glow discharge as a source of surface heating in the processes of welding and soldering materials, and the difficulties encountered by domestic researchers to achieve their goal.

The main stages of development of the glow discharge as a source of surface heating in the processes of diffusion welding and brazing. Historically, the first attempts to use glow discharge in the process of joining materials occurred in the 60s of last century. Even then, domestic scientists noted a range of its features, such as uniform heating, the ability to adjust technological parameters in a wide range, the ability to process and modify surfaces before welding. However, a number of shortcomings have been identified that limit its widespread use in these processes, mainly related to the partial or complete loss of its stability and the transition to other, more stable forms of gas discharge.

Hollow cathode glow discharge in the conditions of precision welding and brazing. The long search for ways to improve plasma technology in relation to welding heating conditions has led to the development of a new energy source for diffusion welding and soldering based on a glow discharge initiated in the cathode cavity. With a higher energy density in the heating spot, compared to a normal glow discharge, due to the oscillation of electrons in the cathode cavity, it can significantly expand the range of connected materials and provide heating for both conductive materials and dielectrics.

Conclusions. *The experience of using glow discharge in solid phase welding shows that the most promising areas of further development will be the creation of automated installations and control systems for diffusion welding in glow discharge based on microprocessor technology using mathematical models to form optimal control algorithms.*

Keywords: *plasma; glow discharge; hollow cathode; diffusion bonding; brazing.*

Fig.: 6. **References:** 50.

Болотов Максим Геннадійович – кандидат технічних наук, доцент, 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, Associate Professor, Associate Professor 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

ResearcherID: H-4183-2014

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

Прибитько Ірина Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Prybytko Iryna – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor 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: prybytko_ira@ukr.net

ResearcherID: F-7325-2014

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8550-8318>

Нагорна Ірина В'ячеславівна – асистент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна)

Nahorna Iryna – assistant 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: zavalnaya89@gmail.com

ResearcherID: F-4705-2014

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5075-8712>