

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРНІГІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Г. П. БОЛОТОВ

**ЗВАРЮВАННЯ ТА ПАЯННЯ В ПЛАЗМІ
ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ**

Монографія

Чернігів
2016

УДК 621.791.12
ББК 34.64
Б 79

*Затверджено до друку Вченою радою
Чернігівського національного технологічного університету
Протокол № 6 від 29 червня 2016 року*

Рецензенти:

Рижов Р.М. – д.т.н., професор кафедри електрозварювальних установок НТУУ “Київський політехнічний інститут”, м. Київ;

Денисов Ю.О. – д.т.н., професор, завідувач кафедри промислової електроніки Чернігівського національного технологічного університету, м. Чернігів;

Сидорець В.М. – д.т.н., професор, провідний науковий співробітник відділу фізики газового розряду та техніки плазми Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ.

Б 79 Болотов Г.П. Зварювання та паяння в плазмі тліючого розряду / Г.П. Болотов. – Чернігів: ЧНТУ. – 2016. – 146 с.
ISBN 978-966-7496-85-2

Узагальнено результати досліджень та досвід застосування тліючого розряду при дифузійному зварюванні та паянні металів та сплавів. Розглянуті енергетичні характеристики тліючого розряду як джерела нагріву. Особливу увагу приділено питанням забезпечення стабільності існування тліючого розряду підвищеного тиску в умовах взаємодії газорозрядної плазми з металевими поверхнями, що знаходяться у різному фізичному стані. Наведені приклади зварювання конструкцій в тліючому розряді однорідних і різнорідних металів, математичні моделі та номограми для визначення режимів зварювання. Вказані конструктивні особливості, характеристики та схеми устаткування для зварювання та паяння у тліючому розряді.

Для інженерно-технічних працівників та спеціалістів підприємств та наукових організацій, що займаються питаннями з'єднання матеріалів в твердій фазі. Може бути корисна аспірантам та студентам відповідних спеціальностей.

Табл. 9. Іл. 84. Бібліогр. 183

УДК 621.791.12
ББК 34.64

ISBN 978-966-7496-85-2

ПЕРЕДМОВА

З тліючим розрядом, відкритим Грове більше 100 років тому, пов'язано безліч різноманітних наукових і прикладних напрямків застосування електричного струму, що протікає в розрідженому газі. У першу чергу, історично це були електротехніка і радіоелектроніка. Але в останні десятиліття тліючий розряд отримав застосування в якості потужного зварювального джерела енергії в електронно-променевому, лазерному та дифузійному зварюванні. Барвисте явище проходження струму в газі, назване тліючим розрядом, здатне забезпечувати концентрований або розподілений потік енергії. Саме в другому випадку у тліючого розряду виявляються абсолютно несподівані можливості як у зварювального джерела енергії: 1) він дозволяє забезпечувати режим нагрівання, регульований в межах декількох порядків як за площею плями нагріву, так і по розподіленості енергії в плямі нагріву, 2) він має властивість забезпечувати рівномірний поверхневий нагрів і проникати в щілини, порожнини і зазори, забезпечуючи о б'ємний нагрів стільникових або порожнистих конструкцій; 3) нарешті, він має можливості не тільки гріти, а й активувати, хімічно і термічно обробляти металеві поверхні. Дивовижні і різноманітні властивості тліючого розряду проявляються завдяки широкому діапазону тисків газового середовища, при яких він стабільно існує.

Розвиток, вдосконалення та ефективне застосування тліючого розряду в науці і практиці зварювального виробництва вимагає відповідного інформаційного забезпечення. Однак, до теперішнього часу є лише одна монографія Д.І. Котельникова «Зварювання тиском у тліючому розряді», видана ще в 1981 році, і в якій узагальнено підсумки попередніх досліджень проблем зварювання в плазмі тліючого розряду.

Пропоноване видання представляє собою другу спробу узагальнення даних зі зварювання у тліючому розряді, в першу чергу, за проміжок часу, що пройшов з моменту видання зазначеної монографії. У ньому розглянуті фізика, техніка і досвід промислового застосування плазми тліючого розряду при зварюванні та обробці металів.

Книга призначена для інженерно-технічних працівників, які розробляють, застосовують і впроваджують сучасні енерго- і ресурсозберігаючі методи обробки матеріалів в різних галузях виробництва та науково-дослідних організаціях.

Вступ

Потреби провідних галузей промисловості – радіоелектроніки, космічної техніки, приладобудування, машинобудування та ін. призвели до бурхливого розвитку методів зварювання без розплавлення для виготовлення великої номенклатури виробів, що розрізняються за матеріалами, формою, габаритами, але об'єднаних такими вимогами до технології зварювання як:

- 1) збереження у зварюваних матеріалів високих експлуатаційних властивостей, які при зварюванні плавленням могли б безповоротно зникнути,
- 2) забезпечення прецизійності зварного з'єднання;
- 3) забезпечення якісного з'єднання між матеріалами, різними за складом або за природою.

Дифузійне зварювання є найбільш універсальним методом з точки зору повноти задоволення зазначених вимог до технології процесу з'єднання. Назване акад. Б.Є. Патоном "зварюванням майбутнього", воно вже зараз забезпечує з'єднання понад 700 композицій з різних матеріалів [72].

Широке впровадження методу дифузійного з'єднання різноманітних матеріалів пов'язане з необхідністю вирішення ряду технологічних проблем: 1) у зоні зварювання тепловий вплив на матеріали протягом тривалого циклу зварювання має бути точно регульованим за потужністю, інтенсивністю і формою розподілу енергії; 2) деталі, що зварюються, приводяться в контакт з деяким зусиллям, створюваним притискними пристроями, що збільшує масу, яка піддається нагріванню і викликає підвищення витрат енергії, ускладнює динаміку нагріву; 3) механізм утворення дифузійного зварного з'єднання встановлює складні взаємозв'язки між формою виробу, що нагрівається, і зовнішніми технологічними параметрами, які забезпечують протікання процесу.

В дифузійному зварюванні мають місце надзвичайно різноманітні форми виробів і сполучення з'єднуваних матеріалів, що зумовило застосування практично всіх існуючих способів нагріву, від пічного до електронно-променевого [88]. При цьому зварні з'єднання в більшості стикові з розвиненою поверхнею контакту, напусткові, охоплюючі з конічною або циліндричною поверхнею контакту. Різноманіття форм і матеріалів виробів роблять задачу оптимального вибору джерела нагріву досить складною. Для її вирішення необхідне знання кількісних характеристик взаємозв'язків параметрів об'єктів, що зварюються, джерел теплоти і теплофізичних особливостей дифузійного зварювання. Останні складаються у наступному:

- 1) нагрів зварних з'єднань (зварного контакту) здійснюється за допомогою теплопровідності від зовнішньої поверхні виробу, що сприймає енергію джерела теплоти;

Виняток становить нагрів струмом, що проходить через деталі та зону їх контакту. Обмеженість його застосування при дифузійному зварюванні обумовлена складністю управління енерговиділенням в контакті при дуже широкому діапазоні зміни площі зварних з'єднань і електропровідності зварюваних матеріалів, обмеженнями за формою, габаритами та матеріалом виробів. Тому, як правило, джерела нагріву, що використовуються в дифузійному зварюванні, є поверхневими і весь виріб або його значна частина нагрівається до температури зварювання. Навіть при індукційному нагріванні при частоті генератора в десятки і сотні кілогерц глибина проникнення струму в метал складає долі міліметра;

2) нагрівання виробу, що зварюється, неминуче пов'язане з нагріванням пристосувань, що забезпечують його стиснення. Енергія, що поглинається пристосуванням, може значно перевищувати енергію, необхідну для отримання зварного з'єднання, що обумовлює енергетичну надмірність процесу;

3) нагрівання і охолодження в процесі зварювання здійснюються зі швидкостями 0,01 ... 100 К/с. Час ізотермічної витримки при дифузійному зварюванні складає сотні і тисячі секунд. Температурний цикл зварювання подібний до режиму термічної обробки; оскільки температура зварювання не перевищує 0,9 температури плавлення матеріалів, це обмежує інтенсивність енергії, що вводиться через поверхню виробу;

4) нагрівання виробу, що зварюється, здійснюється в захисному газовому середовищі (нейтральному або активному), незважаючи на те, що поверхні, які з'єднуються, знаходяться у щільному контакті і стискаються питомим тиском близько 10 ... 30 МПа;

5) форми і площі поверхонь, що сприймають тепло від джерела, вельми різноманітні.

Залежно від форми і матеріалу виробу ці умови можуть змінюватися в дуже широкому діапазоні. При виборі джерела енергії необхідно оцінювати ступінь його універсальності і ступінь його спеціалізації, щоб отримати найбільший техніко-економічний ефект від його застосування. Це можливо при оптимальній відповідності обладнання технологічним і економічним вимогам. Очевидно, що немає універсального джерела нагріву, придатного для всіх випадків зварювання тиском. Навіть для технологічно найбільш складного варіанта зварювання тиском (тобто дифузійного зварювання) є можливість для вибору оптимальних варіантів нагріву, виходячи з особливостей виготовлення виробів, фізико-технологічних характеристик джерел і необхідного діапазону їх зміни.

У роботах Казакова М. Ф., Бачина В. О., Квасницького В. Ф., Ваніна В. С., Дятлова В.І., Котельникова Д.І., Картавого С. К., Мухи І. М., Худишева А.

Ф. та ін. випробувані стосовно дифузійного зварювання різні джерела нагріву. Досвід лабораторного і промислового застосування дифузійного зварювання свідчить, що з використовуваних на сьогоднішній день джерел енергії (індукційний, радіаційний, електроконтактний та ін.) найбільш повно зазначеним вимогам відповідає нагрів виробів тліючим розрядом, що горить у середовищі активних або інертних газів при тиску нижче атмосферного, що дозволяє в широких межах регулювати інтенсивність нагріву та розподіл теплової енергії в процесі фізико-технічної обробки матеріалів [99].

Досвід застосування тліючого розряду в дослідних і промислових умовах свідчить, що нагрівання розподіленою плазмою тліючого розряду середніх тисків (1 ... 10 кПа) розширює можливості зварювання тиском різнорідних матеріалів, дозволяє розробляти принципово нові конструкції зварних вузлів.

За допомогою тліючого розряду вирішуються основні проблеми дифузійного з'єднання: стає можливим відмовитися від високого вакууму, що істотно спрощує обладнання та сам процес зварювання, вартість устаткування знижується в 3 ... 4 рази; в 6 ... 7 разів підвищується енергетична ефективність процесу нагріву; висока адаптивність іонного нагріву робить його універсальним, що визначає доцільність його використання не тільки в масовому, але й в серійному та одиничному виробництвах [43, 76, 116, 183]. Тліючий розряд дозволяє не тільки нагрівати вироби, але й проводити тонку поверхневу обробку з метою активації поверхонь, що з'єднуються, або модифікації їх структури та властивостей.

1. ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ

1.1. Електричний розряд в газах

1.1.1. *Форми газового розряду*

Якщо до електродів, розташованих у об'ємі з розрідженим газом, прикласти різницю потенціалів та поступово її збільшувати, то зростання слабого струму між електродами спочатку буде підпорядковуватись закону Ома. Виникнення струму пов'язано із присутністю у газі заряджених часток – іонів, що утворюються під впливом зовнішніх іонізаторів (світла, космічного випромінювання, фонові радіоактивності та ін.). При збільшенні різниці потенціалів струм між електродами збільшується до тих пір, поки не будуть вичерпані всі іони, що виникають під впливом зовнішніх іонізаторів. Починаючи із різниці потенціалів, достатньої для переносу всіх іонів, що утворюються, до поверхні електродів, подальшої зміни струму здійснюватись не буде. Це означає завершення дії закону Ома. Досягнуте при цьому значення струму називають струмом насичення. Проходження струму через газ в умовах, коли носії струму – іони, утворюються переважно під дією зовнішніх іонізаторів, називають несамостійним розрядом.

Припинення дії зовнішніх іонізаторів або зниження їх інтенсивності призводить до припинення розряду або зменшення його струму. Однак, якщо різницю потенціалів між електродами продовжувати збільшувати, не змінюючи відстані між ними, то струм знов почне збільшуватись. Значення різниці потенціалів, яка відповідає початку збільшення струму, пропорційне тиску газу і залежить від його природи. Причиною зростання струму в цьому випадку є іонізація молекул (атомів) газу електронами, що з'являються під впливом зовнішніх іонізаторів і отримують енергію, достатню для іонізації часток під дією сил електричного поля між електродами.

Іонізація молекул (атомів) газу призводить до появи вторинних електронів, які прискорюючись становляться, як і первинні електрони, іонізаторами нейтральних газових часток. В результаті виникає лавиноподібно наростаючий потік електронів. При цьому струм між електродами, тобто направлений рух електронів та іонів під впливом електричного поля, різко зростає до значень, що залежать в основному від опору всього кола та потужності джерела живлення. Це явище у повітрі при атмосферному тиску починає спостерігатись при різницях потенціалів порядку 10^4 В/см. Іонізація в цих умовах супроводжується збудженням молекул, появою світіння газу.

Явище лавиноподібного нарощування потоку електронів, що супроводжується світінням газу між електродами, називають запалюванням газового розряду або пробоем газового проміжку. Розряд, що формується після пробоею, є самостійним, оскільки він здатний продукувати заряджені частки, необхідні для підтримання струму, і для його існування вже не потрібна дія зовнішніх іонізаторів.

Пробій газового проміжку пов'язаний із різким зростанням електропровідності газу в ньому. В результаті пробою здійснюється зниження напруги на електродах. Напруга, необхідна для пробою газового проміжку, носить назву напруги запалювання розряду. Напругу, що встановлюється на електродах після пробою газового проміжку, називають напругою горіння розряду.

Самостійний розряд має різні форми, що відрізняються як зовнішнім виглядом, так і характером елементарних процесів. При високому тиску газу (порядку атмосферного), значній відстані між електродами, високовольтному, але малопотужному джерелі електричного живлення виникає іскровий розряд. При низькому тиску газу і достатньо малому опорі електричного кола формується тліючий розряд. При малому опорі зовнішнього кола і достатньо високому тиску газу услід за пробоєм виникає дуговий розряд. Тліючий розряд може перейти в дуговий при зменшенні зовнішнього опору та підвищенні тиску газу в розрядному проміжку.

Характер елементарних процесів, що протікають в розрядному газовому проміжку, знаходить своє відображення у вольт-амперній характеристиці розряду, яка представляє собою графічне зображення залежності сили струму від напруги на електродах. Ця залежність для розряду в газі більш складна, ніж для твердих або рідких провідників, для яких в переважній частині випадків значення сили струму пропорційно прикладеній різниці потенціалів.

При проходженні струму через гази електропровідність останніх залежить від багатьох причин, і в першу чергу, від сили струму. Тому пропорційність між напругою та силою струму в розрядному проміжку відсутня. На рис. 1.1 схематично зображена вольт-амперна характеристика газового розряду. Ділянка *ab* відповідає самостійному темному розряду та переходу його до тліючого розряду, горизонтальна ділянка *bc* відповідає нормальному тліючому розряду. При подальшому збільшенні струму виникає аномальний тліючий розряд (ділянка *cd*). При струмі від одиниць до сотень і тисяч амперів розряд переходить у дуговий (ділянка *ef*).

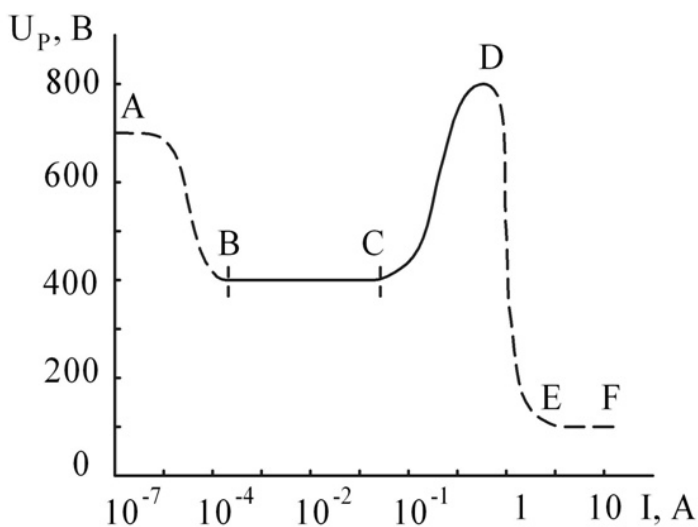


Рис. 1.1. Вольт-амперна характеристика електричних розрядів у газах

Оскільки при подальшому викладанні в основному буде розглядатись тліючий розряд, необхідно більш детально зупинитись на цій формі електричного розряду.

1.1.2. Тліючий розряд

Як вже відмічалось, тліючий розряд виникає після пробою міжелектродного проміжку при відносно низькому тиску газу і достатньо малому опорі зовнішнього кола. Тліючий розряд має характерний зовнішній вигляд. Простір між електродами представляє собою послідовність світлих та темних смуг. На рис. 1.2,а) схематично зображена послідовність їх розташування. Безпосередньо біля поверхні катоду розташований темний астоновий простір 1, обмежений також вузькою областю катодного світіння 2. Наступний за нею темний катодний простір 3 змінюється областю від'ємного тліючого світіння 4. Далі іде фарадеевий темний простір 5, який переходить в область позитивного стовпа 6. Перед анодом знаходиться вузька смуга анодного світіння і безпосередньо біля поверхні анода розташований темний анодний простір 7.

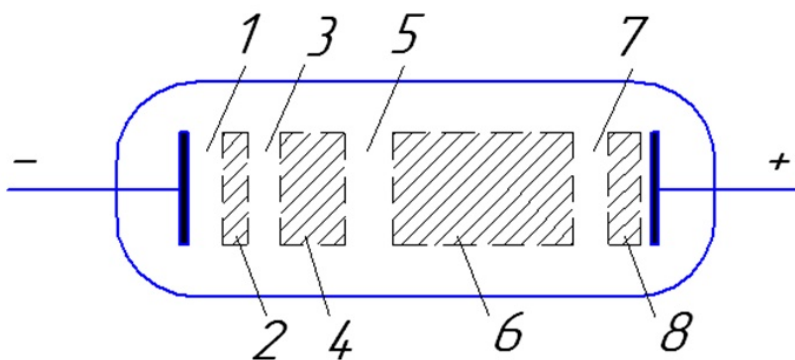
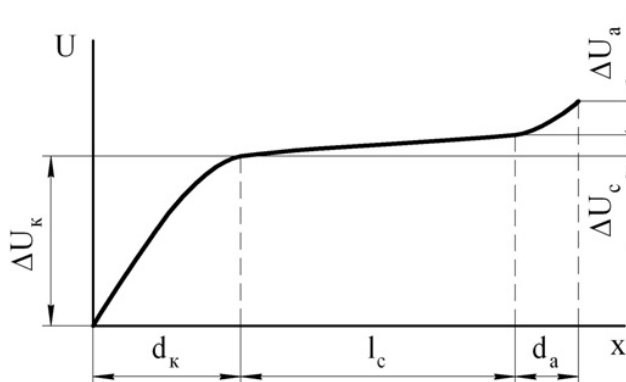


Рис.1.2. Структура (а) та розподіл потенціалу (б) по довжині тліючого розряду

а)



б)

Розподіл потенціалу уздовж розрядного проміжку, приведений на рис.1.2,б), свідчить, що поблизу катоду спостерігається стрибок напруги, що зветься катодним падінням потенціалу і який залежить від роду газу та матеріалу катоду. За величиною воно складає звичайно 150...400 В. Протяжність обла-

сті катодного падіння залежить від тиску газу і зі збільшенням останнього зростається.

Між величиною катодного падіння потенціалу та роботою виходу електрона матеріалу катода має певна залежність, на підставі якої роблять висновок, що катодне падіння потенціалу зв'язано із емісією електронів з поверхні катода.

В області, що розташовується за катодним падінням, напруга спочатку декілька знижується (в області фарадеева темного простору), а далі, в області позитивного стовпа змінюється практично лінійно із збільшенням відстані від катода. Перед анодом знов спостерігається стрибок напруги – анодне падіння потенціалу – за величиною значно меншою, ніж катодне падіння.

Збільшення або зменшення відстані між електродами призводить лише до відповідного збільшення або зменшення області позитивного стовпа. При відстані між катодом та анодом, що дорівнює або менше довжини темного катодного простору при рівних інших умовах, тліючий розряд існувати не може. Це явище застосовують на практиці для попередження горіння розряду на поверхнях, що не підлягають обробці. В області, розташованій безпосередньо поблизу катода, як вже відмічалось, спостерігається найбільш різка зміна потенціалу. В цій області здійснюється найбільше розсіювання енергії розряду, завдяки зіткненням іонів один з одним та з нейтральними молекулами. В результаті у цій області здійснюється найбільше нагрівання середовища. При цьому частина тепла передається катоду, що сприяє підвищенню його температури.

1.1.3. Елементарні процеси в тліючому розряді

Вивчення спектрального складу випромінювання різних областей тліючого розряду та співставлення цих даних із даними про розподіл потенціалу дозволили зробити висновок [44], що в основному усі процеси, які призводять до формування та підтримання тліючого розряду, зосереджені безпосередньо поблизу поверхні катода. Позитивний стовп суттєвого значення в формуванні тліючого розряду не має. Його роль зводиться до ролі струмопроводу.

В першому наближенні мікроскопічна картина процесів, що протікають в тліючому розряді, має наступний вигляд. Позитивні іони газу, прискорені в області катодного падіння потенціалу, безперервно бомбардують поверхню катода і вибивають з нього електрони. Енергія електронів безпосередньо у поверхні катода недостатня для збудження або іонізації молекул газу. Для отримання енергії, достатньої для збудження молекул, електрони повинні пройти в полі падіння напруги певну відстань. Тому перша область розряду, що світиться, відділена від катода темним простором.

При подальшому русі електронів в області катодного світіння їх енергія продовжує збільшуватись. Накопичення енергії електронами призводить до того, що більш імовірною становиться іонізація молекул, ніж їх збудження. Тому слідом за областю катодного світіння розташована область катодного темного простору, у якій здійснюється інтенсивна іонізація з утворенням позитивних іонів та вільних електронів. В результаті іонізуючих зіткнень електрони втрача-

ють частину своєї енергії. Рухаючись в напрямку аноду, електрони знов отримують енергію, достатню для збудження молекул. В результаті з'являється нова область, що світиться – область від'ємного тліючого світіння. Втрата електронами частини своєї енергії в цій області призводить до того, що слідом за нею з'являється темний фарадеевський простір, за яким в загальному випадку спостерігається позитивний стовп розряду, який також світиться.

Наявність позитивного стовпа не є обов'язковою умовою існування тліючого розряду. Якщо анод розташований близько до катоду, то фарадеевський темний простір може розповсюджуватись до аноду і лише біля самої поверхні аноду буде розташована вузька смуга анодного світіння.

Таким чином, для існування тліючого розряду при кожному тиску газу необхідна певна мінімальна міжелектродна відстань.

Тиск та міжелектродна відстань визначають напругу запалювання розряду, причому остання залежить тільки від добутку величин тиску газу та міжелектродної відстані. Це так званий закон Пашена [174]. Цей закон добре виконується для всіх газів при тисках від 1 до 10^5 Па. Залежність напруги запалювання для деяких газів від добутку тиску p та міжелектродної відстані d наведена на рис. 1.3. Ці залежності називають кривими Пашена.

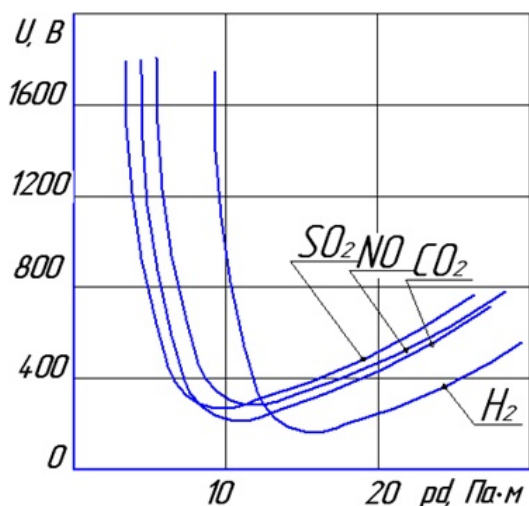


Рис. 1.3. Характеристики запалювання розряду (криві Пашена) для деяких газів

Позитивний стовп виникає в тому випадку, коли відстань між електродами більше мінімально необхідної для існування тліючого розряду. Його виникнення пов'язане із зростанням енергії електронів на кінці фарадеева темного простору до значень, достатніх для збудження та іонізації молекул газу. Постійна величина падіння напруги на довжині позитивного стовпа встановлюється такою, щоб у стаціонарних умовах горіння розряду зберігалась рівновага між процесом нейтралізації іонів (на стінках розрядного пристрою або завдяки об'ємній рекомбінації) та процесом їх народження (іонізації). Така рівновага свідчить, що частинки із позитивним та від'ємним зарядами присутні в однаковій кількості. Достатньо висока електропровідність позитивного стовпа викликана значною густиною заряджених часток, яка досягає $10^{12} \dots 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Такий стан газоподібної матерії, що має високу концентрацію заряджених часток, але в цілому є електрично нейтральною, називають плазмою.

В результаті багатократних зіткнень та обміну енергією електронів з іонами в позитивному стовпі встановлюється такий розподіл швидкостей електронів, який є достатньо близьким до теплового максвелівського розподілу. Це дозволяє встановити для електронів деяку температуру (електронну температуру), величина якої визначається найбільш імовірним значенням їх кінетичної енергії. Кінетична енергія електронів в позитивному стовпі тліючого розряду значно перевищує кінетичну енергію іонів, що мають більшу масу. Тому, якщо порівнювати електронну температуру і температуру газу в стовпі, що визначається енергією іонів, то перша буде перевищувати другу майже в 100 разів. Так, при тиску газу порядку 1 кПа електронна температура в позитивному стовпі досягає десятків тисяч градусів, в той час як температура газу не перевищує сотень градусів. Це свідчить про те, що плазма в тліючому розряді неізотермічна. Із збільшенням тиску обмін енергією між протилежно зарядженими частками зростає завдяки збільшенню кількості числа зіткнень. В результаті електронна температура зменшується, а температура газу підвищується і плазма перетворюється у ізотермічну. Такою є плазма в дуговому розряді при тиску рівному або вище атмосферного.

В тліючому розряді існує направлений перенос речовини. З катодної області електрони уходять у позитивний стовп. Зворотній потік повністю відсутній.

1.1.4. Різновиди тліючого розряду

Нормальний, піднормальний та аномальний тліючі розряди. Коли тліючий розряд підтримується між двома плоскими електродами при тисках газу від одиниць до тисяч паскалів, падіння потенціалу в розряді встановлюється в залежності від струму розряду так, як показано на рис. 1.1. В інтервалі декількох порядків величини струму (орієнтовно $10^{-3} \dots 1$ А) спостерігається постійне падіння потенціалу. При цьому густина струму біля катоду залишається, з достатньою мірою точності, постійною, тобто площа катодної плями розряду збільшується пропорційно зростанню струму (рис. 1.4а). Це називається областю нормального падіння потенціалу. Коли струм зменшується настільки, що діаметр катодної плями стає одного порядку із довжиною катодного простору, катодне падіння починає збільшуватись. Це пояснюється тим, що при такому зменшенні діаметру розряду зростають витрати зарядів внаслідок радіальної дифузії. Густина струму на катоді знижується і зменшується емісія електронів з катоду. Для збереження стаціонарного стану необхідне збільшення катодного падіння. Це – область піднормального катодного падіння, при якому розряд часто стає переривчастим.

З іншої сторони, коли вся поверхня катоду оказується покритою світінням (рис. 1.4б), збільшення струму може бути досягнуто лише за рахунок збільшення густини струму. Для цього необхідне збільшення емісії катоду, що призводить водночас до зростання катодного падіння. При цьому темний простір зужується. Це – область аномального катодного падіння.

Утруднений тліючий розряд. Якщо наближати анод до нерухомого катода (при постійному струмі розряду), то анодне падіння зникає, коли анод досягає зони від'ємного світіння. При подальшому зменшенні відстані потенціал починає зростати, поки анод не попаде в темний прикатодний простір. Це може означати те, що коли розряд обмежений простором (рис. 1.4в), довжина якого недостатня для появи темного простору і частини зони світіння, іонізація стає утрудненою. Для підтримання розряду необхідне зростання падіння напруги на ньому.

Розряд із порожнистим катодом. Якщо зменшувати відстань між двома плоскими катодами тліючого розряду (анодом може бути, зокрема, кільце значного діаметру), зберігаючи напругу на розряді постійною, то густина струму буде зростати (рис. 1.4г). Збільшення густини струму починається тоді, коли два окремих від'ємних світіння починають зливатися. При цьому інтенсивність світіння зростає, а густина струму стає в $10^2 \dots 10^3$ разів вище, ніж при нормальних умовах. Замість двох плоских катодів зазвичай застосовують циліндричний катод.

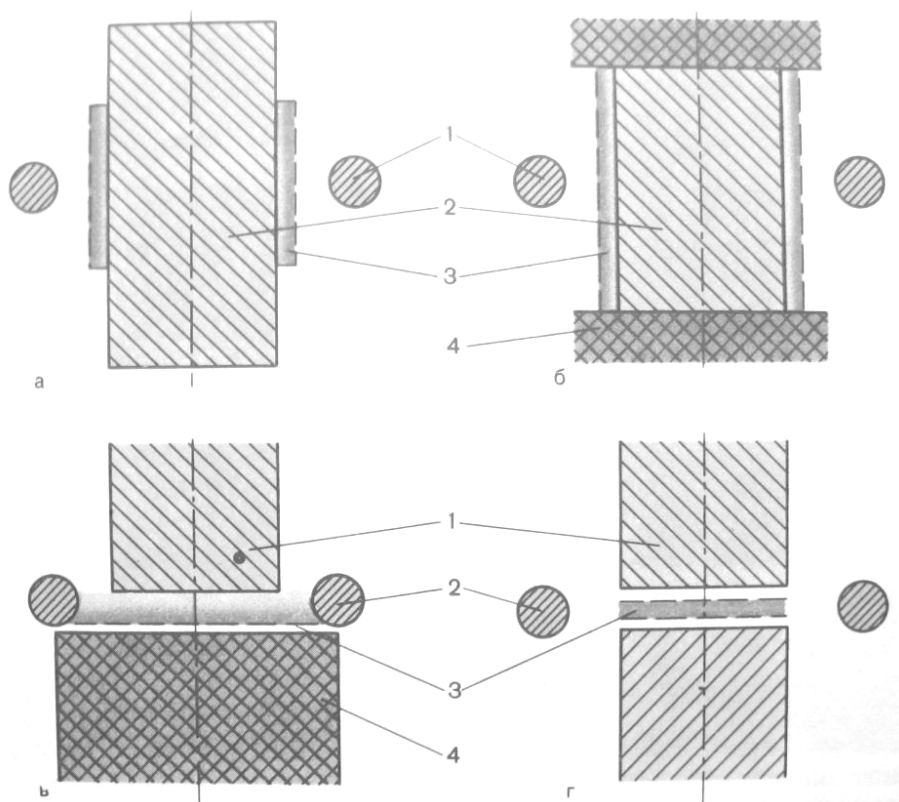


Рис. 1.4. Схематичне зображення різних видів тліючого розряду
(1– катод, 2– анод, 3– від'ємне тліюче світіння, 4– діелектрик)

1.2. Застосування тліючого розряду в технологічних процесах

Тліючий розряд при середніх тисках 0,1 ... 100 кПа використовують для безпосереднього впливу на оброблюваний матеріал [14, 46, 47, 76], для отримання електронних [126, 131] та світлових пучків [1, 55, 96].

У промисловості тліючий розряд при тисках 0,1 ... 1000 Па застосовують для нанесення покриттів катодним розпиленням [3, 148], травлення кремнію при виробництві мікроелектронних приладів [65, 69], хіміко-термічної обробки виробів [46, 118]. Проведено лабораторні дослідження процесів осаджування металів з газової фази [13, 143], 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 у промислових умовах для азотування сталей досягає 100 кВт [14].

Спроби застосування тліючого розряду для зварювання, паяння, переплаву та спікання були виконані в 60 - 70-х роках минулого сторіччя. Вперше можливість дифузійного зварювання в аномальному тліючому розряді обґрунтована в роботі [51], коли при густині струму розряду 0,15 А/см² і напрузі 2500 В в середовищі ацетону та вуглеводнів була отримана температура деталей 1273 ... 1473 К. Можливість паяння срібним припоєм в середовищі водню при тиску до 6,65 кПа у сталому тліючому розряді показана в роботах [43, 71]. У цей же період проведені експерименти [181] по зонному рафінуючому плавленню кремнію та заліза у водні при тисках 10,64 ... 23,94 кПа, струмі близько 1 А і різниці потенціалів між катодом (виробом) і рухомими пластинчастими анодами приблизно 500 В. Відзначалися простота і ефективність обладнання, економічність процесу, висока якість кремнію, рафінованого таким способом. Висока економічність процесу нагрівання тліючим розрядом відзначалася і в багатьох інших роботах [76, 100]. Успішно закінчилися експерименти по наплавленню в тліючому розряді [52] твердих сплавів на зразки з інструментальних і конструкційних сталей на повітрі та в парах вуглеводнів при тиску 0,39 ... 2,0 кПа, напрузі на розряді 300 ... 400 В і густині струму 20 ... 40 мА/см².

В основному, нагрівання при дифузійному зварюванні здійснюється нормальним тліючим розрядом (рис. 1.1), що горить в газовому середовищі при тисках 1,33 ... 26,6 кПа і напрузі 300 ... 600 В між електродами, одним з яких - катодом, є деталі, що зварюються. При роботі з нормальним тліючим розрядом металева вакуумна камера і виріб заземлені, а металевий анод (дротяний або пластинчастий) виконується у вигляді контуру, відповідного формі перетину деталей, що нагрівається.

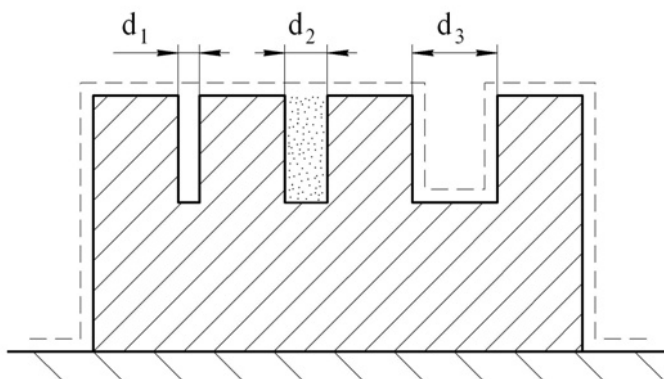
Нагріванню катода (зварюваних заготовок) сприяє нерівномірний розподіл електричного потенціалу по довжині розрядного проміжку - значне падіння напруги, що становить 150 ... 250 В для найбільш характерних зварюваних матеріалів і газових середовищ [44], спостерігається в прикатодній області розряду (рис. 1.2б). Катодне падіння потенціалу створює в прикатодній

області значне електричне поле $10^6 \dots 10^8$ В / м, яке прискорює діє на іони, що бомбардують катод.

Механізм нагрівання катода в тліючому розряді, який отримав назву теорії локального нагріву, був запропонований ще в 1923 році П. Л. Капіцею: енергія падаючого прискореного іона передається невеликій групі атомів кристалічної ґратки, температура цієї ділянки поверхні різко зростає. Внаслідок високої теплопровідності металів температура цієї локально нагрітої ділянки швидко падає і середня температура катода підвищується в процесі бомбардування відносно повільно [94].

В роботі [19] зазначається, що при тисках газу близько 1,33 кПа і струмах розряду більше 1А, відповідних режиму хіміко-термічної обробки, нагрівання катода відбувається в результаті сумарної дії бомбардування оброблюваної поверхні зарядженими частинками і випромінювання іонізованого середовища.

При прямому нагріванні плазмою тліючого розряду межелектродна відстань встановлюється у межах 0,005 ... 0,015 м. В цих умовах при тисках газу 1,33 кПа і вище, значна частка енергії розряду виділяється в прикатодній зоні, звідки на катод у вигляді теплової енергії передається до 80 ... 85% [49].

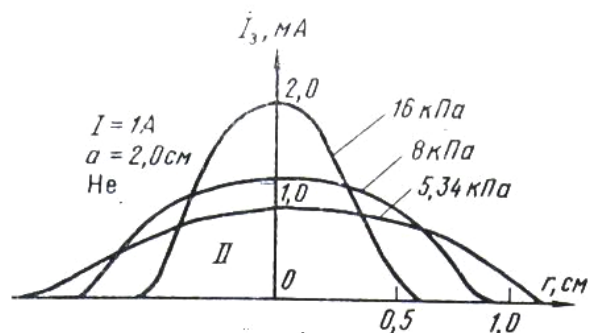


$$d_1 < d_k; \quad d_k < d_2 < 2d_k; \quad d_3 > 2d_k$$

Рис.1.5. Розташування катодної плями тліючого розряду по поверхні та порожнинах на катоді (d_k – протяжність області катодного падіння потенціалу)

В процесі нагріву катодна пляма розряду розподіляється по поверхні виробу (рис. 1.5), покриваючи всі виступи і проникаючи в отвори і щілини, розмір яких перевищує подвоєну товщину зони катодного падіння потенціалу. В роботі [110] показано, що густина струму в катодній плямі розряду має нормальну форму розподілу. Максимум її знаходиться в точках, найбільш близьких до аноду. Тому анод повинен розташовуватися еквідистантно щодо поверхні нагрівання.

Рис. 1.6. Характер розподілу густини струму по радіусу катодної плями тліючого розряду



Змінюючи форму анода можна регулювати характер нагріву перерізу деталі, уникаючи перегріву виступаючих частин. У тих випадках, коли міжелектродна відстань сумірна із розмірами перерізу деталей, залежність між формою анода і катода зменшується або повністю зникає. Це дає можливість застосовувати для нагріву складних перерізів аноди відносно простих форм (рис. 1.7). Такий взаємозв'язок форми анода і катода є цінною технологічною властивістю тліючого розряду, що забезпечує його адаптивність до мінливої номенклатури зварюваних виробів.

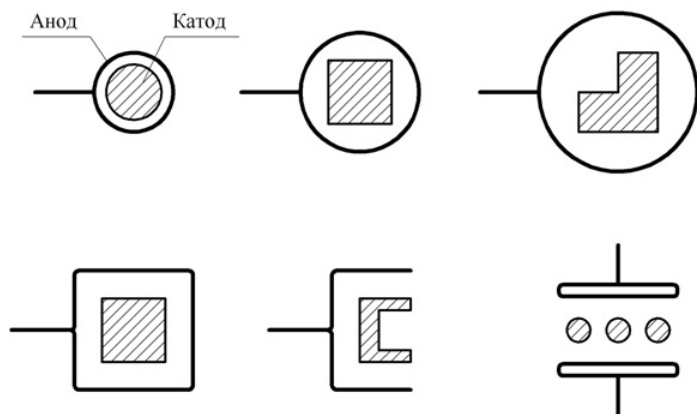


Рис. 1.7 Різновиди форм анодів тліючого розряду

Специфічною властивістю тліючого розряду як джерела поверхневого нагріву є можливість зміни в широких межах площі розподілу S_n і питомої густини q енергії, що вводиться у виріб. Ця властивість тліючого розряду обумовлена нормальною густиною струму J_n [67], значення якої визначаються як природою газу, так і матеріалом катода і змінюються в залежності від тиску газу в діапазоні від 10^{-3} мА/см² до 1 А/см². Зі збільшенням тиску газу зростає густина струму на катоді і, відповідно, інтенсифікується процес нагрівання тліючим розрядом. При незмінному тиску збільшення струму тягне за собою пропорційне розширення площі зони нагріву при практично незмінній густині струму у неї.

Інтенсивне бомбардування катода прискореними іонами і швидкими атомами призводить, як показано в роботах [130, 155], до розпорошення твердосплавних зварюваних матеріалів за час зварювання на глибину до сотих долей міліметра. Таке ушкодження поверхні неістотне, оскільки при кінцевих операціях (шліфування, полірування) знімаються шари матеріалу, що набагато перевищують за товщиною шар, пошкоджений іонним бомбардуванням. Останнім часом ефект катодного розпилення під дією іонного бомбардування в тліючому розряді знаходить позитивне застосування для очищення та активації зварюваних поверхонь [13, 113].

Робочим середовищем при іонному нагріванні може бути будь-яке газоподібне середовище, яке забезпечує необхідний або припустимий вплив на матеріали, що нагріваються. Найбільш широко використовують азот, водень, інертні гази (аргон, гелій), аміак, природні гази. Витрата газу є незначною, оскільки його тиск у камері істотно нижче атмосферного, а оновлення газу в ході технологічного процесу зварювання або паяння не потрібне. Це дозволяє в одній камері послідовно, варіюючи тиск газу проводити різні технологічні опе-

рації: іонне очищення, зварювання, хіміко-термічну обробку поверхневих шарів виробів [88]. Можливість використання газових середовищ, що володіють різною активністю до зварюваних матеріалів, забезпечує застосованість іонного нагріву практично для більшості матеріалів, що з'єднуються способом дифузійного зварювання. На даний час тліючий розряд, як джерело нагрівання, використовується в промислових умовах для отримання нероз'ємних з'єднань низьковуглецевих, інструментальних і легованих сталей в різних поєднаннях [77, 99], сталей з твердими сплавами [75, 154], кольорових металів і сплавів [51, 105], тугоплавких металів [77, 100].

Застосування низького вакууму при зварюванні в тліючому розряді дозволяє істотно спростити обладнання, але в той же час обмежує можливості іонного нагрівання при зварюванні активних металів - алюмінію, магнію та їх сплавів.

Плавність регулювання інтенсивності і локальності нагріву тліючим розрядом в широких межах дозволяє здійснювати точне і плавне регулювання термічного циклу, що є особливо важливим при зварюванні металів з неметалами (склом, керамікою і т.д.) [100]. Велика площа плями нагріву обумовлює застосування тліючого розряду для зварювання виробів складної форми з розвиненою поверхнею контакту [40], а порівняно невисока питома потужність дає можливість ефективно використовувати іонне нагрівання для одержання зварних тонкостінних і стільникових конструкцій [33].

Здатність тліючого розряду проникати в отвори і щілини, розмір яких більше сумарної товщини області катодного падіння потенціалу і негативного тліючого світіння [109], дозволяє застосовувати іонний нагрів і в тих випадках, коли необхідно нагрівати виріб зсередини (зварювання трубчастих виробів, судин і т.д.).

Завдяки простоті схеми нагрівання тліючий розряд як джерело нагріву відрізняється технологічною гнучкістю і гарною адаптивністю до зміни типорозмірів деталей, що зварюються. Переналагодження полягає у швидкій зміні нероз'ємних анодів, або встановлення необхідної міжелектродної відстані при використанні рухливих анодів. Внаслідок цього, зварювання в тліючому розряді виявляється економічно вигідним не тільки в серійному і дрібносерійному [43, 76, 116], а й в одиничному [183] та ремонтному виробництві, зокрема, при реставрації твердосплавного ріжучого інструменту [75].

На відміну від дифузійного зварювання застосування тліючого розряду в якості джерела енергії в процесах паяння до цього часу не отримало широкого розповсюдження, про що свідчить досить обмежена кількість публікацій з цієї тематики. Тим не менш, як у ранніх [43, 71], так і в більш пізніших роботах [81, 82] відзначається, що паяння в тліючому розряді – екологічно чистий, ресурсозберігаючий, перспективний технологічний процес, який може бути використаний у різних галузях машинобудування. Зокрема, в роботі [71] встановлено, що продуктивність процесу паяння вузлів електровакуумних приладів у тліючому розряді в два рази вище, ніж у водневій печі при істотно менших витратах електроенергії.

В цілому, слід зазначити, що застосування тліючого розряду як джерела поверхневого нагріву для зварювання та паяння виявило його ефективність завдяки широкому діапазону регулювання технологічних параметрів, різноманітності їх взаємозв'язків, широким технологічним можливостям, а також простоті обладнання, малим капітальним витратам, доброї адаптивності розряду до мінливої номенклатурі виробів і високій енергетичній ефективності джерела нагрівання. Так, обладнання для нагріву в тліючому розряді в 5 ... 6 разів дешевше, ніж для нагріву струмами високої частоти [100], що істотно скорочує термін його окупності.

2. ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ СЕРЕДНІХ ТИСКІВ

2.1. Характеристика процесу нагріву тліючим розрядом в умовах зварювання як об'єкта керування

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, що впливають на його функціонування [170].

В умовах нагріву тліючим розрядом деталі, що зварюються, є одним з електродів розряду – заземленим катодом. Катодна пляма, через яку здійснюється введення теплової енергії в 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:

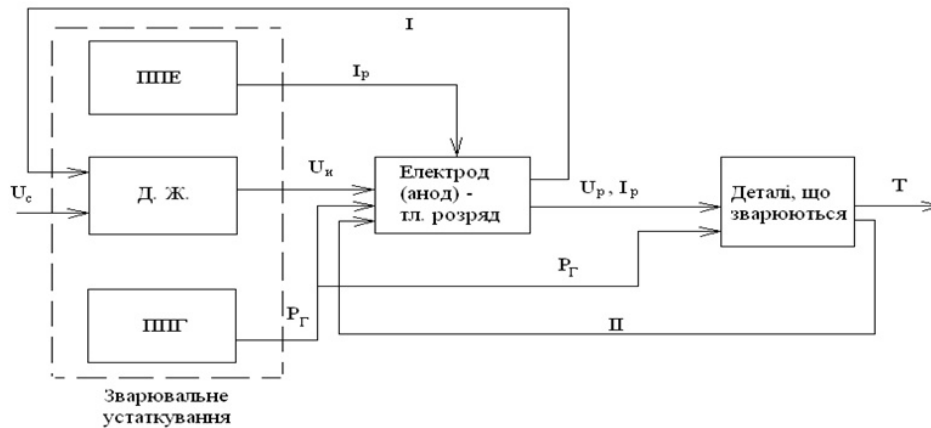
1) нагрів зварних з'єднань (зварного контакту) здійснюється за допомогою теплопровідності від зовнішньої поверхні виробу, що сприймає енергію джерела тепла;

2) нагрівання деталей, що зварюються, пов'язане у багатьох випадках із одночасним нагріванням пристосувань, які забезпечують їх стиснення, що призводить до зростання непродуктивних витрат електроенергії і зниження енергетичної ефективності процесу;

3) форми та площі поверхонь, що сприймають теплоту від джерела нагрівання, є досить різноманітними.

Для зниження втрат енергії зварювальний нагрів здійснюють, як правило, нормальним тліючим розрядом, в якому катодна пляма має обмежені розміри, що зменшує об'єм деталей, що 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-променево, електрошлакове та ін.), що включають термічну складову, може бути представлений як результат функціонування системи "джерело живлення – джерело нагріву – виріб" і з урахуванням можливих функціональних взаємозв'язків між окремими її елементами може бути представлений у вигляді двохконтурної електротермічної системи (рис. 2.1):



Д.Ж. – джерело живлення розряду, ППГ – пристрій подачі робочого газу, ППЕ – пристрій переміщення електроду (аноду) розряду

Рис.2.1 - Схема управління нагріванням у тліючому розряді

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 Д.Ж. й пристрою подачі газу УПГ 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, що 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 в себе тліючий розряд та деталі, що зварюються, і характеризує вплив режиму горіння тліючого розряду на температурний стан останніх. Параметрами режиму горіння розряду і 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 поверхнях 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 в процесі зварювання або паяння кожен з елементів, представлених у схемі, функціонує в умовах збурень, які можуть носити тривалий, короточасний, 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 при зварюванні і паянні з урахуванням характеру їх зміни і місця, в якому вони виникають, можна розділити на дві групи (таблиця 3.1):

- 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 в процесі нагріву.

Таблиця 2.1.

Основні збурення, що порушують стабільність енерговиділення тліючого розряду

№ п/п	Характер збурення	Місце виникнення (прикладання)	Характер зміни
1. 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
2. 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

тягне за собою нестабільність теплового стану деталей в 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 в процесі зварювання або паяння, що призводить до його розширення і 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 неправильне встановлення електродів розряду відносно один одного, або зміна міжелектродної відстані в процесі нагріву внаслідок термічної деформації електродного вузла, що може призводити до локальних флуктуацій струму на ділянках найменшої протяжності позитивного стовпа, що викликає місцевий перегрів та оплавлення поверхні 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 в зоні розташування катодної плями розряду, яка сприяє спотворенню електричного поля на вершинах мікронерівностей, а також, появі емісійної плямистості поверхні деталей, що призводять до утворення окремих короткочасних 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, в зоні дії тліючого розряду неприпустима наявність на поверхні деталей щілин і зазорів певних розмірів, у які може проникати катодна пляма розряду, оскільки це може призводити до формування розряду у порожнистому катоді з підвищеною густиною струму, здатною перегрівати та оплавляти деталі. 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 в процесі нагріву і одночасного стиснення деталей. Основна причина полягає в порушенні співвісності дії зусилля, що стискає деталі, й геометричної вісі 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 із недосконалістю конструкції зварного вузла, що сприяє зміні форми деталей при нагріванні 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 призводять 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.

2.2. Енергетичний баланс на катоді тліючого розряду в умовах зварювання та паяння

Найважливішою характеристикою процесу нагріву є теплообмін між джерелом енергії і виробом, який визначає кількість теплоти, що вводиться в оброблювані деталі за одиницю часу (ефективна теплова потужність) і ефективний ККД процесу нагріву. Визначення цих показників є необхідною умовою раціонального вибору режимів нагріву, визначення шляхів підвищення його енергетичної ефективності і продуктивності, особливо в умовах різноманіття типових конструкцій і форм зварних з'єднань і вузлів. Вирішення цієї задачі передбачає, насамперед, знання механізму нагріву даним джерелом, його теплофізичних і енергетичних особливостей.

У технологічних процесах оброблювані або з'єднувані деталі є одним з електродів розряду – катодом, в катодній плямі на поверхні якого здійснюється перетворення електричної енергії тліючого розряду в теплову.

Механізм нагріву визначається режимом горіння тліючого розряду і є неоднаковим для різних технологічних процесів. Вважають, що при тисках газу в робочій камері менше 1 кПа, характерних для хіміко-термічної обробки, нагрівання виробу здійснюється або в результаті бомбардування оброблюваної поверхні іонами газу, прискореними в області катодного падіння потенціалу [153], або в результаті спільної дії іонного бомбардування і випромінювання іонізованого газового середовища [14].

Таке припущення зроблено, очевидно, на підставі результатів роботи [86], де встановлено, що при тисках газу 0, 1 ... 1 кПа до 80 ... 85% потужності, що виділяється в позитивному стовпі розряду, витрачається на збудження атомів газу і перетворюється далі у вигляді променистої енергії. Як впливає з результатів робіт [62, 63, 86], зазначеним тискам відповідають порівняно невисокі температури газу в області плазми позитивного стовпа розряду (менше 10^3 К) і в цих умовах теплова складова втрат з цієї області мала в загальному балансі енергії розряду.

Теплова енергія, що виділяється в тліючому розряді q_p , залежить від струму розряду I , падіння напруги на розряді U_p , складу газу i , в загальному випадку, визначається як

$$q_p = I U_p = I (U_k + U_c + U_a),$$

де U_k, U_a, U_c - відповідно, падіння напруги в катодній, анодній областях і позитивному стовпі розряду.

Ця енергія витрачається на нагрівання електрода (анода), передається шляхом теплообміну зварюваним деталям (катоду), розсіюється в навколишньому просторі.

Втрати теплової енергії в катод $q_{нк}$ складаються з теплоти q_i , що виділяється в активній (катодній) плямі при бомбардуванні її позитивними іонами, прискореними в області катодного падіння потенціалу, і теплоти, отриманої катодом внаслідок теплообміну зі стовпом розряду $q_{ск}$:

$$q_{нк} = q_i + q_{ск}$$

Потік енергії, що переноситься іонами на катод, буде складатися з потенційної енергії іонізації і кінетичної енергії прискорених в катодній області іонів, що визначаються, відповідно, потенціалом іонізації газу U_i та величиною катодного падіння потенціалу U_k . Передана енергія наближено описується виразом [56]

$$(2.1) \quad q_i = I (1 - \gamma) (U_k - U_i - \varphi_k),$$

де γ - частка електронного струму в катодній області;

φ_k - робота виходу матеріалу катода, яка для більшості металів складає 4 ... 6 еВ.

Катодне падіння потенціалу в тліючому розряді для різних газів складає 150 ... 400 В, що значно перевищує потенціал іонізації використовуваних при зварюванні і паянні газових середовищ $U_i = 15 \dots 25$ В і тим більше, роботу виходу електронів. Коефіцієнт вторинної електронної емісії $\gamma = 0,01 \dots 0,1 \ll 1$ [174] і, відповідно, електронний струм в катодній області дуже малий. Тому з достатньою точністю можна вважати, що з прикатодної області розряду на катод передається, в основному, кінетична енергія спрямованого руху іонів

$$(2.2) \quad q_i \approx IU_k.$$

Зварювальний нагрів здійснюється зазвичай при тисках газу 4 ... 20 кПа, коли частка потужності, що втрачається електронами на збудження і витрачається потім у вигляді променистої енергії, помітно знижується [86] і не перевищує 5 ... 10% від загальної потужності розряду. У той же час, як показано в роботах [95,96,171], при підвищених тисках зростає температура нейтрального газу в позитивному стовпі розряду, досягаючи 2000 ... 3000 К при тисках більше 5 ... 10 кПа. У цих умовах стає можливим передача частини його теплової енергії катоду, як масивному і досить активному тепловому стоку, температура якого в умовах зварювання завжди нижче температури нейтрального газу в стовпі. Теплообмін здійснюється через область катодного падіння потенціалу, протяжність якої при зазначених тисках зменшується до часток міліметра [146].

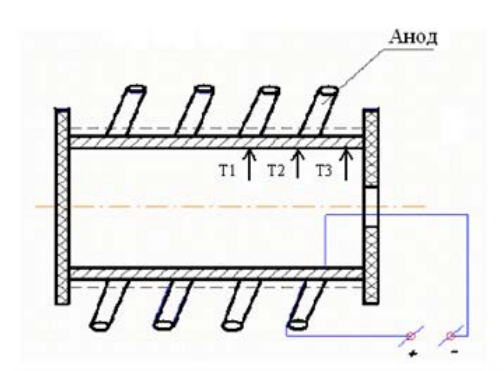
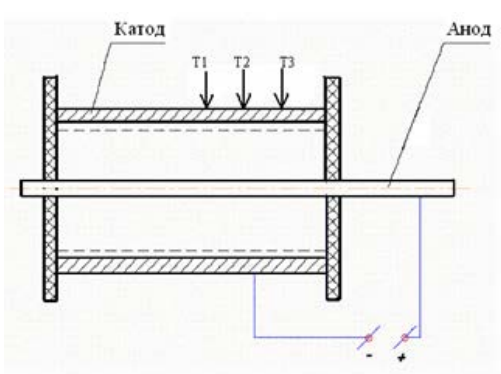
Передача теплоти від позитивного стовпа катода через прикатодну область може здійснюватися, в першу чергу, за допомогою теплопровідності газу. Конвективна складова теплообміну практично відсутня, оскільки прокачування газу через камеру в процесі зварювання не проводиться.

Таким чином, можна констатувати, що в умовах зварювання у тліючому розряді нагрівання катода здійснюється як бомбардуванням його прискореними іонами газового середовища, так і передачею йому, за допомогою теплопровідності прикатодної зони, частини теплоти, що виділяється у позитивному стовпі розряду.

Якщо складова в балансі енергії на катоді, обумовлена бомбардуванням катода іонами, визначається електричними параметрами - струмом розряду і величиною катодного падіння потенціалу і може бути досить точно визначена, то теплову дію позитивного стовпа на деталі й можливість керування нею в процесі нагріву розрахунковими методами визначити важко внаслідок невизначеності коефіцієнта теплопровідності розрідженого газу, фактичної величини тиску розігрітого газу поблизу катода і, відповідно, протяжності прикатодної зони.

Для кількісної оцінки частки енергії позитивного стовпа тліючого розряду, що бере участь у нагріванні катода в умовах зварювання і залежності її від параметрів режиму використана методика, за якою плазмою тліючого розряду нагрівали порожнистий циліндричний сталевий катод, відкриті бічні торці якого закривалися теплоізолюючими неелектропровідними екранами, по черзі з середини і ззовні [36]. У першому випадку (рис. 2.2а) анод розташовується всередині катода, розряд горить у замкненому об'ємі і практично вся енергія, що виділяється в розряді, за винятком невеликої частини, що виділяється в анодній області розряду і витрачається на нагрівання аноду, сприяє нагріванню катода.

У другому випадку дротяний спіральний анод розташовувався ззовні катода еквідистантно його поверхні на тій же відстані, що і в попередньому випадку (рис. 2.2 б). Торці катода також закривалися теплоізолюючими екранами для запобігання проникнення розряду всередину катода. У цих умовах можна припустити, що, порівняно з першим



варіантом, нагрівання катода виявиться менш інтенсивним з огляду на те, що частина енергії позитивного стовпа розряду буде за допомогою теплопровідності витрачатися на нагрів навколишнього нейтрального газу.

а)

б)

T - точки контролю температури, пунктиром показано розташування катодної плями розряду

Рисунок 2.2 - Схеми нагріву порожнистого катоду тліючим розрядом зсередини (а) і ззовні (б).

Виходячи зі сказаного, можна записати для першого варіанту рівняння балансу енергії на катоді:

$$W_k + W_c = Q_1, \quad (2.3)$$

де W_k - електрична енергія, що виділяється в прикатодній області розряду і визначається згідно виразу (2.2);

W_c - електрична енергія, що виділяється в позитивному стовпі розряду;

Q_1 - тепла енергія, сприйнята катодом.

Для другого варіанту нагріву рівняння балансу буде дещо відрізнятися:

$$W_k + \alpha W_c = Q_2, \quad (2.4)$$

де α - коефіцієнт, що враховує частку енергії позитивного стовпа, що бере участь у нагріванні катода;

Q_2 - енергія, що сприймається катодом при такому способі нагріву.

Інші позначення у виразі (2.4) аналогічні попередньому виразу.

Визначити коефіцієнт α можливо з різниці виразів (2.3) та (2.4):

$$(W_k + W_c) - (W_k + \Delta W_c) = Q_1 - Q_2 = \Delta Q,$$

$$\text{звідки } \alpha = 1 - \Delta Q / W_c. \quad (2.5)$$

Енергія, сприйнята катодом від розряду, витрачається в обох випадках як на підвищення його теплоємності Q_t , так і на випромінювання Q_u з бічної поверхні в навколишній простір, тобто:

$$Q_{1, 2} = Q_t + Q_u. \quad (2.6)$$

Енергія, що накопичується в катоді за час нагріву, визначається як

$$Q_t = cm T_k / \tau, \quad (2.7)$$

де c , m - відповідно, питома теплоємність і маса катода;

τ - час нагрівання;

T_k - середня по об'єму температура катоду до моменту завершення нагріву.

Енергія, що втрачається катодом за рахунок випромінювання:

$$Q_u = E \sigma_0 [(T_k / 100)^4 - (T_0 / 100)^4] S_k, \quad (2.8)$$

де $E = 0,8$ - ступінь чорноти, прийнята для окисленої сталі;

σ_0 – постійна Стефана-Больцмана;

$T_0 = 293$ К - температура водоохолоджуваних стінок робочої камери;

S_k – площа бічної поверхні порожнистого сталевого циліндра, що виконував у досліді роль катода.

Нагрів в здійснювали в середовищі азоту і гелію, тобто газів, що істотно різняться теплофізичними характеристиками, до досягнення катодом граничного теплового стану $\delta T_k / \delta \tau \approx 0$. Вважали, що цьому стану відповідає зміна температури катода в процесі нагріву, яка не перевищує 1% за контрольований відрізок часу.

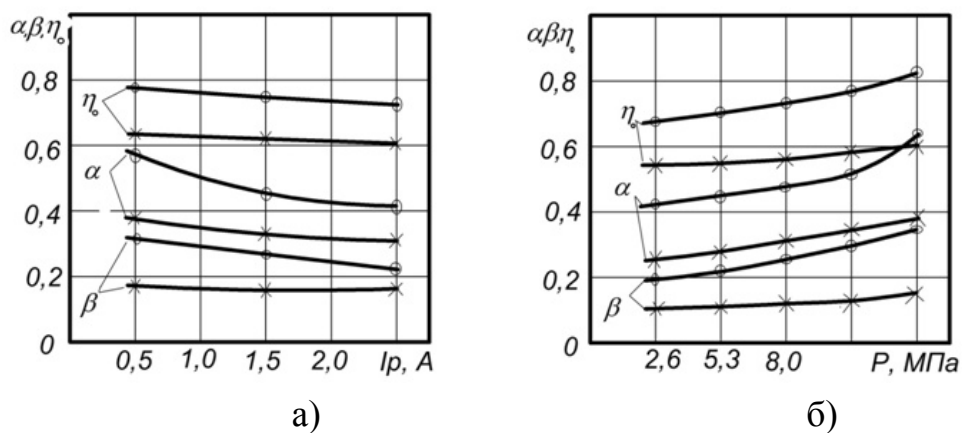
Визначення коефіцієнта α , виконане за описаною методикою, показує, що його величина в значній мірі залежить як від основних параметрів режиму - струму розряду і тиску газу, так і від характеристик газового середовища (рис. 2.3), і досягає значень 0,25 ... 0,6. Це свідчить про досить інтенсивний теплообмін між позитивним стовпом розряду і катодом, коли до половини енергії, що виділяється в стовпі, витрачається на нагрівання катода (деталей), що в загальному балансі енергії на поверхні останнього становить $\beta = \alpha W_c / W_p = 0,2 \dots 0,4$.

Таким чином, роль плазми позитивного стовпа в нагріванні катода при зварюванні в тліючому розряді, поряд із нагріванням катода внаслідок бомбардування його іонами, виявляється дуже істотною і повинна враховуватися в енергетичному балансі тліючого розряду середніх тисків.

Сумарна дія на катоді двох джерел теплоти забезпечує підвищення ефективності нагріву, що характеризується ефективним к.к.д. джерела енергії η_0 , значення якого в даному випадку може бути орієнтовно визначене як

$$\eta_0 = (W_k + \alpha W_c) / W_p \quad (2.9)$$

Зміною характеристик теплообміну між позитивним стовпом розряду і катодом, що визначаються величиною коефіцієнта α , можливо плавно регулювати тепловий потік на поверхні зварюваних деталей, що розширює можливості керування енергетичними характеристиками джерела.



× – гелій; ○ – азот

Рис. 2.3 - Залежність ефективного к.к.д. нагріву η_0 і коефіцієнтів α та β від струму розряду (а) та роду і тиску газу (б) (умовні позначення в тексті)

2.3. Керування енергетичними характеристиками тліючого розряду

До основних енергетичних характеристик розряду відносять: повну потужність $W = IU_p$, величину середнього питомого об'ємного енерговкладу jE в об'ємі позитивного стовпа розряду і питому потужність $q = jU_k$ у катодній плямі розряду, розташованій на поверхні деталей в зоні нагріву, обумовлену бомбардуванням цієї поверхні прискореними іонами (тут j , U_k , E , відповідно, густина струму в катодній плямі, величина катодного падіння потенціалу і напруженість електричного поля в стовпі розряду).

Питомий об'ємний енерговклад jE визначає частку енергії позитивного стовпа, що надходить через прикатодну область розряду до зварюваних деталей і сприяє їх нагріванню. Питома електрична потужність q , що виділяється в катодній плямі, характеризує в свою чергу, як густину теплового потоку на поверхні деталей, так і їх ефективний об'єм, що піддається безпосередньому нагріванню.

Специфічною особливістю тліючого розряду як поверхневого джерела нагріву є можливість плавного регулювання площі плями нагрівання S_n і густини потоку q теплової енергії, що вкладається у виріб. Ці властивості зумовлені густиною струму в катодній плямі розряду, значення якої визначається природою газу, матеріалом катода і змінюється в залежності від тиску газу в межах $10^{-3} \dots 1 \text{ А/см}^2$. На рис. 2.4 цю властивість проілюстровано схемами розташування розрядного світіння на поверхні циліндричного катода. Світіння зображено штрихуванням, зміна площі якої відображає зміну густини струму в катодній плямі. З підвищенням тиску зростає густина струму і, відповідно, підвищується інтенсивність нагріву тліючим розрядом. При незмінному тиску збільшення струму нормального тліючого розряду тягне за собою збільшення площі катодної плями, при практично незмінній густині енергії в плямі нагріву.

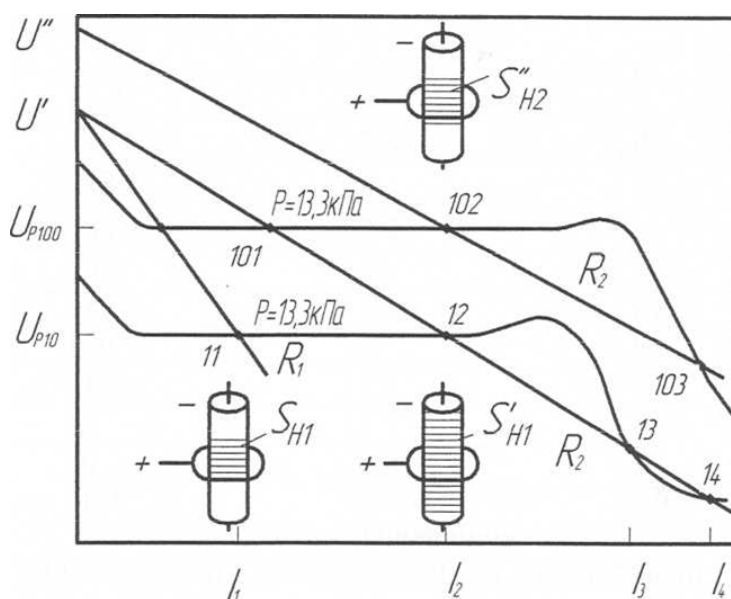
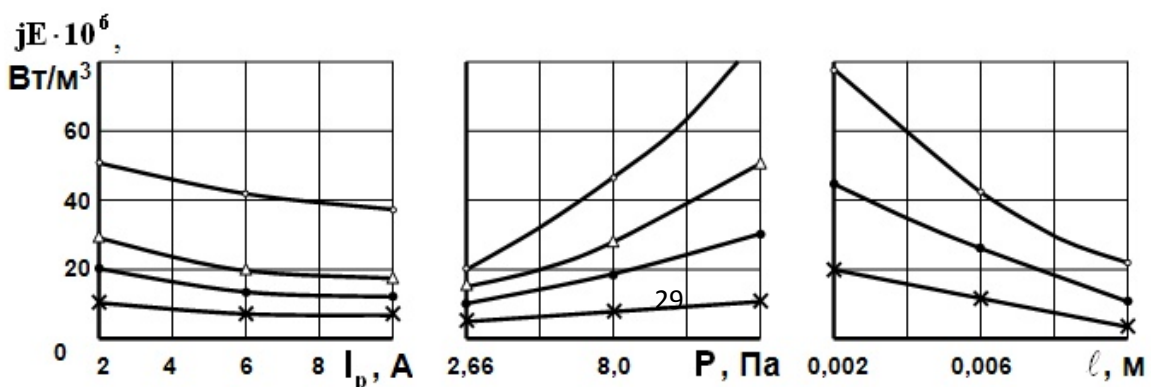
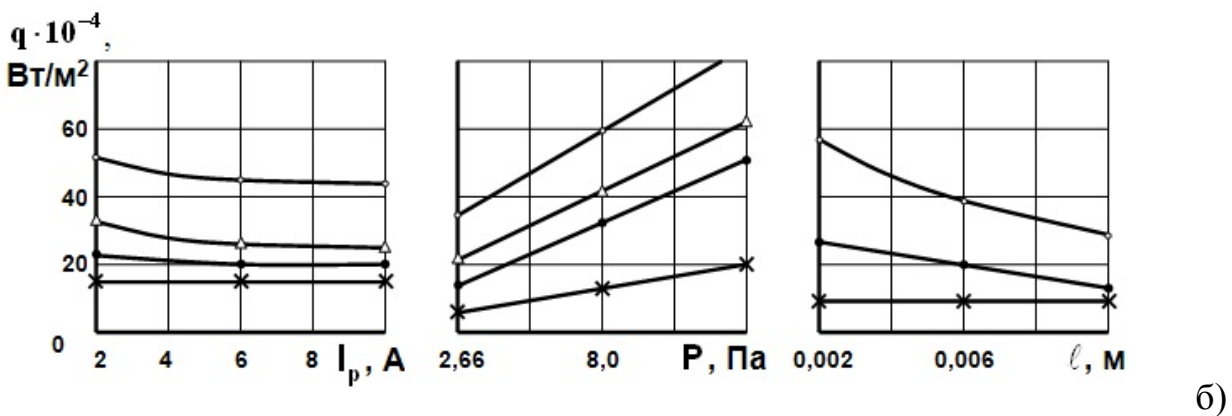
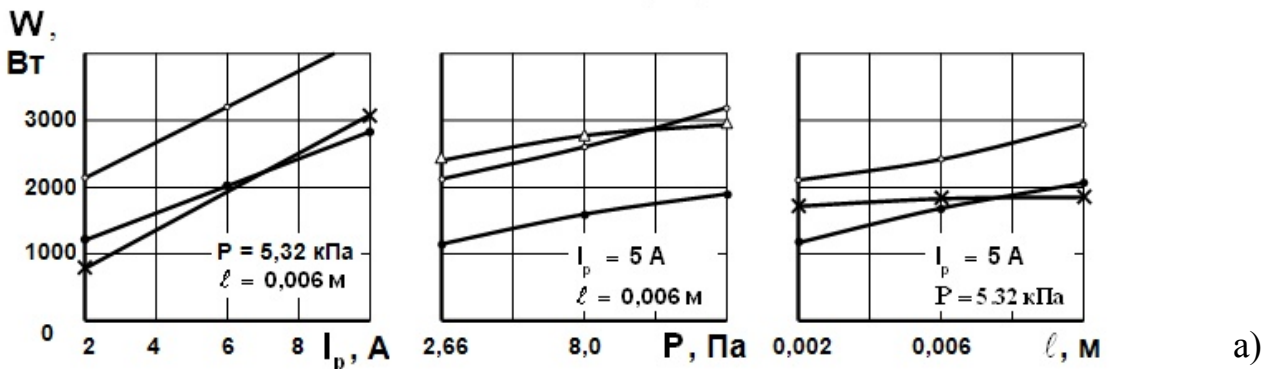


Рис. 2.4 Схема зміни площі нагрівання тліючим розрядом S_n при збільшенні струму розряду $I (S_{n1}, S'_{n2})$ та тиску газу $P (S'_{n2}, S''_{n2})$

Оптимальне керування енергетичними складовими теплового балансу тліючого розряду визначає ефективність впливу на термічний цикл зварювання, формування температурних полів в деталях, підвищення продуктивності і економічності нагріву.

Енергетичні характеристики розряду задаються електричними і технологічними параметрами режиму його горіння: струмом розряду, тиском і родом газу, протяжністю міжелектродного проміжку. Експериментально встановлені залежності між ними для використовуваних на практиці газів - аргону, азоту, водню і гелію в діапазоні зміни струмів розряду 2 ... 8 А, тисків газу 2,66 ... 13,3 кПа, міжелектродних відстаней 0,002 ... 0,01 м наведені на рис. 3.5.

Як впливає з наведених залежностей, енергетичні характеристики тліючого розряду в значній мірі визначаються властивостями газового середовища, в якому горить розряд. Ці властивості характеризуються приведеними значеннями густини струму (так званою «нормальною» густиною струму $j_{но}$) і величиною нормального катодного падіння потенціалу U_k , значення яких для використовуваних газів наведені в таблиці 2.2



в)

Рис. 2.5 – Залежність потужності тліючого розряду (а), густини електричної потужності (б) та питомої об'ємної потужності (в) від величини струму розряду I_p , тиску газу P і міжелектродної відстані ℓ (○ - азот, ● - аргон, Δ - водень, x - гелій)

Оскільки основна частка енергії тліючого розряду, що забезпечує нагрівання катода, припадає на електричну енергію, що виділяється в прикатодній області та визначається, в основному, величиною падіння потенціалу U_k в цій області, то найбільш ефективними, з енергетичної точки зору, газовими середовищами є азот і водень, що мають найбільші значення катодного падіння потенціалу (215 і 250 В відповідно).

Отримані експериментальні залежності свідчать, що параметри режиму горіння тліючого розряду істотно різним чином впливають на характер зміни основних складових енергетичного балансу розряду. Оскільки ці параметри в умовах зварювання та паяння можуть мати досить широкий діапазон варіювання, а технічна реалізація управління ними має різну ступінь складності, доцільно визначити ступінь кореляції цих параметрів з енергетичними характеристиками розряду для виявлення найбільш значущих з них.

Таблиця 2.2

Характеристики тліючого розряду для різних газових середовищ [146]

Параметр розряду	Газове середовище			
	Гелій	Аргон	Водень	Азот
Нормальна густина струму $j_{но}, \text{А/м}^2 \cdot \text{Па}$	2,2	160	72	226
Катодне падіння потенціалу $U_k, \text{В}$	150	165	250	215

Оцінку ступеня таких взаємодій проводили методом "похитування" параметрів, коли фіксували зміну шуканої величини (W, jE або q у нашому випадку) при відхиленні одного параметра від деякого середнього значення на 25% у бік його збільшення і зменшення. У якості середніх значень приймали: для струму розряду 4А, тиску газу 8,0 кПа, міжелектродної відстані 0,006 м. Середні значення отриманих коефіцієнтів зв'язку наведено в таблиці 2.3.

Отримані значення коефіцієнтів зв'язку свідчать, що найбільш тісно з питомими енергетичними характеристиками позитивного стовпа і прикатодної зони пов'язані зміни тиску газу в камері, що дає підставу вважати цей параметр режиму основним у регулюванні цих характеристик. Слід відзначити і досить

помітний вплив величини міжелектродної відстані анод – катод (деталь) на величину питомого енерговкладу jE у позитивному стовпі розряду. Видно, що зі збільшенням міжелектродного проміжку енергетичні характеристики розряду погіршуються. Це відбувається незважаючи на те, що зі збільшенням проміжку падіння напруги на розряді дещо зростає. Однак, це одночасно супроводжується зниженням напруженості електричного поля в стовпі. Ймовірно, при використанні відносно простих технічних рішень для регулювання величини міжелектродного проміжку зміною положення анода дистанційно і з достатньою точністю і цей параметр може бути ефективним способом управління енергетичними характеристиками розрядної плазми.

Таблиця 2.3

Коефіцієнти зв'язку параметрів режиму з енергетичними характеристиками тліючого розряду

Газове середовище	Енергетичні характеристики розряда	Коефіцієнти зв'язку для параметрів режиму горіння розряда *		
		Струм розряда	Тиск газу	Міжелектродна відстань
Азот	W	0,65	0,3	
	jE	-0,29	1,67	-1,52
	q	0,21	1,55	-0,21
Водень	W	0,81	0,19	
	jE	-0,21	1,52	-1,31
	q	0,18	1,28	-0,17
Аргон	W	0,89	0,11	
	jE	-0,28	0,86	-1,1
	q	0,13	0,67	-0,26

*– Відємні значення коефіцієнтів свідчать про зворотньопропорційну залежність відповідних параметрів з енергетичними характеристиками

Повна потужність розряду визначається, в основному, величиною розрядного струму, оскільки падіння напруги на розрядному проміжку встановлюється автоматично в залежності від тиску газу та відстані анод–катод і при зміні останніх в досить широких межах змінюється досить незначно. Регулювання розрядного струму може здійснюватися двома способами: зміною опору зварювального кола і варіюванням напруги холостого ходу джерела. Такий спосіб регулювання термічного циклу зварювання відрізняється найбільшою швидкістю і відносною простотою реалізації.

Оскільки широка номенклатура виробів, що зварюються, визначає широкий діапазон зміни умов і режимів зварювання, очевидно, складним чином буде змінюватися і ефективність нагріву, що визначається величиною ефективного к.к.д. η_0 , який також може змінюватися в досить широких межах. Це вимагає врахування цього фактора при виборі та призначенні режимів зварювання. У зв'язку з цим на підставі результатів, наведених вище і з використанням методики, описаної в пункті 2.2, побудована номограма (рис. 2.6) для визначення величини η_0 при нагріванні в середовищі азоту в залежності від основних параметрів режиму горіння тліючого розряду - струму розряду, тиску газу і міжелектродної відстані. Оскільки, як випливає з таблиці 2.3, коефіцієнти зв'язку цих параметрів з енергетичними характеристиками розряду у азоті і водні дуже близькі, ця номограма може з задовільною точністю застосовуватися і для оцінки величини η_0 при нагріванні в середовищі водню. З номограми випливає, що в діапазоні використовуваних режимів іонного нагріву величина η_0 змінюється в межах 0,6 ... 0,85, тобто майже на 30%.

В умовах змінної номенклатури деталей, що з'єднуються і, відповідно, широкого діапазону зміни режимів нагріву і зварювання необхідно враховувати настільки помітне відхилення величини к.к.д. при виборі значень параметрів режиму і потужності розряду, необхідної для виконання технологічних операцій.

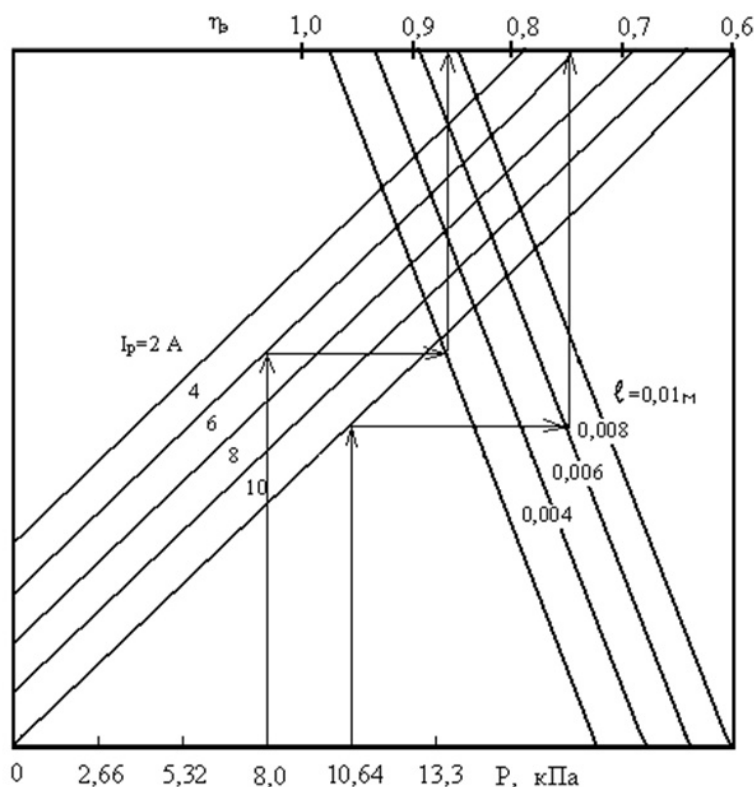


Рис. 2.6 - Номограма для визначення величини ефективного к.к.д., η_0 нагріву тліючим розрядом в середовищі азоту в залежності від тиску газу P , струму розряду I_p та міжелектродної відстані ℓ . Ключ номограми:

$$P \rightarrow I_p \rightarrow \ell \rightarrow \eta_i$$

2.4. Енергетичні нестійкості тліючого розряду при зварюванні

Вже в перших роботах, пов'язаних з технологічними застосуваннями тліючого розряду [43, 51], поряд із сприятливими передумовами, такими, як висока ефективність і економічність джерела енергії, були виявлені і різні види нестабільностей газорозрядної плазми, що призводять до відхилення ходу технологічного процесу від заданих параметрів, або взагалі роблять неможливим його здійснення. У першу чергу це пов'язано з тим, що при певних умовах може відбуватися зміна форми існування тліючого розряду, яка супроводжується збільшенням струму і зниженням падіння напруги в міжелектродному проміжку, що є характерною ознакою дугових розрядів. Перехід тліючого розряду в дуговий супроводжується стисненням (контракцією) позитивного стовпа розряду і різким скороченням площі катодної плями на виробі, що призводить до значного збільшення густини енергії в цій плямі, сприяючи перегріву і неприпустимому оплавленню окремих ділянок оброблюваних деталей при зварюванні в твердому стані [108], паянні або хіміко-термічній обробці [14]. У самому загальному випадку це явище може бути пояснено тим, тліючий розряд, що самопідтримується в процесі горіння, є проміжною формою газових розрядів і, тому за певних умов прагне перейти у більш стійку форму, що характеризується низькою напруженістю електричного поля в міжелектродному проміжку, тобто в електричну дугу.

Вище було показано, що в залежності від умов на катоді, обумовлених конструктивними особливостями зварюваних деталей, конфігурацією електродів і режимом обробки тліючий розряд має кілька різновидів, які відрізняються електричними, енергетичними і технологічними характеристиками: аномальний тліючий розряд, нормальний тліючий розряд, розряд у порожнистому катоді і утруднений розряд.

Кожен з цих розрядів має свої характерні особливості, що визначають стійкість і можливість регулювання параметрів режиму:

- аномальний тліючий розряд відрізняється найменшою стійкістю внаслідок високої напруженості електричного поля в розрідженій плазмі і тим, що збільшення його потужності супроводжується одночасним зростанням густини струму і напруги. У зв'язку з цим, для збереження стійкості аномальний розряд в процесах обробки використовують при порівняно невеликих густинах струмів $0,005 \dots 0,02 \text{ А/см}^2$ [14];

- розряд у порожнистому катоді володіє найбільшою провідністю і при постійній напрузі густина струму в ньому може досягати 50 А/см^2 і вище [124], наближаючись за цим параметром до дугових розрядів, що сприяє зміні його форми;

- нормальний тліючий розряд забезпечує густина струму порядку $0,01 \dots 1,0 \text{ А/см}^2$ і дозволяє здійснювати регулювання потужності роздільно за струмом і напругою;

– утруднений розряд, що горить у вузькому зазорі між двома поверхнями, чутливий до величини цього зазору і тиску газу, і може існувати в дуже вузькому діапазоні зміни цих параметрів. В іншому випадку він або переходить в розряд у порожнистому катоді, або згасає [4].

З усіх різновидів найбільш стабільним і добре регульованим в широких межах є нормальний тліючий розряд, що існує при порівняно невисоких напругах на електродах (200 ... 1000 В) і відносно невисоких густинах струмів. Тому, в основному, саме він найбільш широко використовується в якості джерела нагріву в процесах зварювання та паяння. Для усунення аномальності розряду необхідно, щоб вироби, що нагріваються, контактували з пристосуваннями і корпусом робочої камери, що знаходяться під негативним потенціалом. У цьому випадку вироби і вся внутрішня поверхня камери із внутрішньокамерним оснащенням є катодом і в широкому діапазоні струмів і тисків газів забезпечують нормальний режим горіння тліючого розряду.

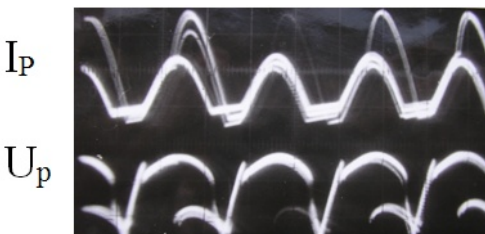
Нормальний тліючий розряд також не можна визнати достатньою мірою стійким. Це пов'язано з тим, що напруга на електродах розряду і, відповідно, напруженість електричного поля в міжелектродному проміжку в тліючому розряді на один-два порядки вище, ніж в дуговому. Згідно принципу мінімуму Штейнбека (1932 р.) в цих умовах в розряді будуть прагнути реалізуватися такі стани, які вимагають найменших напруг, відповідних саме дуговому розряду. При переході тліючого розряду в дуговий опір розрядного проміжку протягом короткого відрізка часу знижується на 1 ... 2 порядки (приблизно з рівня 50 ... 500 Ом до 5 ... 20 Ом) з відповідним зростанням струму в розрядному колі (рис. 2.7). Енергія, що виділяється в катодній плямі дуги за час її існування

$$W_{\delta} = \int U_{\delta}(\tau) I_{\delta}(\tau) d\tau,$$

може бути достатньою для розплавлення поверхні виробу та створення умов для появи стабільної дуги. Нагрівання при цьому з розподіленого стає концентрованим, що викликає локальні пропалення та оплавлення поверхні деталей.



Стабільний тліючий розряд



Нестабільний тліючий розряд



Дуговий розряд

Рис. 2.7. Осцилограми зміни струму I_p та напруги U_p тліючого розряду у нормальному режимі та переходах його у дугувий розряд та у зворотному напрямку

Вірогідність цього зростає відповідно збільшенню потужності тліючого розряду і потужності джерела живлення.

2.5. Технологічні заходи забезпечення стійкості тліючого розряду

У виробничій практиці можливі самі різні поєднання умов на поверхні катода, які можуть викликати не тільки зміни різновиду тліючого розряду, але й його перехід в електричну дугу, що може призводити до руйнування деталей і виходу з ладу джерел живлення.

Аналіз виробничо-технологічних умов показує, що питання про стабілізацію тліючого розряду слід розглядати у двох аспектах [26, 28]:

1. Забезпечення умов для існування одного виду тліючого розряду (нормального або аномального).
2. Створення умов, що виключають стабілізацію електричних дуг.

Залежно від конфігурації зварюваних деталей можливе утворення умов для одночасного існування різних форм тліючого розряду. В основному це зумовлено геометричними та емісійними характеристиками катодної поверхні (поверхні деталі, покритої негативним тліючим світінням). Наявність на катоді в зоні нагріву щілин і зазорів, розмір яких задовольняє співвідношенню [109]

$$2d_k \leq \Delta \leq 4d_k \quad (2.10)$$

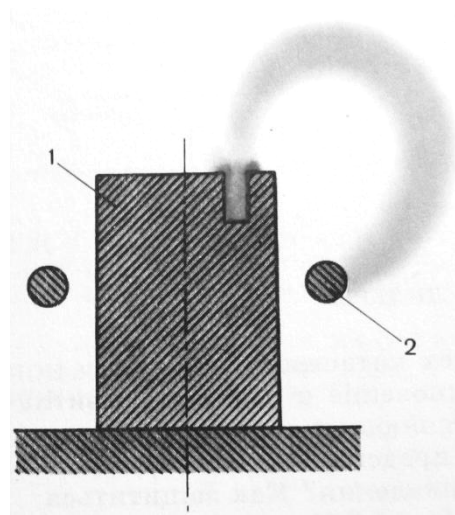
де Δ - величина зазору;

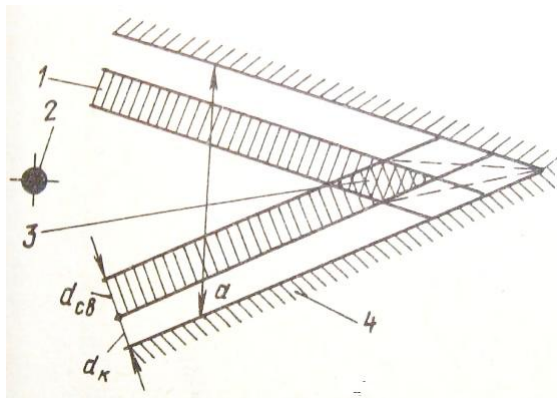
d_k - ширина зони катодного падіння потенціалу,

може призвести до одночасного існування двох видів розряду - тліючого розряду і розряду в порожнистому катоді (рис. 1.5). При співіснуванні двох видів розряду виріб нагрівається нерівномірно і максимальні температури розташовані в зоні найбільшої провідності, звичайно в порожнині на катоді. Для тисків газу при зварюванні 1,33 ... 13,3 кПа умова (2.10) виконується при зазорах 0,01 ... 1 мм, коли в порожнині або зазорі відбувається злиття негативних тліючих свічень протилежних стінок, що характеризують утворення порожнистого катода. На рис. 2.8 наведена схема процесу переходу розряду в порожнину, де встановлюється зона підвищеної провідності, незалежно від того, у центрі або на краю світіння нормального тліючого розряду знаходилась порожнина або щілина.

1 – катод; 2 – анод

Рис. 2.8. Схема встановлення дугового розряду в порожнині на катоді





- 1 – тліюче світіння;
- 2 – анод;
- 3 – зона злиття тліючих світінь;
- 4 – катод

Рис. 2.9. Схема утворення ефекту порожнистого катоду у клиновій щілині

Найбільш небезпечними є клинові зазори, в яких зазначена умова виконується при будь-яких тисках газу (рис. 2.9). При неможливості видалення з конструкції таких зазорів ці ділянки мають бути закриті екраном, що запобігає проникненню негативного тліючого світіння в порожнину або щілину.

Другий аспект стабілізації тліючого розряду пов'язаний з умовами переходу його в дуговий. Зародження і стабілізація дуги визначаються характеристиками поверхневого шару матеріалу катоду: хімічним складом; мікрорельєфом поверхні; наявністю окисних плівок і забруднень, які забезпечують існування точок підвищеної емісії; складом і властивостями газового середовища; режимом горіння розряду [93].

Необхідними і достатніми умовами для переходу тліючого розряду в електричну дугу при середніх тисках 1... 15 кПа можуть бути наступні [67]:

$$T_k \geq T_{кип}, \quad (2.11)$$

$$I \geq I_{пор} \approx 0,25 \cdot 10^{-3} T_{кип} \sqrt{\lambda}, \quad (2.12)$$

$$j \geq 10^6 \dots 10^7 \text{ A/cm}^2, \quad (2.13)$$

де T_k і $T_{кип}$ - відповідно, температура нагріву катоду і температура його кипіння;

$I_{пор}$ - пороговий струм стабілізації дугового розряду;

λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу катоду.

Незважаючи на відносно низьку температуру нагрівання деталей при дифузійному зварюванні і невисоку густину струмів у нормальному тліючому розряді, перехід останнього в дуговий може мати місце, оскільки сила струму розряду при зварюванні досягає $I \approx 5 \dots 30 \text{ A}$, чим виконується умова (2.12). Дві інші умови (2.11) та (2.13) можуть бути виконані, якщо на поверхні виробу (катоду) з'являться точки перегріву до температур, які відповідають або перевищують температуру кипіння металу катоду. Вважають [80, 108], що ними мо-

жуть бути виступи мікрорельєфу, що отримується після механічної обробки, якщо їх поверхня, що сприймає теплоту, досить велика, щоб забезпечити перегрівання до температур кипіння, а тепловідвід у виріб малий. Виконання цих умов можливе тільки для тонких волоссяподібних виступів та задирів. Водночас такий рельєф поверхні може сприяти порушенню стабільності тліючого розряду і без помітного нагрівання внаслідок автоелектронної емісії катоду. Навпроти окремих активних ділянок катоду, якими є гострі виступи, створюються області з підвищеною концентрацією зарядів. Володіючи більшою рухомістю електрони швидше покидають ці області, аніж позитивні іони. В результаті утворюється значний позитивний заряд, який сприяє подальшому зростанню автоелектронної емісії на активних ділянках катода. Цей процес взаємного підсилення емісії та об'ємного заряду здатний призвести до контракції розряду. Для реальних поверхонь, оброблених – перед зварюванням чистовим або напівчистовим точінням, присутність таких дефектів поверхні обмежена, відповідно, малоімовірно виконання умов (2.11) і (2.13).

Таким чином, належна механічна обробка заготовок перед зварюванням із шорсткістю бічної поверхні нижче $R_z = 20 \dots 30$ мкм не створює умов для переходу тліючого розряду в дуговий через будову мікрорельєфу поверхні. Вважають [98], що однією з основних причин появи електричних дуг при роботі з нормальним тліючим розрядом є емісійна плямистість поверхні виробу (катода). Плями підвищеної емісії є локальні забруднення, діелектричні і окисні плівки, що залишилися після неякісної підготовки поверхні або утворюються в процесі її нагрівання. Перше викликано порушенням технології підготовки деталей до зварювання, друге викликано значним вмістом кисню в робочій камері внаслідок недостатньої її герметизації або незадовільної роботи вакуумних насосів, або через підвищений вміст кисню та вологи в робочому газі.

Механізм утворення локалізованих просторових зарядів пояснюється в роботі [119] наступним чином: будь-яка зміна величини γ (де γ – другий коефіцієнт Таунсенда, що характеризує кількість електронів, що припадають на один падаючий на катод іон) обумовлює в різних точках на поверхні катоду більший або менший струм. В місцях забруднень, окалини, оксидної плівки робота виходу електронів менша, тому кожний іон вибиває електронів більше, ніж в середньому по катоду. Електронне облако, яке утворюється, сильніше взаємодіє з електричним полем і електрони більш інтенсивно віддаляються від катоду, підвищуючи провідність плазми [182].

Емісійна нестійкість проявляється імпульсивно і призводить до переходу тліючого розряду в режим очищення поверхні, при якому утворюються мікродугові розряди, що розпорошують джерела підвищеної емісії (рис. 2.10а). Якщо джерела емісії при цьому зберігаються, то мікродуговий режим горіння розряду стабілізується. Чим грубіше механічна обробка поверхні, тим більше виникає мікродуг і тим довше вони діють. Такий процес в залежності від вихідного стану поверхні триває від одиниць до десятків секунд, після чого припиняється і на очищеній поверхні деталі стабілізується катодна пляма тліючого розряду (рис. 2.10б).



Якщо ж нагрі-
повер-
утво-
оксиди,
цьому
кують-
щатся,
вують-
гріва-
вини-
тева



у процесі
вання на
хні деталі
рюються
які при
розтріс-
ся, лу-
відшаро-
ся і пере-
ються, то
кає сут-
нерівно-

мірність емісії, що призводить до появи дуг і

їх подальшої стабілізації на цих ділянках. Такі умови процесу неприпустимі, необхідно змінити склад робочого газу, забезпечити йому захисні нейтральні або відновні властивості. У той же час, наявність на деталі оксидів і окалини припустима, якщо вони розташовані рівним щільним шаром і нагрів не викликає їх розтріскування і лущення.

а)

б)

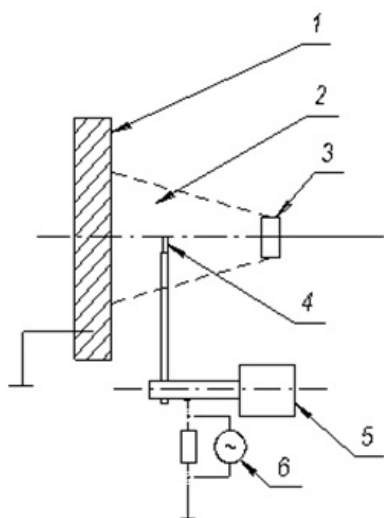
Рис. 2.10. Зовнішній вигляд розряду на початковій та завершальній стадії очищення мікродуговими розрядами забрудненої поверхні катода

Досвід промислового застосування іонного нагріву показав, що в багатьох випадках для забезпечення його стійкості, при раціональному конструюванні зварного вузла, достатнім є механічна обробка виробів за 5 – 6-им класом чистоти та їх промивка і знежирення в розчинниках безпосередньо перед зварюванням.

При виконанні зазначених умов втрата стійкості тліючого розряду може бути викликана невідповідним вибором режиму нагріву, що визначається родом і тиском газу, а також, потужністю розряду при зварюванні реальних виро-

бів. Тому, необхідно знати залежність фізичних меж існування тліючого розряду від поєднання значень цих параметрів.

В умовах зварювання для забезпечення енергетичної економічності процесу нагріву піддається, як правило, обмежений об'єм деталей, що прилягає до зони контакту з'єднаних поверхонь. Це досягається як вибором параметрів режиму, зокрема тиску газу, так і формою аноду, який в даному випадку виконується у вигляді контуру із металевого дроту діаметром 0.002...0.006 м в залежності від потужності розряду, що розташовується еквідистантно поверхні деталей, і має суттєво обмежені розміри відносно катода і катодної плями розряду.



За допомогою електронного зонда (рис. 2.11), що обертається, визначені розміри поперечного перерізу тліючого розряду в прианодній та прикатодній зонах на відстані $(3...10) \cdot 10^{-4}$ м від електродів. Встановлено, що при міжелектродних відстанях 0,004...0,02 м і тисках газу 5,34... 13,3 кПа густина струму в прианодній області в 5...9 разів перевищує густина струму на катоді ($10^2...3 \cdot 10^3$ А/м² в умовах зварювання) і може досягати величин, при яких в плазмі починає проявлятися ефект самопінчевання власним магнітним полем, що сприяє додатковому стисканню розрядної плазми і розвитку в ній нестабільностей за механізмом іонізаційно-теплової контракції. За даними В. Л. Грановського та Д. І Котельникова цей ефект починає спостерігатись при густині струму в розряді $10^4...10^5$ А/м². Таким чином, цілком вірогідно, що навіть при відсутності на катоді умов, що сприяють зміні форми розряду, характеристики аноду та прианодної області можуть впливати на стабільність тліючого розряду при даній геометрії електродів. Звідси впливає необхідність пошуку шляхів визначення режимів нагріву, що не призводять до появи критичної густини струму на аноді і порушення стабільності розряду.

Встановлено, що при міжелектродних відстанях 0,004...0,02 м і тисках газу 5,34... 13,3 кПа густина струму в прианодній області в 5...9 разів перевищує густина струму на катоді ($10^2...3 \cdot 10^3$ А/м² в умовах зварювання) і може досягати величин, при яких в плазмі починає проявлятися ефект самопінчевання власним магнітним полем, що сприяє додатковому стисканню розрядної плазми і розвитку в ній нестабільностей за механізмом іонізаційно-теплової контракції. За даними В. Л. Грановського та Д. І Котельникова цей ефект починає спостерігатись при густині струму в розряді $10^4...10^5$ А/м². Таким чином, цілком вірогідно, що навіть при відсутності на катоді умов, що сприяють зміні форми розряду, характеристики аноду та прианодної області можуть впливати на стабільність тліючого розряду при даній геометрії електродів. Звідси впливає необхідність пошуку шляхів визначення режимів нагріву, що не призводять до появи критичної густини струму на аноді і порушення стабільності розряду.

- 1– катод;
- 2– позитивний стовп розряду;
- 3– анод;
- 4– зонд;
- 5– привід обертання зонда;
- 6– гальванометр (осцилограф)

Рис. 2.11. Схема вмикання електронного зонда в коло тліючого розряду [83]

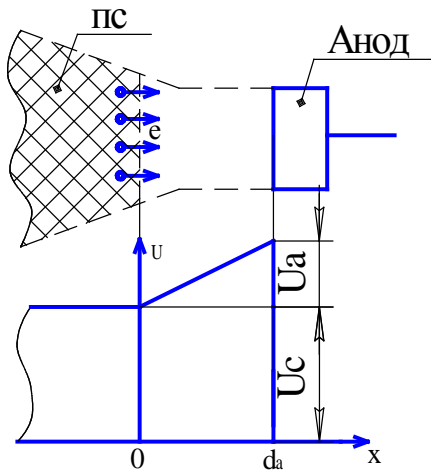
Для вирішення цієї задачі в роботі [37] розглядали процеси в прианодній зоні та області позитивного стовпа, що прилягає до неї (рис. 2.12). Струм в анодній області забезпечується рухом електронів, що зароджуються в позитивному

стовпі, в напрямку анода. Тому позитивний стовп можна вважати емітером електронів, а межу між ним та анодною областю – плазмовим катодом.

Протяжність анодної області тліючого розряду орієнтовно дорівнює довжині вільного пробігу електронів, тому при відсутності їх зіткнень з атомами газу густина струму в цій області буде визначатись швидкістю V_e та об'ємною густиною електронів N_e :

$$j = eN_e(x)V_e(x), \quad (2.14)$$

де e , N_e , V_e – відповідно, заряд, об'ємна щільність і швидкість електронів.



U_a - падіння потенціалу в прианодній області;
 U_c — падіння потенціалу в стовпі розряду;
 d_a - протяжність анодної області

Рис. 2.12. Схема прианодної області тліючого розряду і розподіл потенціалу по її довжині.

Оскільки напруженість поля в позитивному стовпі для зазначених раніше тисків газу й міжелектродних відстаней порівняно невисока ($E=(1..3) \cdot 10^3$ В/м [100]) електрони будуть перетинати границю $X=0$, в основному, із тепловою швидкістю [146], котра значно нижче ніж та, яку вони отримують в достатньо сильному електричному полі області анодного падіння потенціалу $E=(2..5) \cdot 10^5$ В/м для різних газів.

Це дозволяє зневажити початковою швидкістю входження електронів із плазми позитивного стовпа в анодну область, а оскільки зіткнення електронів з атомами газу практично відсутні, швидкість їхнього руху в цій області буде визначатися пройденою ними різницею потенціалів U в області анодного падіння

$$V_e(x) = \left(\frac{2eU}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.15)$$

де m_e – маса електрона.

Звідси, згідно (2.14) і (2.15), об'ємна щільність електронів в області анодного падіння потенціалу

$$N_e(x) = \frac{j}{e \left(\frac{2eU}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}}}. \quad (2.16)$$

Наявність значного об'ємного заряду електронів в анодній області дозволяє використати для вирішення задачі рівняння Пуасона [159], яке пов'язує електричний потенціал з об'ємною щільністю зарядів, що створюють цей потенціал.

У силу одномірності задачі й з урахуванням переносу зарядів тільки електронами це рівняння прийме вигляд

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{N_e(x)e}{\varepsilon_0 \varepsilon}, \quad (2.17)$$

де $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична постійна вакууму;

$\varepsilon \approx 1$ – діелектрична проникність газового середовища.

Підставивши (2.16) в (2.17) і вирішуючи останнє з початковою умовою:

$$E = \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} = E(0) = 0, \quad (2.18)$$

яка впливає із незначної, порівняно з анодною областю, напруженості електричного поля в стовпі розряду, та граничною умовою

$$U \Big|_{x=d_a} = U_i, \quad (2.19)$$

оскільки вважають, що на кінці пробігу анодної області $x=d_a$ електрони набувають енергію U_i , достатню для іонізації газового середовища, отримаємо для густини струму в анодній області

$$j = \frac{\varepsilon_0}{2} \left(\frac{2e}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{U_i^{\frac{3}{2}}}{d_a^2}. \quad (2.20)$$

Величину d_a , що орієнтовно дорівнює довжині вільного пробігу електронів, можливо визначити, відповідно до кінетичної теорії газів, як [120]

$$d_a \approx \lambda_e \approx 4\sqrt{2} \frac{kT}{pQ_i}, \quad (2.21)$$

де $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постійна Больцмана;

T – температура газу в анодній області, К;

p – тиск газу, Па;

Q_M – газокінетичний перетин молекул газу, м².

Згідно [120] довжина пробігу електронів і, відповідно, протяжність прианодної області, залежить від роду й тиску газу, при цьому температура газу може бути визначена як середня між температурою газу в стовпі розряду (при тисках газу 8...15 кПа – 2000...3000 К [111]) і температурою металевому аноду, що в умовах зварювання становить 900...1100 К.

Підстановка (2.21) в (2.20) з одночасним приведенням в останньому всіх сталих величин дає остаточний вираз для густини струму в розглянутій області

$$j \approx 10^{33} U_i^{3/2} p^2 Q_M^2. \quad (2.22)$$

Як встановлено рядом досліджень [27, 32], границя стійкості тліючого розряду визначається не тільки тиском газу, але й силою струму розряду (рис. 4.10), тому критерій стійкості повинен включати обидва ці параметри, що в основному характеризують режим нагрівання.

Запишемо (2.22) у вигляді

$$p \approx 3 \cdot 10^{-17} \left(\frac{j}{U_s^{3/2} Q_i^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.23)$$

Помножимо обидві частини виразу (2.23) на $j^{1/2}$ і запишемо у лівій частині густину струму через струм розряду I і площу бічної поверхні аноду S_a

$$pI^{\frac{1}{2}} \approx 3 \cdot 10^{-17} j_{\text{ед}} \left(\frac{S_a}{U_i^{3/2} Q_i^2} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.24)$$

Прийнявши за критичну густину струму в анодній області значення, що орієнтовно наближається до початку зазначеного раніше діапазону густин струму $j_{\text{кр}} = 10^4 \text{ А/м}^2$, можна записати умову стійкості розряду у вигляді

$$pI^{\frac{1}{2}} \approx 3 \cdot 10^{-13} \left(\frac{S_a}{U_s^{3/2} Q_i^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.25)$$

Виразом (2.25) враховуються основні умови існування тліючого розряду, пов'язані з характеристиками електродного вузла й газового середовища, у якому горить розряд.

Результати розрахунків за виразом (2.25) наведені на рис. 2.13. Видно, що розрахункова границя стійкості розряду наближається до експериментально визначеного початку розвитку нестабільності, коли в міжелектродному проміжку починають утворюватися епізодичні короткочасні дугові розряди. З підвищенням тиску газу частота появи таких розрядів зростає і при деякому граничному тиску тліючий розряд повністю переходить у дуговий.

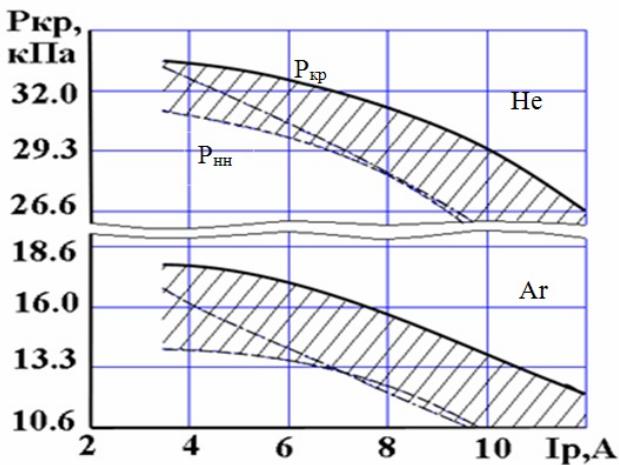


Рис. 2.13. Експериментальні (суцільні лінії) та розрахункові (штрихові лінії) значення граничного тиску газу $p_{\text{кр}}$ при зміні струму розряду I ($p_{\text{нн}}$ – тиск газу, що відповідає початку появи нестабільностей розряду)

На рис. 2.14 здійснено накладення результатів розрахунків за виразом (2.25) на узагальнений для найбільш застосованих газів графік границі існування тліючого розряду, побудований за експериментальними даними [27]. В якості параметра, що характеризує газове середовище, на графіку застосована така питома величина, як нормальна густина струму $j_{\text{но}}$ тліючого розряду, що горить у відповідних газах [146].

Результати розрахунків режимів за наведеною методикою задовільно узгоджуються з результатами експериментів для всіх основних газових середовищ (рис. 2.14), з деякими відхиленнями для водню, який за своїми характеристиками займає проміжний стан, оскільки за нормальною густиною струму $j_{\text{но}}$

він наближається до аргону і азоту, а за теплопровідністю та газокінетичним перерізом – до гелію.

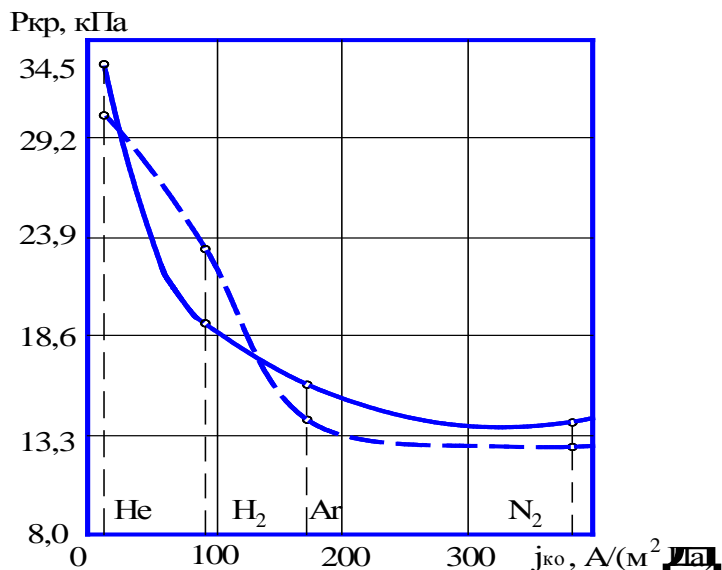


Рис. 2.14. Експериментальні (—) та розрахункові (---) значення граничних, за умови стабільності розряду, тисків газу $P_{кр}$ для різних газових середовищ (струм розряду 4А)

На підставі виразу (2.25) розроблена номограма для швидкого орієнтовного визначення граничних значень параметрів режиму (рис. 2.15).

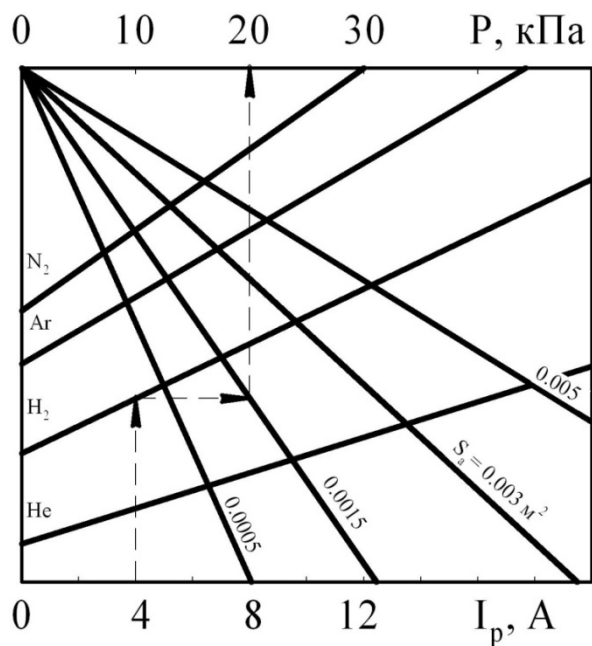


Рис. 2.15. Номограма для визначення граничних за умови стійкості тліючого розряду параметрів режиму – струму розряду I_p та тиску газу p .

Ключ номограми: струм розряду I_p → газове середовище → площа аноду S_a → граничний тиск газу p

Представлена методика отримана в припущенні існування однорідного тліючого розряду, коли анодна пляма і, відповідно, густина струму рівномірно розподілені по всій поверхні аноду. Проте, в процесі роботи попередньо слабо помітне рівномірне анодне світіння поступово змінює свою форму. На поверхні анода з'являються окремі, довільним чином розташовані яскраві плями (рис. 2.16а), з яких із часом починають формуватись канали підвищеної провідності (рис. 2.16б). Збільшення струму розряду призводить до утворення в цих каналах електричної дуги (рис. 2.16в). Це викликано тим, що в процесі роботи стан поверхні аноду суттєво змінюється внаслідок осаджування на неї або на окремих її ділянках забруднень у вигляді діелектричних плівок, які утворюються з часом внаслідок окислювання з-за наявності в газах у вигляді домішок кисню, осаджування парів вакуумних мастил, що полімеризувалися в розряді, частинок матеріала катода, розпилених іонним бомбардуванням та ін. Це призводить до появи на поверхні анода неконтрольованих плівок, що мають більш високий, ніж матеріал анода, опір і сприяють зміні умов замикання струму тліючого розряду на аноді.

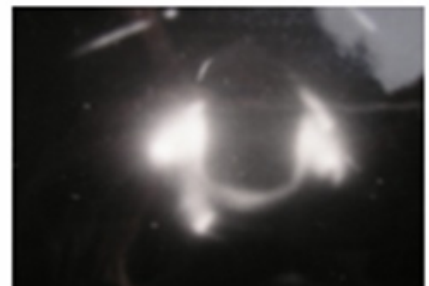
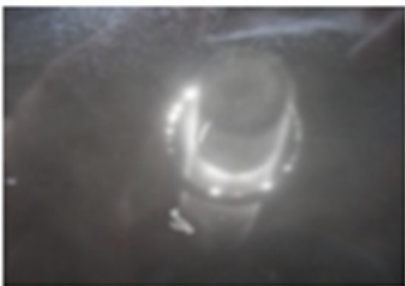
а)

б)

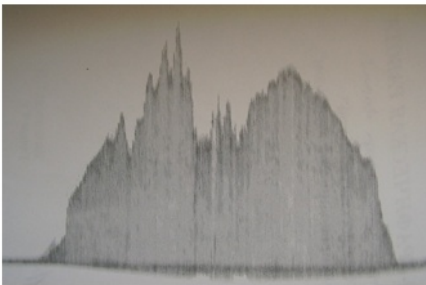
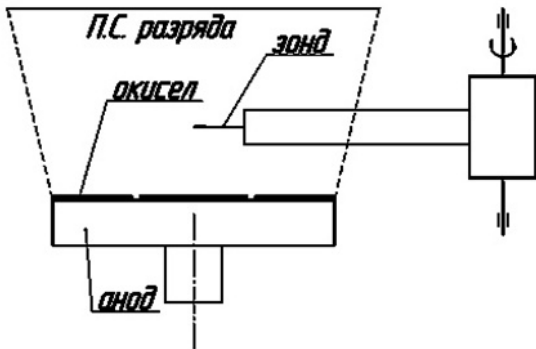
в)

Рис. 2.16. Зміна форми світіння на аноді тліючого розряду у часі

Вивчення характеру провідності струму на поверхні аноду здійснено [42] за допомогою електронного зонда, що обертається, із записом результатів на світлопроменевому осцилографі. Анод виконувався з відрізка дроту зі сталі Ст.3 діаметром 0,005 м та довжиною 0,05 м. Для імітації стану поверхні анода, що виникає в процесі його роботи, анод піддавали окисленню на повітрі при температурі 873...973 К протягом 10 хвилин до отримання помітного шару оксидів. Після цього поверхня анода зачищалася в двох місцях до металічного блиску. Траєкторія руху робочого кінця зонду розташовувалась на відстані 1...1,5 мм від поверхні аноду (рис. 2.17а). Осцилограми (рис.2.17б) свідчать, що значна доля струму розряду проходить на анод саме через ділянки, вільні від поверхневих забруднень.



а)



б)

Рис. 2.17. Схема вимірювання (а) та характер розподілу густини струму (б) на аноді тліючого розряду

Ефективна поверхня аноду, через яку замикається струм розряду, в цих умовах знижується, що підвищує густину струму в прианодній плазмі. Локальне збільшення густини струму на аноді до критичної ($1,5 \dots 2,0 \text{ А/см}^2$) та вище сприяє подальшому самодовільному стисканню плазми власним магнітним полем із розвитком в неї каналу дугового розряду. Усунення цього негативного для стабільності розряду фактора вимагає періодичної заміни аноду або очищення його поверхні.

2.6. Технічні засоби підвищення стабільності потужнострумового тліючого розряду

Зі сказаного вище випливає, що необхідні умови на електродах, що забезпечують стабільність тліючого розряду, можуть бути досягнуті порівняно простими засобами. Однак, їх не завжди можна вважати достатніми. При роботі із потужними (потужнострумовими) тліючими розрядами їх стабільність при дотриманні технологічної дисципліни залежить, як показано в роботі [27], від режиму горіння розряду, що характеризується, в першу чергу, потужністю розряду і густиною струму в ньому, обумовленими, відповідно, струмом розряду і тиском газу в робочій камері. У цьому випадку збереження стійкості тліючого розряду при наближенні до граничних значень параметрів режиму або їх

випадковому короткочасному перевищенні не може бути забезпечено технологічними заходами, а вимагає застосування технічних засобів стабілізації струму розряду, що ефективно впливають на характеристики електричного кола розряду.

До параметрів зовнішнього кола, що живить тліючий розряд, можна віднести струм розряду, напругу, прикладену до електродів, та опір, ввімкнений послідовно із розрядним проміжком. Причому струм є функцією від величини цього зовнішнього опору. В роботі [176] розглядається природа нестійкості, що виникає під час переходу розряду від дифузної форми до контрагованого стану. Тиск газу вважався постійним і однорідним. Вплив зовнішнього кола враховувався співвідношенням

$$\Sigma = iR_{\text{вн}} + El_c \quad (2.26)$$

де Σ – електрорушійна сила джерела струму;

$R_{\text{вн}}$ – зовнішній опір;

E – напруженість електричного поля в стовпі розряду;

l_c – протяжність позитивного стовпа.

Якісно механізм нестійкості тліючого розряду при наявності зовнішнього опору, досліджений в [175], пояснюється наступним чином. Незначне збільшення електронної густини в будь-якому місці неконтрагованого розряду призводить до додаткового нагрівання газу, яке супроводжується розширенням газу та зменшенням його щільності, що у свою чергу призводить до підвищення електронної температури і, як наслідок, до зростання швидкості іонізації та подальшому зростанню збурення електронної густини. Водночас із збільшенням електронної густини збільшиться і струм в колі розряду, що призведе до збільшення падіння напруги на зовнішньому опорі і, відповідно, до зменшення напруженості електричного поля в стовпі розряду (згідно формули 2.26). Зменшення E призведе до зменшення електронної температури, що у свою чергу, знизить швидкість іонізації та загальмує наростання електронної лавини. Звідси випливає, що зовнішній опір виконує функцію стабілізуючого фактора.

Запропонований в роботі [175] критерій межі стійкості тліючого розряду наголошує, що при струмі розряду I , тиску газу p та діаметрі позитивного стовпа D зовнішній опір $R_{\text{вн}}$ стабілізує розряд у випадку, якщо добуток величини сили струму розряду на тиск газу менше деякої критичної величини $(Ip)_{\text{кр}}$. У свою чергу, величина $(Ip)_{\text{кр}}$ пов'язується в роботі з різними значеннями параметру

$$\sigma = \frac{1}{1 + R_p / R_{\text{вн}}} \quad (4.20)$$

У роботі [175] робиться висновок, що при $R_{\text{вн}} = 0$, тобто при $\sigma \rightarrow 0$ розряд завжди нестійкий, а при $\sigma = 1$ – стійкий. Розрахунки, виконані в роботі [105] у відповідності із запропонованою методикою, надали орієнтовні значення $R_{\text{вн}} \approx$

$I/3R_p$ при $\sigma = 0,25$. Такі значення зовнішнього опору слід вважати нижньою межею, оскільки вони, як свідчать результати експериментальних досліджень та практичного досвіду, не забезпечують достатньої стабільності розряду. Це може бути викликано тим, що запропонований критерій не пов'язаний ані з внутрішніми параметрами розряду (родом газу, формою і матеріалом електродів, міжелектродною відстанню та ін.), ані з причинами появи нестійкостей, які можуть сприяти переходу тліючого розряду в дуговий і при $(Ip) < (Ip)_{кр}$. Практично доцільно вважати, що значення критерію $\sigma = 0,3 \dots 0,4$ (при $R_{вн} \approx (0,5 \dots 0,7) R_p$) можуть характеризувати досить стабільний тліючий розряд. Оскільки із збільшенням розрядного струму опір розряду знижується, це дає змогу одночасно знижувати і величину зовнішнього баластного опору, що підвищує енергетичну ефективність устаткування.

Рис. 2.18 ілюструє вплив величини зовнішнього опору на стадію переходу тліючого розряду в дуговий [20]. Видно, що при $R_{вн} \geq R_p$ помітно розширюється діапазон струмів стабільного тліючого розряду і суттєво зменшуються флуктуації струму в моменти зміни форми розряду.

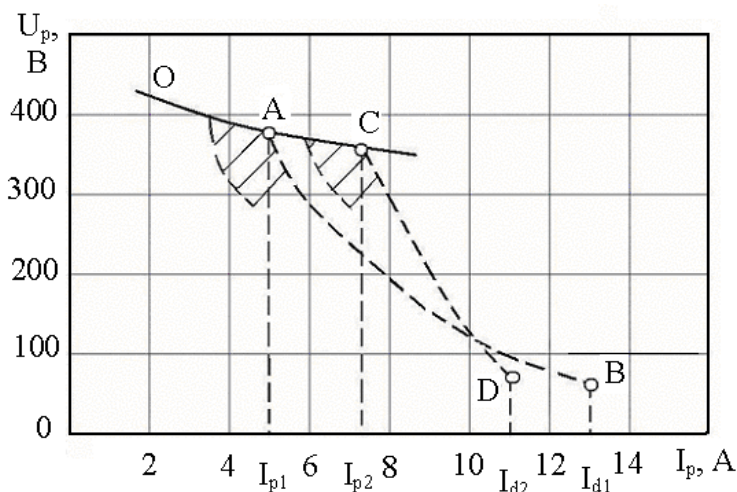
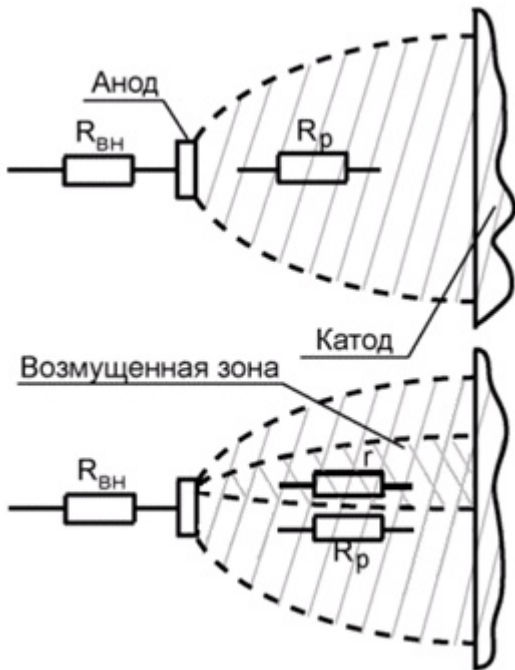


Рис. 2.18. Вплив величини зовнішнього опору $R_{вн}$ на стійкість тліючого розряду (крива OAB відповідає $R_{вн} = 30$ Ом, $R_p = 74$ Ом; OCD – $R_{вн} = 60$ Ом, $R_p = 48$ Ом; заштрихована область - початок появи нестійкості, точки A та C відповідають моменту переходу тліючого розряду в дуговий, точки B та D – дуговому розряду)

Однак, слід брати до уваги, що стабілізація тліючого розряду за струмом за допомогою баластного опору недостатня, якщо не забезпечені необхідні технологічні умови процесу, оскільки таке джерело не забезпечує достатньої протидії лавиноподібному наростанню струму дуги, що створює сприятливі умови в катодній плямі дуги, що утворюється, для її стабілізації. У цьому випадку необ-

хідно застосовувати технічно більш складні та ефективні заходи забезпечення існування тліючого розряду.

З фізичної точки зору, порушення стійкості тліючого розряду є наслідком утворення області підвищеної іонізації в позитивному стовпі розряду або області підвищеної емісії електронів на катоді, причина яких була вказана вище. В обох випадках в міжелектродному проміжку з'являється канал підвищеної провідності, опір якого r значно (на один-два порядки) нижче опору R суміжних незбурених областей тліючого розряду (рис. 2.19).



а)

*а - стійко палаючий тліючий розряд;
б - формування неоднорідності в плазмі розряду;*

Рис. 2.19. Схема утворення каналу підвищеної провідності (подвійно заштрихована область) в тліючому розряді

б)

Через цей канал починає протікати струм, що перевищує струм тліючого розряду і призводить до подальшого локальному розігріву газу. У цьому випадку в струмовому каналі найбільш ймовірно формування і стабілізація дугового розряду з притаманними йому параметрами електричного кола.

Струм у ланцюзі стабільно палаючого тліючого розряду буде визначатися напругою джерела живлення і загальним опором ланцюга

$$i = U (R_{\text{вн}} + R)^{-1}. \quad (2.28)$$

Поява в розряді нестійкості у вигляді струмового каналу на тлі оточуючих його незбурених областей тліючого розряду призводить, з електротехнічної точки зору, до появи в міжелектродному проміжку двох паралельно ввімкнених електричних ланцюгів, що розрізняються опором (рис. 2.19 б). У цьому випадку зниження загального опору кола, призводячи до зростання струму в ньому на величину di , супроводжуватиметься зміною напруги dU на затискачах джерела живлення, що має падаючу зовнішню характеристику

$$di = du \left(R_{\dot{a}i} + \frac{Rr}{R+r} \right)^{-1} \quad (2.29)$$

Враховуючи, що $r \ll R \approx R_{\text{ен}}$, вираз (2.29) можна записати у вигляді

$$di = dU \cdot R_{\text{ен}}^{-1} \quad (2.30)$$

Ступінь впливу нестійкості, що виникла у розряді, на параметри електричного кола, у тому числі на джерело живлення і деталі, що з'єднуються, доцільно оцінювати відносно первісного режиму, тобто, згідно (2.28) і (2.30) як відношення

$$\frac{di}{i} = \frac{du}{u} \cdot \frac{R + R_{\dot{a}i}}{R_{\dot{a}i}} \quad (2.31)$$

У свою чергу, струм стійко палаючого тліючого розряду можна визначити через середню густину струму j_0 в катодній плямі розряду і площу S цієї плями

$$i = j_0 S. \quad (2.32)$$

У цьому випадку зростання струму в тліючому розряді при формуванні в плазмі каналу підвищеної провідності можна описати виразом

$$di = \left(1 + \frac{R}{R_{\dot{a}i}} \right) \frac{\partial u}{u} j_0 S \quad (2.33)$$

Аналіз останнього виразу дозволяє зробити наступні висновки: по-перше, величину зовнішнього опору не має сенсу робити більше, ніж опір розряду, оскільки навіть у разі $R_{\text{ен}} \gg R$ флуктуація струму di зменшиться всього в два рази в порівнянні з варіантом, коли $R_{\text{ен}} = R$; по-друге, обмеження зростання струму di в момент формування в розряді каналу провідності, тобто підвищення стійкості тліючого розряду можна досягти при незмінній початковій густині струму j_0 зменшенням площі поперечного перерізу стовпа тліючого розряду і, відповідно, площі катодної плями S , тобто зниженням розрядного струму, що практично не завжди здійснимо, виходячи з вимоги забезпечення потужності розряду, необхідної для нагрівання катода до заданих температур. У той же час, виконання останньої умови можна забезпечити подрібненням єдиної катодної плями, що розташовується по периметру деталей в зоні з'єднання, на декілька, що існують на поверхні катода незалежно одна від одної із збереженням у кожній з них, при тому ж загальному струмі кола, густині струму j_0 .

Експериментальна перевірка адекватності останнього припущення виконана при нагріванні сталевих заготовок циліндричної форми в середовищі аргону та гелію багатосекційними анодами (рис. 2.20). Кожна з n секцій аноду з'єднувалася з позитивним полюсом джерела живлення через розв'язуючі баластні опори $R_{\text{ан}}$ величиною 100 Ом, що орієнтовно відповідає опорі розряду, тому можна вважати, що струми секцій приблизно однакові і дорівнюють $I_n = I_0 / n$.

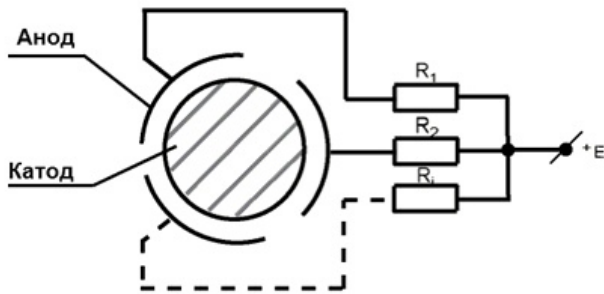
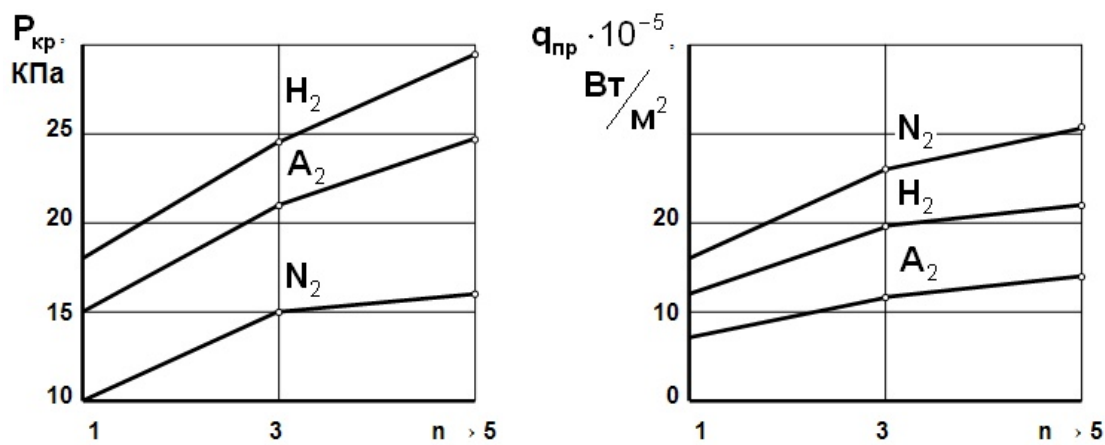


Рис. 2.20. Схема нагрівання заготовок тліючим розрядом із використанням багатосекційного аноду

Оцінювали граничну величину тиску газу, що відповідає моменту переходу тліючого розряду в дуговий. Результати використання суцільного контурного, 3-х та 5-ти секційних анодів показують (рис. 2.21), що при незмінному струмі розряду збільшення числа секцій аноду зсуває межу стійкості тліючого розряду в область більших у 1,35 .. 1,5 та 1,6 .. 1,7 рази тисків газу відповідно для 3-х та 5-ти секційних анодів.



1 - нероз'ємний монолітний електрод;
 3- трьохсекційний анод;
 5 - п'ятисекційний

Рис. 2.21. Залежність граничного тиску газу $P_{\text{кр}}$ та питомої потужності розряду $q_{\text{пр}}$ від кількості секцій анода

Густина струму в катодній плямі (плямах) не вимірювалася, але оскільки для нормального тліючого розряду вона однозначно визначається тиском газу як $j_0 \sim p^2$, це супроводжується помітним її підвищенням з одночасним підвищенням інтенсивності розігріву катода (рис. 2.22).

Другим позитивним наслідком запропонованої схеми нагріву є можливість при більш низькому тиску газу значно підвищувати струм розряду зі збереженням стійкості процесу зварювання.

При вмиканні окремих секцій анода через розв'язуючі баластні опори достатньо великого рівня виникнення дуги на будь-якій ділянці катода або секції анода слабо впливає на режим горіння тліючого розряду на інших секціях. При цьому струм дуги, що виникає, обмежується зовнішнім опором цього ланцюга. Вплив дуги на деталі, що з'єднуються, істотно знижується.

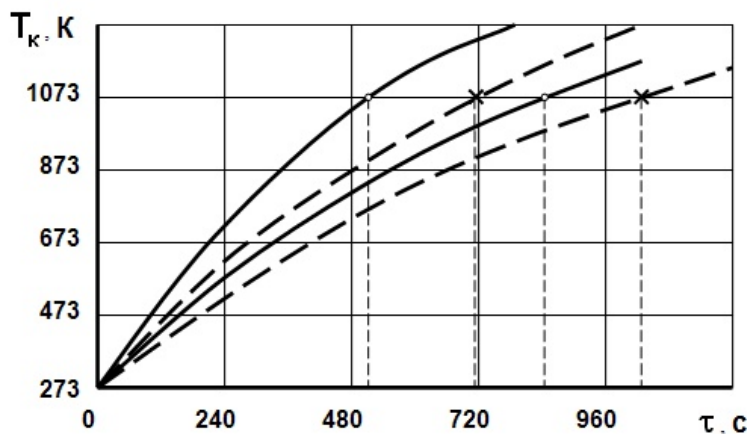


Рис. 2.22. Вплив секціонування анода на продуктивність нагрівання тліючим розрядом

Для того, щоб попередити імовірність формування в міжелектродному проміжку дугового розряду, необхідно, щоб струм на кожній секції анода не перевищував величини порогового (мінімального) струму, при якому можливе утворення й існування катодної плями дуги. Зокрема, для міді, титану, заліза, вольфраму і ряду інших металів величина порогового струму складає 1,2...1,6 А [50]. У цьому випадку кількість анодних секцій необхідно обирати такою, щоб розрядний струм на кожній окремій секції не перевищував 0,8 ... 1,0 А.

Практична реалізація такого способу забезпечила стабільне існування тліючого розряду потужністю до 10...30 кВт в промисловому обладнанні для дифузійного зварювання великогабаритних та масивних виробів.

3. Моделювання теплових процесів при нагріванні та зварюванні у тліючому розряді

3.1 Вибір і аналіз методу математичного моделювання процесу іонного нагрівання

При зварюванні в тліючому розряді, як і в цілому при дифузійному зварюванні, форми виробів і сполучення матеріалів, що з'єднують, надзвичайно різноманітні. При цьому зварні з'єднання у своїй більшості стикові з розвиненою поверхнею контакту [40, 87], напусткові [114], охоплюючі із конічною або циліндричною поверхнею контакту [87].

Конструктивно можна виділити наступні основні типи виробів і з'єднань (рис.3.1), що отримують ефективно методом дифузійного зварювання в тліючому розряді, які розрізняються як за формою й площею поверхонь, що стикуються, так і за умовами відводу тепла із зони нагрівання:

1. Суцільні масивні із плоскою поверхнею стику:
 - з рівновеликих елементів (рис.3.1 а, в, д);
 - з різних за розмірами та масою елементів (рис.3.1б, г, е);
 - с гладкою бічною поверхнею (рис.3.1 а-е);
 - оребрені або з виступами (рис. 3.1 ж).
2. Те ж саме, з фігурною поверхнею стику (частіше спостерігається при ремонтному зварюванні).
3. Конструкції з наскрізними або нескрізними каналами. Стільникові конструкції (рис.3.1з).

Різноманіття форм і матеріалів виробів обумовлює особливості організації технологічного процесу їхнього нагрівання тліючим розрядом при зварюванні.

У роботі [100] пропонується характеризувати особливості нагрівання виробів, що зварюють, величиною відношення $\alpha = S_n/S_{св.}$, де S_n і $S_{св.}$ -відповідно площі поверхонь нагрівання й зварювання (рис. 3.1). Відношення $\alpha > 1$ характеризує інтенсивне рівномірне нагрівання всього перетину деталей, у т.ч. і зони зварювання. Теплова інерція тіл, що нагрівають, у цьому випадку незначна, при поверхневому нагріванні вони швидше сприймають тепло й швидше охолоджуються при відключенні джерела енергії. Як наслідок, при нагріванні таких тіл підвищуються вимоги до точності регулювання потужності джерела й розподілу енергії, що виділяється ним на поверхні виробів, що зварюють. При $\alpha < 1$ підвищений термічний опір матеріалу заготівель знижує інтенсивність нагрівання, і тепло до глибинних ділянок з'єднання доходить довше.

Слід враховувати, що на характер розподілу теплових полів в об'ємі заготовок можуть впливати елементи притискного пристрою, які безпосередньо контактують з ними і в певній мірі змінюють напрямки теплових потоків в цій системі. На характер теплових та температурних полів в заготовках впливає також відносно значна тривалість нагрівання тліючим розрядом, коли стає помітною тепловіддача з бічних поверхонь заготовок у навколишній простір.

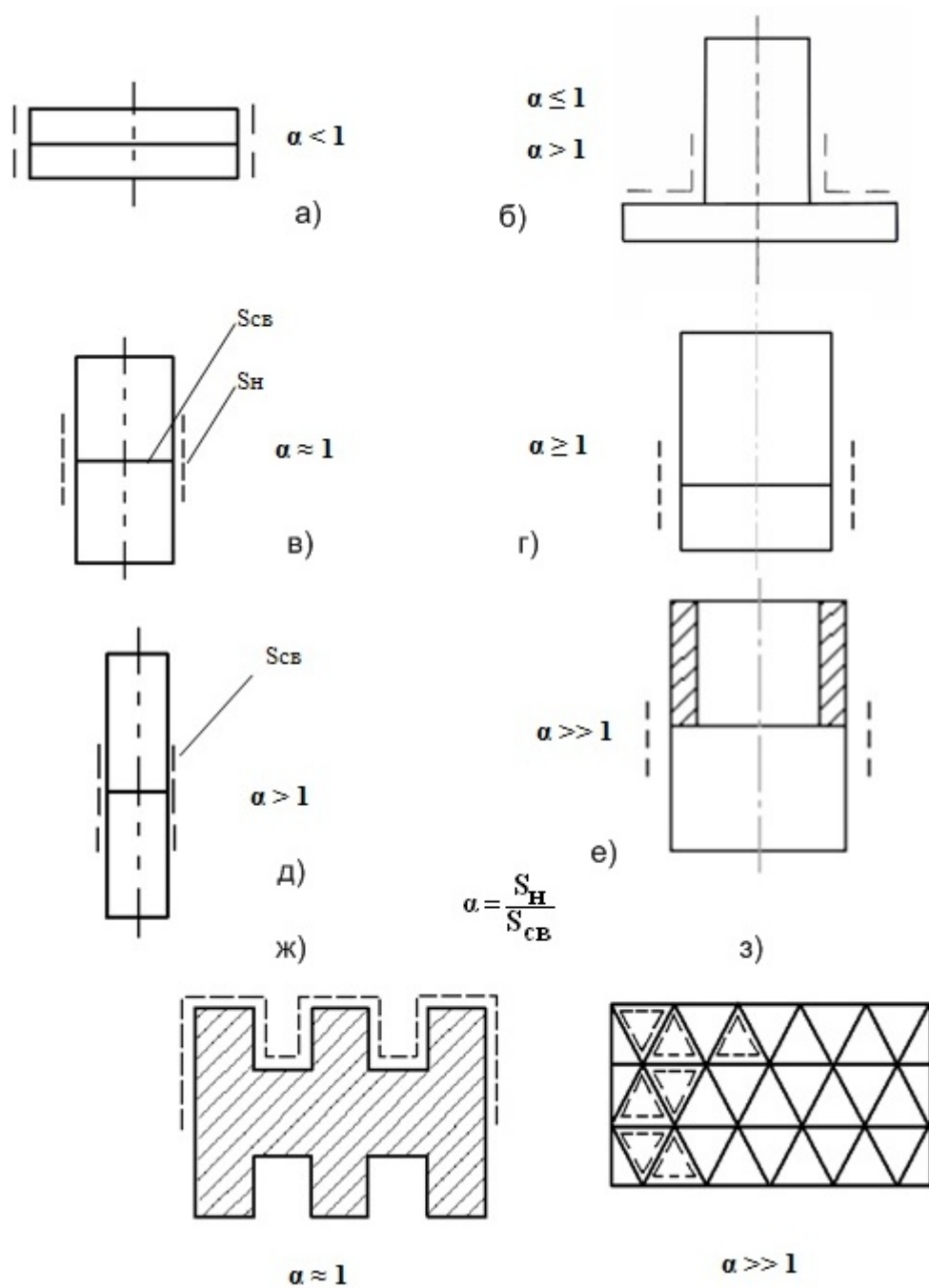


Рис. 3.1 - Типові вироби, що з'єднують зварюванням у тліючому розряді.

Процес зварювання в тліючому розряді, як вже відзначалось, характеризується температурою нагрівання деталей, що зварюють, зусиллям їхнього стищення, тривалістю процесу зварювання, активністю захисного середовища. Залежно від форми, розмірів і матеріалу виробів ці параметри можуть змінюватися в значних межах. Разом із тим, якість зварювання визначається їхнім комплексним впливом, при цьому безпосередній контроль формування з'єднання в ході зварювання неможливий, контролюються тільки перераховані параметри

процесу. Оптимальні значення кожного параметра в конкретних умовах зварювання визначаються за результатами досліджень з руйнуванням отриманих зварних зразків або виробів. Найчастіше зона оптимуму займає досить вузький інтервал в області можливих значень параметрів (рис.3.2) [87]. Вихід будь-якого параметра із зони оптимуму знижує міцнісні характеристики з'єднання, призводячи до появи характерних дефектів – непроварів, значної залишкової деформації, підвищених внутрішніх напружень.

Численними дослідженнями [72, 87] встановлено, що переважний вплив на якість зварного з'єднання має температура зони зварювання, оскільки коефіцієнт дифузії й швидкість повзучості металів і більшості неметалічних матеріалів істотно зростають із підвищенням температури [74]. Разом із тим, як впливає з рис. 5.2, залежність міцності з'єднання від температури, на відміну від інших параметрів, має помітно екстремальний характер, обумовлений недостатнім рівнем протікання дифузійних процесів при низьких температурах і зниженням міцності з'єднання в результаті збільшення розмірів зерна при підвищених. Тому, проблема контролю й стабілізації температури нагрівання деталей на оптимальному режимі зварювання, а також формування необхідного розподілу температури по перетину зварного контакту представляється особливо важливою.

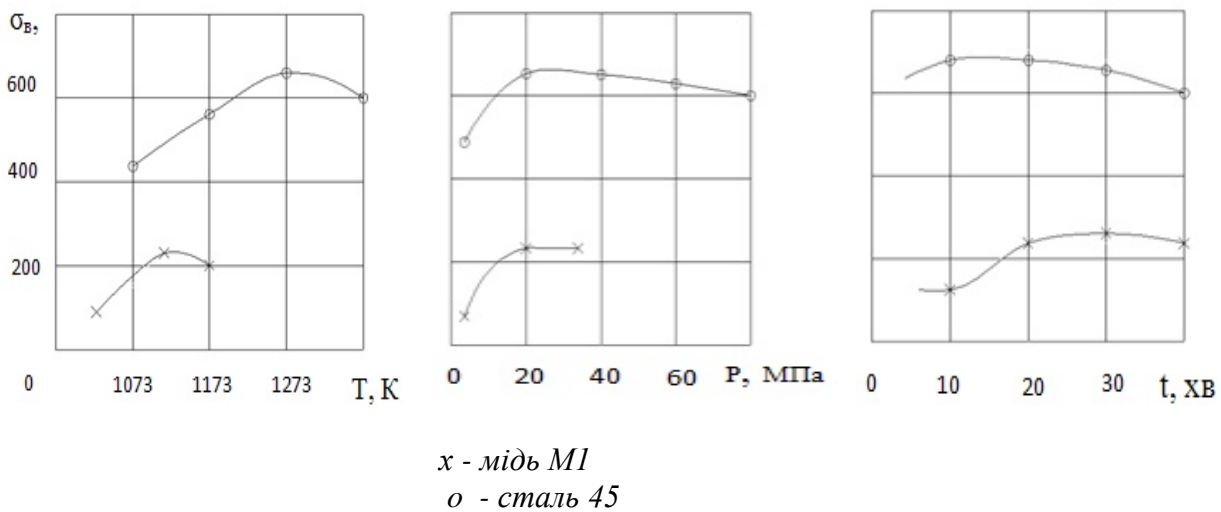


Рис. 3.2. Залежність міцності зварних з'єднань від режиму дифузійного зварювання [72]: температури (а), зусилля стискування (б), тривалості ізотермічної витримки (в)

В той же час безпосередній контроль температури зони зварювання в тліючому розряді як контактними (термопар), так і безконтактними (оптичні та фотоелектричні пірометри) утруднений або досить неточний. У першому випадку висока температура плазми позитивного стовпа тліючого розряду, яка при тисках газу 4...15 кПа досягає 1500...2500 К, призводить до перегрівання та обгорання тонких дротів термопар. Застосуванню безконтактних способів перешкоджає вплив випромінювання розрядної плазми, а також невизначеність коефіцієнтів проходження випромінювання через скло ілюмінаторів робочої камери в результаті їх можливого часткового запилення в процесі зварювання внаслідок ефекту катодного розпилення матеріалу зварюваних деталей. Тому з ме-

тою скорочення кількості вимірів і формування безперервної інформації про тепловий стан зони зварювання на етапі нагрівання й ізотермічної витримки доцільно здійснювати розрахунковий контроль теплового стану деталей, що зварюють.

Розрахункові методи повинні дозволяти визначати:

- абсолютні середні значення температури нагрівання деталей, що зварюють, і в першу чергу в зоні з'єднання, у будь-який момент часу;
- розподіл температури в зоні зварного контакту деталей;
- енергію, необхідну для забезпечення заданих температурних умов зварювання.

Для керування зварювальним процесом необхідно формалізувати завдання, тобто описати його досить строго математичними залежностями, при цьому об'єкт керування заміняється математичною моделлю, що характеризує ті особливості процесу, які істотні для керування. Доцільно прагнути до побудови порівняно простих математичних моделей, що відбивають саме істотні сторони процесу зварювання [91, 123].

При побудові моделі процесу нагрівання деталей тліючим розрядом в умовах дифузійного зварювання слід враховувати наступні положення:

- температура нагрівання деталей, що зварюють, у тому числі й поверхонь, що з'єднують, однозначно визначається параметрами режиму горіння тліючого розряду;
- зміна параметрів режиму приводить до зміни абсолютних значень температури зони нагрівання, швидкості її зміни у часі й характеру розподілу по перетину деталей.

Таким чином, вхідними параметрами при моделюванні необхідно обирати параметри, що характеризують режим горіння тліючого розряду, вихідним параметром - температуру нагрівання, у загальному випадку в будь-якій довільній точці (ділянці) в об'ємі деталей, в окремому випадку – у зоні зварного контакту.

Статистичні (статичні) моделі, описувані виразом у вигляді [147]

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{j=1}^n a_j x_j, \quad (3.1)$$

встановлюючи таку залежність між параметрами, дозволяють визначати граничні значення температур зони зварювання, що досягаються на заданих режимах нагрівання. Однак, їхнє використання для контролю поточного теплового стану деталей з метою оптимізації процесу нагрівання недоцільне, оскільки вони дозволяють оцінювати стан об'єкта тільки в один момент часу, не враховують передісторії процесу й не дозволяють прогнозувати його поведінку на наступний інтервал часу й, тим самим, не дозволяють ефективно корегувати режим нагрівання.

В той же час, досвід застосування моделювання в різних галузях показує, що статистичні моделі є досить точними, однак їх не можна застосовувати для інших матеріалів і поза діапазоном варіювання параметрів режиму, для якого

проведено експерименти. До того ж, як усякі апроксимаційні залежності, вони позбавлені фізичного змісту.

В умовах широкого кола типорозмірів виробів і матеріалів, що зварюють, більш ефективним, очевидно, є застосування інформаційно більш змістовних моделей, побудованих на основі аналітичних залежностей, що враховують фізичні закономірності теплообміну й тепловий баланс у системі джерело нагрівання - деталі, що зварюються. Такі детерміновані моделі порівняно із статистичними є більш універсальними, володіють гнучкістю та наочністю [139].

Фундаментальні аналітичні залежності для найбільш загальних випадків нагрівання розроблені [90, 121] і показали свою ефективність, у тому числі й для моделювання процесів зварювання плавленням [45, 139, 150]. Крім того, такі моделі є динамічними, тобто характеризують зміну температури у часі, що дає можливість оптимізації параметрів джерела в процесі нагрівання. Тому саме цей клас моделей знайшов найбільше поширення в технічних задачах.

Нагрівання виробів у тліючому розряді – це сукупність взаємозалежних потоків енергії, матеріалу катода (виробу) і газового середовища, що діють у розглянутій системі як єдине ціле.

Різноманіття типів зварних з'єднань та сполучень матеріалів, одержуваних дифузійним зварюванням у тліючому розряді, диктує й розмаїтість схем нагрівання деталей, що зварюють. Нагрівання плоских катодів може бути однобічним або двостороннім із застосуванням смугових, подковоподібних або охоплюючих (у вигляді замкненого контуру) анодів (рис. 2.4), для нагрівання циліндричних зразків використовують кільцеві аноди. Вироби більш складної форми вимагають нагрівання по периметру поверхонь, що з'єднують, з використанням анодів відповідної конфігурації. Відповідно до форми анода катодна пляма тліючого розряду може розташовуватися по всьому периметру заготівель, що зварюють, або на частині його. Оскільки енергія в катодній плямі тліючого розряду розподіляється за нормальним законом [110], можливо прийняти, що нагрівання здійснюється нормально - смуговим джерелом. Звичайно, крім окремих випадків, анод розташовують еквідистантно перетину деталей, що нагріваються. У цьому випадку енергія розряду, що виділяється в катодній плямі, рівномірно розподілена по периметру деталей. Тепло, що вводиться у виріб через катодну пляму на його поверхні, за допомогою теплопровідності поширюється по об'єму металу.

Зварювання в тліючому розряді застосовується при виготовленні досить широкої номенклатури виробів, що розрізняються габаритами, формою й характеристиками матеріалів. Зокрема, габарити виробів, що зварюють, можуть відрізнятися на декілька порядків. Ці відмінності природньо будуть призводити до зміни умов нагрівання виробів і характеру температурних полів у них. Врахувати ці відмінності й розділити, тим самим, зварювані вироби за умовами нагрівання можливо, зокрема, використовуючи раніше згадуваний коефіцієнт форми $\alpha = S_n / S_{cs}$ ($1 \leq \alpha \leq I$), однак цим коефіцієнтом не враховуються властивості матеріалів, що зварюють. Більш суворим для цих цілей є застосування критерію Біо [140] $Bi = \alpha S / \lambda$, де α – коефіцієнт поверхневої тепловіддачі, λ – коефіцієнт теп-

лопровідності матеріалу виробу, S – габарити виробу (радіус для циліндричних або напівтовщина для плоских виробів).

При величині цього критерію $Bi < 0,1 \dots 0,12$ виріб відносять до теплофізично “тонких” тіл [140], поверхнєве нагрівання яких супроводжується досить рівномірним прогрівом усього перетину з відносно малим перепадом температури усередині виробу. У результаті, задача розрахунку температури в тілі зводиться до визначення температури його поверхні або будь-якої іншої точки тіла. При збільшенні розмірів поперечного перерізу деталей, коли величина критерію Bi перевищує зазначені значення, зростаючий тепловий опір у радіальному напрямку призводить до того, що температурне поле в перерізі, що нагрівається, стає істотно нерівномірним. Вироби в процесі нагрівання поводяться як «масивні» тіла, для яких неможливо знехтувати перепадом температур по їх перетину.

Вочевидь, ці особливості нагрівання необхідно враховувати при побудові моделей теплових процесів при зварюванні тіл різних класів.

На першому етапі доцільна розробка спрощених лінійних моделей на основі наступних припущень:

- теплофізичні характеристики матеріалів, що нагріваються, є постійними у часі й просторі і мають кількісні значення, що відповідають деяким середнім значенням у досліджуваному діапазоні температур;
- граничні умови постійні й не змінюються в процесі нагрівання.

3.2 Моделювання теплового стану зони з'єднання різнорідних металів при дифузійному зварюванні в тліючому розряді теплофізично “тонких” тіл.

Тліючий розряд в умовах зварювання являє собою джерело нагрівання з нормальним розподілом теплового потоку в катодній плямі розряду [110], що розташовується на бічній поверхні заготівель, що з'єднують. При використанні контурного аноду (замкненого або незамкненого), встановлюваного на відстані $(5 \dots 20) \cdot 10^{-3}$ м від поверхні деталей поблизу зони їхнього контакту, катодна пляма розряду, через яке здійснюється введення енергії в з'єднуванні деталі, являє собою смугу, що замикається по периметру деталей (рис. 3.3), ширина якої визначається коефіцієнтом зосередженості тліючого розряду, що становить в умовах зварювання $k=0,1 \dots 0,5 \text{ см}^{-2}$ залежно від струму розряду й тиску газу. Таке нормально-смугове джерело може бути замінено зосередженим кільцевим джерелом [17, 150], що діє по периметру зони контакту деталей, теплота якого

уведена на відрізок часу t_0 раніше. Тривалість $t_0 = \frac{1}{4ak}$ для зазначених вище значень коефіцієнта зосередженості й різних матеріалів, що з'єднують, (вуглецеві й нержавіючі сталі, титан і його сплави, тверді сплави та ін.) становить 5...30 с.

Для виробів, які мають обмежені розміри перетину в зоні зварювання або високу теплопровідність і для яких величина критерію Био виявляється незначною $0,01 \leq Bi < 0,1$, що дозволяє вважати такі вироби в теплофізичному розумінні "тонкими" [140], характерним є переважне поширення теплоти від поверхні, де діє джерело, у радіальному напрямку вглиб виробу й досить рівномірний наскрізний прогрів його перетину.

Згідно [150], процес вирівнювання температур у тонкому круглому диску, яким є зона контакту деталей, від дії миттєвого кільцевого джерела, що розташовується у вигляді кільця радіусом r_0 на поверхні з'єднуваних деталей, може бути описаний функцією

$$\Phi(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_0(\mu_n \cdot \frac{r}{r_0})}{I_0(\mu_n)} \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot \frac{a \cdot t}{r_0^2}}, \quad (3.2)$$

де μ_n – корінь рівняння $I_1(\mu_n) = 0$;

I_0, I_1 – функція Бесселя першого роду нульового й першого порядків;

r – поточний радіус заготовівель у зоні контакту.

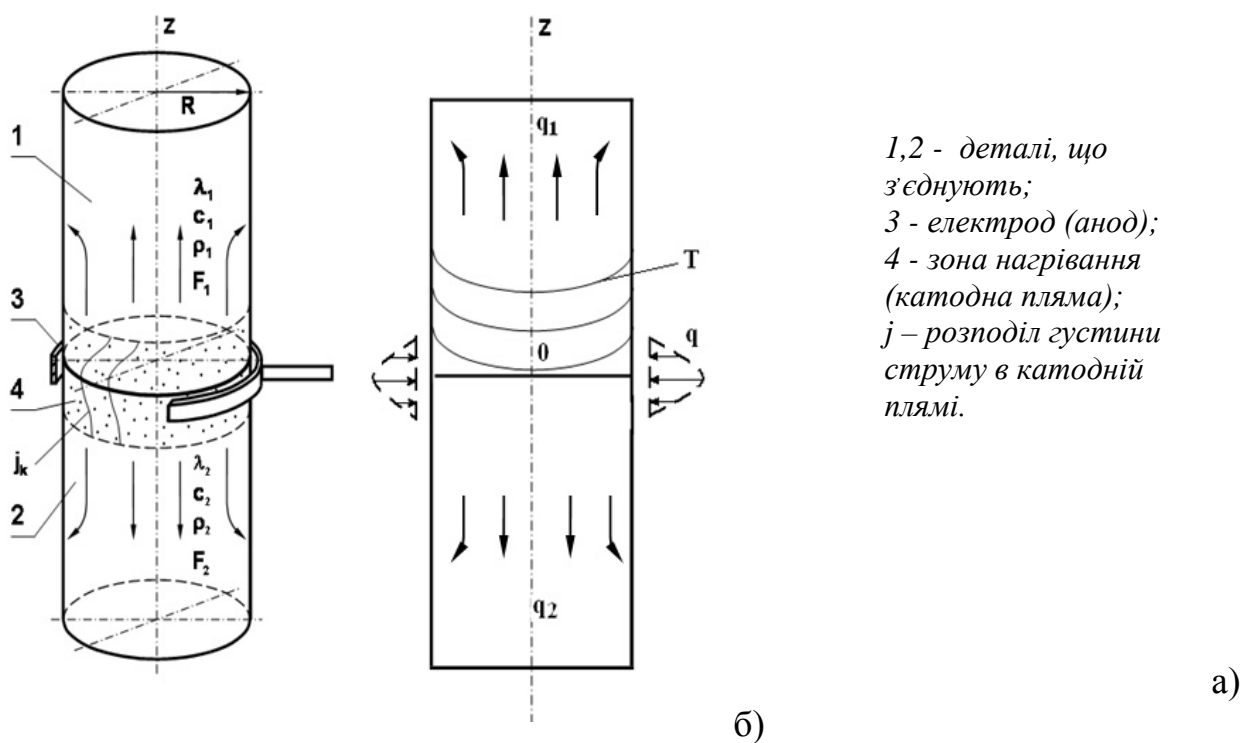


Рис.3.3 - Схема нагрівання (а) і характер розподілу температур у зоні контакту (б) при нагріванні тліючим розрядом зразків з обмеженою площею поперечного переріза (інші позначення наведені в тексті)

З (4.6) випливає, що тривалість прогріву перетину визначається габаритами деталей, що з'єднують, коефіцієнтом їх температуропровідності й характеризується безрозмірним часом (критерій Фур'є)

$$\tau = \frac{at_1}{r_0^2}$$

Прогрів перетину, близький до рівномірного, коли перепад температур між поверхнею й центральними областями деталей не перевищує 5%, настає, згідно значень функції $\Phi(r, t)$ ([166, рис. 17.21], при $\tau \geq 0,25$. Остання умова дозволяє в реальному масштабі часу оцінити тривалість наскрізного прогріву зони контакту, яка для зазначених вище матеріалів і габаритів заготівель становить $t_1 \leq 40$ с. Таким чином, можливо вважати, що через відрізок часу t_1 відносно моменту фактичного запалювання тліючого розряду, у площині контакту деталей ($z = 0$) формується плоске джерело теплоти. У цьому випадку, нагрівання тліючим розрядом розглянутих заготівель може бути зведеним до схеми нагрівання напівнескінченних стрижнів плоским джерелом теплоти, що діє в зоні їхнього контакту. Зміна температури в зоні з'єднання однорідних заготівель від дії такого миттєвого плоского джерела, розташованого в цій зоні, при симетричному відтоку теплоти в обидві заготівлі описується виразом [151]

$$dT = \frac{2 \cdot q \cdot dt}{F \cdot c\rho \sqrt{4 \cdot \pi \cdot a \cdot t}} e^{-\frac{z^2}{4 \cdot a \cdot t} - b \cdot t}, \quad (3.3)$$

де q – потужність розряду;

$c\rho$ – об'ємна теплоємність матеріалу виробу;

F – площа поперечного перерізу заготівель у зоні контакту;

t – тривалість нагрівання;

$b = \frac{\alpha \cdot P}{c\rho \cdot F}$, c^{-1} – коефіцієнт температуровіддачі (P – периметр катода,

тобто заготівель, що з'єднують,).

При зварюванні різнорідних металів, де застосування дифузійного зварювання найбільше ефективно, у виразі (3.3) варто враховувати нерівномірність поширення теплових потоків із зони контакту, де діє передбачуване плоске джерело, у з'єднуванні деталей, що обумовлена різницею як теплофізичних властивостей матеріалів деталей, які загалом характеризуються коефіцієнтом акумуляції $\sqrt{\lambda c\rho}$ теплоти [90], так і площ поперечного перерізу деталей у зоні контакту.

У випадку дії в площині розділу деталей ($z=0$) миттєвого плоского джерела потужністю q у з'єднуванні деталі надійде кількість теплоти, відповідно, q_1 і q_2 за умови $q_1 + q_2 = q$.

Із цієї умови, а також, з умови рівності температур контактуючих торців заготівель $T_1(0, t) = T_2(0, t)$ випливає, що

$$q_1 = \frac{q \cdot F_1}{F_1 \cdot \sqrt{\lambda_1 \cdot c_1 \cdot \rho_1} + F_2 \cdot \sqrt{\lambda_2 \cdot c_2 \cdot \rho_2}}. \quad (3.4)$$

Аналогічний вид має вираз й для потоку q_2

$$q_2 = \frac{q \cdot F_2}{F_1 \cdot \sqrt{\lambda_1 \cdot c_1 \cdot \rho_1} + F_2 \cdot \sqrt{\lambda_2 \cdot c_2 \cdot \rho_2}}. \quad (3.5)$$

Для визначення збільшення температури в зоні контакту різнорідних металів у випадку нагрівання безперервно діючим плоским джерелом перетворимо (3.3) з врахуванням (3.4) і (3.5) і отриманий вираз проінтегруємо в інтервалі від 0 до t_1

$$T(z,t) = \frac{q}{(F_1 \cdot \sqrt{\lambda_1 \cdot c_1 \cdot \rho_1} + F_2 \cdot \sqrt{\lambda_2 \cdot c_2 \cdot \rho_2}) \cdot \sqrt{\pi}} \int_0^{t_1} e^{-\frac{z^2}{4 \cdot a \cdot t} - b \cdot t} \frac{dt}{\sqrt{t}}, \quad (3.6)$$

де $t_H = t + t_0 - t_1$ – тривалість нагрівання;

t – поточний час.

Для спрощення у виразі (3.6) можливо прийняти t_0 , t_1 , b середньоарифметичними відповідних величин для матеріалів, що з'єднують. Це спрощення, очевидно, вносить певні похибки в розрахункову залежність, але, оскільки коефіцієнти температуровіддачі для різних металів розрізняються не настільки істотно, а значення постійних часу t_0 й t_1 становлять незначну частину в загальній тривалості нагрівання, його можна вважати припустимим.

Вираз (3.6) дозволяє визначати температуру в будь-якій точці деталей, що зварюють, уздовж вісі oz . Однак, оскільки найбільший практичний інтерес представляє оцінка теплового стану зони зварного контакту $z=0$, це дозволяє спростити останній вираз, представивши його у вигляді

$$T(0,t) = \frac{q}{(F_1 \cdot \sqrt{\lambda_1 \cdot c_1 \cdot \rho_1} + F_2 \cdot \sqrt{\lambda_2 \cdot c_2 \cdot \rho_2}) \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \int_0^{t_1} e^{-b \cdot t} \frac{dt}{\sqrt{t}}. \quad (3.7)$$

Інтеграл у виразі (3.7) у явному вигляді взяти не вдається, тому його рішення знаходили розкладанням підінтегрального виразу в ряд Тейлора з почленним інтегруванням [171]

$$\int_0^t e^{-bt} \frac{dt}{\sqrt{t}} = 2\sqrt{t} \left(1 - \frac{bt}{3} + \frac{b^2 t^2}{10} - \dots + \frac{(-1)^n b^n t^n}{(2n+1)n!} \right). \quad (3.8)$$

З врахуванням (3.8) вираз (3.7), що описує процес нарощування у часі температури в зоні контакту поверхонь, що з'єднують, приймає вид

$$T(t) = \frac{q\sqrt{t}}{2\sqrt{\pi} \cdot (F_1 \sqrt{\lambda_1 \cdot c_1 \cdot \rho_1} + F_2 \sqrt{\lambda_2 \cdot c_2 \cdot \rho_2})} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n b^n t^n}{(2n+1)n!}, \quad (3.9)$$

У наведених вище виразах q - потужність розряду, що вводиться у зварні вироби, величина якої, у загальному випадку

$$q = \eta_0 \cdot I_p \cdot U_p \quad (3.10)$$

визначається струмом розряду I_p та падінням напруги на міжелектродному проміжку U_p , тобто параметрами, які контролюються й досить легко регулюються в процесі зварювання. η_0 – ефективний к. к. д. нагрівання тліючим розрядом, значення якого для різних умов були визначені раніше.

Експериментальну перевірку адекватності отриманої моделі робили за результатами нагрівання тліючим розрядом в атмосфері азоту складених циліндричних зразків зі сталі $12X18H10T$, міді $M1$ і титанового сплаву $BT-3-1$ діаметром $0,028$ м в однорідному й різнорідному сполученнях. Довжина зразків перевищувала їхній діаметр в $2,5 \dots 3$ рази, що дозволяє прийняти поширення теплоти одномірним уздовж заготівель і використати для розрахункового визначення температури зони з'єднання вираз (3.9), що характеризує нагрівання плоским джерелом двох дотичних напівнескінченних тел. Температуру зони контакту контролювали хромель-алюмелевою термопарою в центрі зразка (рис. 3.4). Для зниження похибки вимірів термопари в кожній парі металів закріплювалися в зразку, що має менший тепловий опір (у мідному й сталевому відповідно). Нагрівання здійснювали за схемою, наведеною на рис. 3.3.

Визначені експериментально за результатами дослідів для кожної пари зразків і отримані розрахунковим методом значення температур нагрівання наведені на рис. 3.4, звідки видно, що розрахункові значення температур наближаються до фактичних, випереджаючи їх на різних етапах нагрівання на $40 \dots 90$ К для мідно-сталевих і $70 \dots 150$ К для титано-сталевих зразків.

Порівняльний аналіз результатів показує, що на всіх етапах нагрівання розрахункові значення температур у зоні зварного контакту перевищують фактичні на $9 \dots 14$ %. Викликано це може бути, в основному, подвійним модельним перетворенням тліючого розряду як розподіленого джерела енергії, зосередженим, розташованим спершу на поверхні заготівель, а потім у площині їхнього контакту.

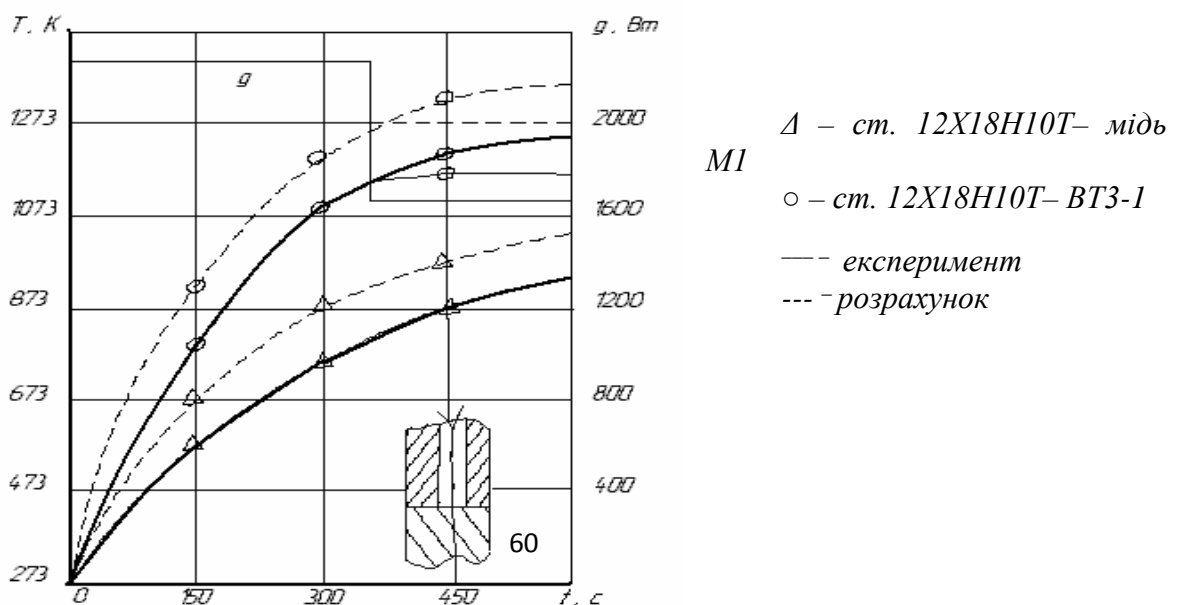


Рис. 3.4. Характер зміни температур у зоні контакту різнорідних стержньових зразків при нагріванні тліючим розрядом

Однак, оскільки цей недолік моделі, представленої виразом (3.9), приблизно однаковою мірою буде присутній і в інших умовах нагрівання, цю похибку можна вважати методичною для її усунення можливо скористатися рекомендаціями В. І. Махненка для підвищення точності розрахункових теплових моделей процесів поверхневого наплавлення, наведених в [123] і які полягають у коректуванні теплофізичних величин, що входять до моделі. У першу чергу, рекомендується звернути увагу на коефіцієнт поверхневої тепловіддачі, як найбільш температурозалежний параметр. Результати розрахунків, наведені на рис. 5.4, отримані при величині цього коефіцієнта $\alpha = 60 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$, що відповідає, згідно рекомендацій М. М. Рикаліна [151], середній температурі при зварюванні $T = 873$ К. У той же час, як впливає з рис. 3.4а, переважає частина тривалості нагрівання пари сталь-титан, температура зварювання якої становить близько 1273 К, протікає при істотно більш високих температурах, що дозволяє підвищити температурний інтервал для визначення коефіцієнта поверхневої тепловіддачі й відповідного йому коефіцієнта температуровіддачі з бічної поверхні деталей, що нагрівають, що входить у розрахункову модель. Зокрема, для середньої температури $T = 1023$ К і відповідного їй значення $\alpha = 90 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ для пари сталь-титан похибка моделі (3.9) в інтервалі температур нагрівання 873...1273К знижується до 4...7 % і, вочевидь, у такий спосіб може бути досягнута задовільна адекватність для будь-яких металів, що з'єднують.

3.3. Прогнозування теплового стану зони з'єднання різнорідних металів при дифузійному зварюванні з іонним нагрівом теплофізично “масивних” тіл

Досвід застосування тліючого розряду середніх тисків [99, 100] показав що завдяки технологічним можливостям і високій економічності він є ефективним джерелом нагрівання при дифузійному зварюванні виробів малих і середніх габаритів [88] з однорідних і різнорідних матеріалів. Розроблені останнім часом способи стабілізації його горіння в умовах підвищених потужностей й густин енергії розширюють область застосування тліючого розряду для зварю-

вання великогабаритних заготовель із істотно розвиненими з'єднуваними поверхнями.

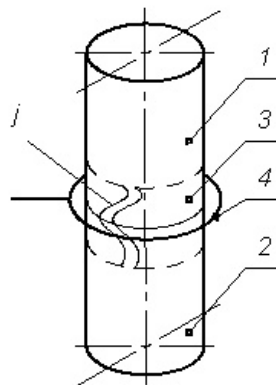
При зварюванні в тліючому розряді теплова енергія в зону з'єднання надходить через бічну поверхню тіл, що нагрівають. У цьому випадку, особливо при зварюванні металів з низьким коефіцієнтом теплопровідності (нержавіючі сталі, титан і його сплави й т.д.), досить складно забезпечити рівномірний прогрів перетину заготовель. Зі збільшенням густини енергії в плямі нагрівання градієнт температур у перетині заготовель зростає й при питомій потужності $150... 200 \text{ Вт/см}^2$ у приповерхневих шарах заготовель із аустенітних сталей може досягати $60...75 \text{ }^\circ\text{C/мм}$ [156]. Така нерівномірність нагрівання сприяє появі значних залишкових об'ємних напружень у з'єднуваних матеріалах, здатних привести до їхнього руйнування.

Для попередження значних температурних градієнтів при нагріванні теплофізично "масивних" тіл необхідно обмежувати поступаючий на їхню поверхню тепловий потік. Однак, це приводить до затягування процесу нагрівання й зниженню продуктивності зварювання, а також, сприяє погіршенню механічних властивостей матеріалів, що з'єднують, внаслідок тривалого перебування їх в умовах підвищених температур. Звідси випливає доцільність попереднього визначення й завдання режимів горіння тліючого розряду і, відповідно, інтенсивності нагрівання, що забезпечують необхідну рівномірність температурного поля в перетині заготовель.

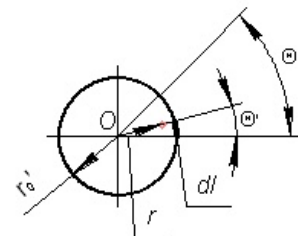
Це викликає необхідність розробки аналітичних методів, що дозволяють розрахунковими методами визначати температуру в будь-якій точці перетину заготовель і прогнозувати характер зміни температурних полів у зоні зварювання у часі в залежності від абсолютних і питомих енергетичних характеристик джерела нагрівання, яким у даному випадку є нормальний тліючий розряд.

Оскільки номенклатура типорозмірів деталей, що з'єднують, при дифузійному зварюванні надзвичайно широка, розробити універсальну модель не представляється можливим. Тому, у якості вихідних обрані два найбільш характерні типорозміри, що істотно відрізняються умовами нагрівання й до яких, з деякими припущеннями, може бути віднесена більшість деталей, що з'єднують.

1,2- деталі, що з'єднують;
3 - зона нагрівання (катодна пляма);
4 - анод;
 j – густина струму в катодній плямі.



а)



б)

Рис. 3.5 - Схема нагрівання (а) і розрахункова схема (б) при зварюванні в тліючому розряді масивних циліндричних заготовель

До першої групи варто віднести циліндр і подібні йому тіла, що представляють у перетині квадрат, правильний багатогранник і інші, перетин яких рівномірно розвинений відносно однієї з координатних осей. При нагріванні таких тіл катодна пляма тліючого розряду, через яку передається енергія, розташовується у вигляді замкненої смуги по периметру заготовель, що з'єднують, у зоні їхнього контакту (рис. 3.5). Оскільки тліючий розряд має нормальний розподіл енергії у плямі нагрівання [110], то таке нормально-смугове джерело може бути представленим у вигляді сукупності нормально-лінійних джерел, рівномірно розподілених уздовж периметра заготовель (рис. 3.5а). Кожне таке джерело, у свою чергу, може бути замінено зосередженим точковим джерелом потужністю q , що діє на відрізок часу t_0 раніше.

Зміна температури в циліндричних заготовлях від дії такого миттєвого точкового джерела буде визначатися, згідно [151], як

$$T(t) = \frac{q \cdot e^{-\frac{z^2}{4at}}}{c\rho \cdot r_0^2 \sqrt{4\pi \cdot a \cdot t}} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{I_0(\mu_k \frac{r}{r_0})}{I_0(\mu_k)} \cdot \exp[-\mu_k^2 \cdot \frac{a \cdot t}{r_0^2}] \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \cos n(\Theta - \Theta'), \quad (3.11)$$

де a – температуропровідність матеріалу заготовель;

$c\rho$ - об'ємна теплоємність;

μ_k – корінь рівняння $I_1(\mu_k) = 0$;

r_0 – радіус деталей, що з'єднують;

$I_0(\mu_k), I_1(\mu_k)$ – функції Бесселя першого роду нульового й першого порядку від дійсного аргументу.

При зварюванні в тліючому розряді циліндричних заготовель анод такої ж форми розташовують еквідистантно їх бічної поверхні, що нагрівається, у зв'язку із чим умови нагрівання будь-якої точки (r, Θ, z) усередині циліндра виявляються рівноцінними, тобто температурне поле буде осесиметричним.

Звідси, рішення для миттєвого кільцевого джерела, до якого в результаті приводиться нормально-смугове джерело, що діє на бічній поверхні циліндра, може бути отримано інтегруванням виразу (3.11) по Θ' в межах від 0 до 2π .

У результаті вираз для поширення теплоти від дії миттєвого кільцевого джерела, розташованого уздовж периметра зони контакту деталей, прийме вигляд

$$T(t) = \frac{q \cdot e^{-\frac{z^2}{4at}}}{c\rho \cdot r_0^2 \sqrt{4\pi \cdot a \cdot t}} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{I_0(\mu_k \frac{r}{r_0})}{I_0(\mu_k)} \cdot \exp[-\mu_k^2 \cdot \frac{a \cdot t}{r_0^2}]. \quad (3.12)$$

У цьому випадку зміна температур в області контакту деталей (при $Z = 0$) при їхньому нагріванні безперервно діючим джерелом з урахуванням тепловіддачі з бічної поверхні буде описуватися виразом

$$T(t) = \frac{q \cdot e^{-bt}}{c\rho \cdot r_0^2 \sqrt{4\pi \cdot a}} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{I_0(\mu_k \frac{r}{r_0})}{I_0(\mu_k)} \cdot \int_0^t \exp[-\mu_k^2 \cdot \frac{a \cdot t}{r_0^2}] \frac{dt}{\sqrt{t_1}}, \quad (3.13)$$

де $t_1 = t + t_0$

$b = \frac{2\alpha}{c\rho r_0}$ – коефіцієнт температуровіддачі з бічної поверхні заготівель.

Близькі залежності отримані й у роботах [123,166] для розрахункового визначення температур у суцільних циліндрах при поверхневому наплавленні швидкодіючим нормально-розподіленим джерелом теплоти по гвинтовій траєкторії малого кроку, де наведені також рекомендації з їхнього вирішення.

При зварюванні заготівель, поперечний переріз яких не є вісесиметричним й помітно розвинений у напрямку однієї з координатних вісей, використовується інша схема нагрівання (рис. 3.6а). У цьому випадку доцільно здійснювати симетричне нагрівання заготівель із боку поверхонь, що мають більшу площу, що забезпечує більш рівномірне нагрівання перетину заготівель. Нагрівання, як і в попередньому випадку, здійснюється нормально-смуговими джерелами, що розташовуються симетрично відносно зони контактування деталей на їхніх бічних поверхнях. Таке нормально-розподілене джерело, як і раніше, може розглядатися як сукупність нормально-лінійних джерел, що розташовуються впоперек зони з'єднання деталей (рис. 3.6, а), кожний з яких може бути замінений зосередженим точковим джерелом, діючим на відрізок часу t_0 раніше. Кожний з лінійних джерел, що діють на відрізках $O_1 - O_1$ і $O_2 - O_2$, розглядають як сукупність миттєвих точкових джерел потужністю $dq = q \cdot \frac{dy}{l}$ за умови рівномірного розподілу тепловиділення на зазначених відрізках.

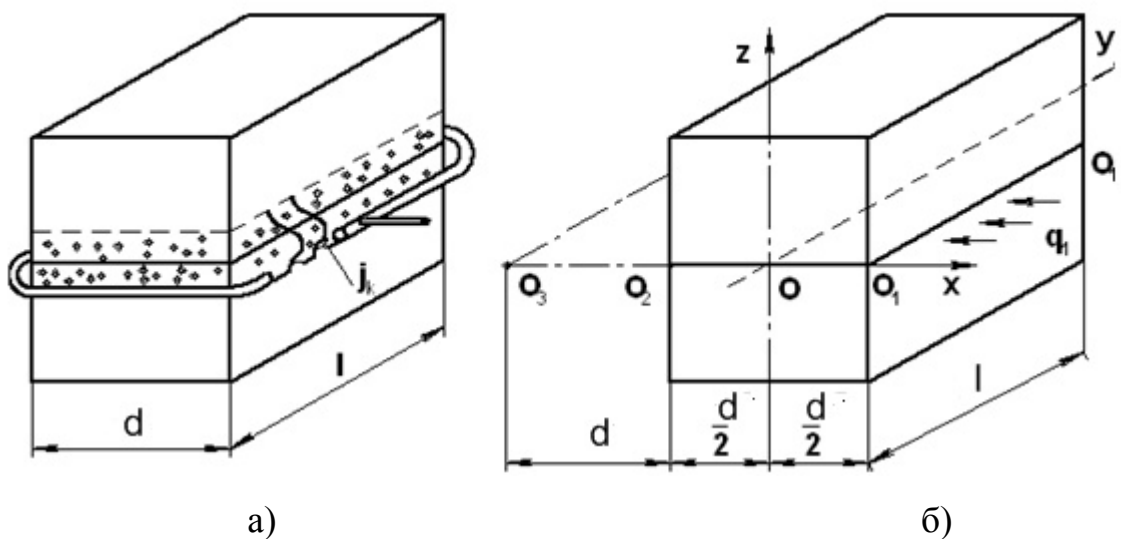


Рис. 3.6. Схема нагрівання (а) та розрахункова схема (б) при зварюванні масивних невісесиметричних заготівель (j – розподіл густини струму на поверхні катоду; q_1 – напрямок дії джерела нагрівання)

Оскільки розглядається нагрівання досить масивних заготівель із розвиненим поперечним перерізом, у якості розрахункової обрана схема нагрівання плоского шару точковим джерелом теплоти, що діє на його поверхні. Дійсне лінійне джерело теплоти приймають розташованим на поверхні напівнескінченного тіла [151]. Зміна температури від дії такого миттєвого джерела в довільній точці напівнескінченного тіла з адіабатичною границею описується виразом

$$dT(x, y, z, t) = \frac{2q \cdot dy}{c\rho \cdot l \cdot (4\pi \cdot a \cdot t)} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{4 \cdot a \cdot t}\right). \quad (3.14)$$

Температурне поле в напівнескінченному тілі від дії миттєвого лінійного джерела одержуємо шляхом підсумовування температурних полів від миттєвих точкових джерел за допомогою інтегрування виразу (3.14) уздовж вісі Y

$$T = 2 \int_0^{\infty} \frac{q \cdot dy}{c\rho \cdot l \cdot (4\pi \cdot at)} \exp\left(-\frac{r^2}{4at} - \frac{y^2}{4at}\right) = \frac{2q}{c\rho \cdot l \cdot (4\pi \cdot at)} e^{-\frac{r^2}{4at}} \quad (3.15)$$

Температурне поле, згідно (3.15), є плоскорадіальним та симетричним відносно вісі Y . Теплота поширюється відносно вісі Y рівномірно в площині XOZ .

Оскільки реальні заготовки, що з'єднують, не є у повній мірі напівнескінченими тілами необхідно враховувати можливість впливу на характер температурного поля в них теплового потоку, що відбивається від протилежних поверхонь. Таке відбиття може бути враховано, згідно [151], введенням фіктивного лінійного джерела теплоти $O_3 - O_3$ на відстані 2δ від зони дії реального джерела $O_1 - O_1$ (рис. 3.6, б). Оскільки температурне поле усередині заготівель є симетричним відносно площини ZOY , достатньо розглянути умови нагрівання однієї з половин вузла, що з'єднується, джерелом потужністю, $q_1 = q/2$, де q - потужність тліючого розряду. Оскільки габарити розглянутих заготівель значні, достатньо обмежитися врахуванням одноразового відбиття теплового потоку. При цих припущеннях характер зміни температур усередині заготівель в зоні їхнього контакту (при $Z=0$) від постійного-діючого лінійного джерела теплоти $O_1 - O_1$ з урахуванням тепловіддачі з бічної поверхні може бути описаний виразом

$$T(x, t) = \frac{q_1}{c\rho \cdot l \cdot (4\pi \cdot a)} \left[\int_0^{t_n} \exp\left(-\frac{x^2}{4at} - bt\right) \frac{dt}{t} + \int_0^{t_n} \exp\left(-\frac{(\frac{3}{2}\delta + x)^2}{4a(t-t_1)} - b(t-t_1)\right) \frac{dt}{t} \right], \quad (3.16)$$

де $0 \leq x \leq \delta/2$;

$$t_n = t_1 + t_0;$$

t_1 - тривалість поширення теплоти від лінії $O_1 - O_1$ до протилежної площини, що визначається згідно поняття товщини «термічного» (збудженого) шару $\delta^2 = 6at_1$. [18].

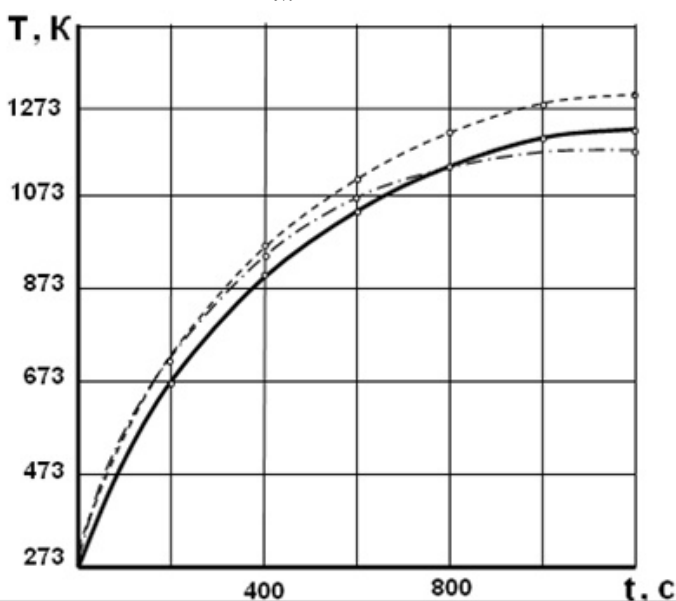
Перший доданок у дужках у виразі (3.16) являє собою результат дії реального джерела тепла, а другий - фіктивного. При з'єднанні різнорідних металів

значення теплофізичних властивостей $c\rho, a, b$, що входять у вираз (3.16), необхідно приймати середньоарифметичними у заданому діапазоні температур.

Перевірку адекватності запропонованого рішення здійснювали порівнянням результатів розрахунків за виразом (3.16) із результатами нагрівання натурних зразків у вигляді прямокутних паралелепіпедів розмірами $\delta \times l \times h = 48 \times 80 \times 60$ мм зі сталей Ст. 45 та 12X18H10T у однорідному й різнорідному сполученнях.

Вимірювання температур здійснювали термопарами, які вводилися вглиб заготівель у їхньому геометричному центрі й на відстані 0,003 м від поверхні, що нагрівається (рис. 3.7). Нагрівання здійснювали в середовищі азоту при струмі тліючого розряду 10 А, напрузі на міжелектродному проміжку 620 В. Ефективна потужність джерела становила $q = \eta_s I_p U_p \approx 5000$ Вт (при ефективному к. к. д. нагрівання $\eta_s = 0,8$).

Результати нагрівання заготівель і розрахунку температур поверхні згідно виразу (3.16) наведені на рис. 3.7, звідки видно, що запропонована модель має помітну похибку, що зростає із підвищенням температури нагрівання. Це може бути пов'язаним з тим, що при розрахунках теплофізичні характеристики металів приймалися незмінними і відповідними середній температурі $T = 873$ К [151]. Однак, процес іонного нагрівання масивних заготівель досить тривалий (звичайно десятки хвилин) і за цей час теплофізичні властивості матеріалів і коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням з їхньої бічної поверхні помітно змінюються. У зв'язку із цим доцільно температурний інтервал нагрівання заготівель поділити на декілька етапів, для кожного з яких встановити середні значення показників (таблиця 3.1) і вводити їх у розрахункову модель на відповідних етапах розрахунку. Середні значення коефіцієнтів променистого теплообміну для зазначених у таблиці температурних інтервалів приймали рівними, відповідно, 25, 60 і 100 $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ [166].



— — експеримент;
 --- — розрахунок згідно (5.19);
 - · - · — розрахунок згідно (5.19) із корегуванням теплофізичних характеристик металів

Рис. 3.7. Характер зміни середньої по перетину температури зони з'єднання зразків 12X18H10T – 12X18H10T ($Bi = 0,13$) при поверхневому нагріванні тліючим розрядом

Результати розрахункового визначення температур у приповерхневому шарі заготівель, що відповідає точці контролю T_l (рис. 3.7), з урахуванням коректування в процесі нагрівання теплофізичних характеристик згідно табл. 3.1, також наведені на рис. 3.7, показують, що в інтервалі температур 1073...1273 К, який відповідає дифузійному зварюванню сталей як безпосередньо, так і через проміжні прокладення з інших матеріалів (нікелю, міді й ін.), похибка моделі (3.16) не перевищує 6...10 %.

Характер розподілу температур по перетину з'єднуваних поверхонь заготівель, що нагрівають, визначається інтенсивністю нагрівання, яка у свою чергу характеризується густиною потоку енергії джерела в зоні його дії на поверхні виробу. При нагріванні тліючим розрядом густина енергії визначається величиною тиску газу в камері обробки й характеризується коефіцієнтом зосередженості розряду. Останній, у свою чергу, опосередковано враховується у виразі (3.16) через постійну часу t_0 , величина якої, як вже відзначалось, для діапазонів тиску газу в умовах зварювання 5,34... 13,3 кПа й відповідного йому коефіцієнта зосередженості розряду $k=0,1... 0,5\text{см}^{-2}$, становить $t_0=10... 50$ с.

Таблиця 3.1 – Теплофізичні характеристики деяких металів [115].

МЕТАЛ	ПАРАМЕТР	Інтервал температур, К		
		20.....300	300.....700	700.....1100
Ст. 45	$a, \text{м}^2/\text{с}$	$12 \cdot 10^{-6}$	$8.6 \cdot 10^{-6}$	$5.4 \cdot 10^{-6}$
	$\lambda, \text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$	49.1	38.5	26.9
	$c, \text{кДж}/\text{кг} \cdot \text{К}$	501	572	660
12X18H10T	$a, \text{м}^2/\text{с}$	$3.4 \cdot 10^{-6}$	$5.1 \cdot 10^{-6}$	$5.6 \cdot 10^{-6}$
	$\lambda, \text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$	8.3	15.4	18.2
	$c, \text{кДж}/\text{кг} \cdot \text{К}$	560	650	720
BT-5-1	$a, \text{м}^2/\text{с}$	$4.4 \cdot 10^{-6}$	$5.3 \cdot 10^{-6}$	$5.8 \cdot 10^{-6}$
	$\lambda, \text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$	18.2	24.2	27.8
	$c, \text{кДж}/\text{кг} \cdot \text{К}$	519	570	611

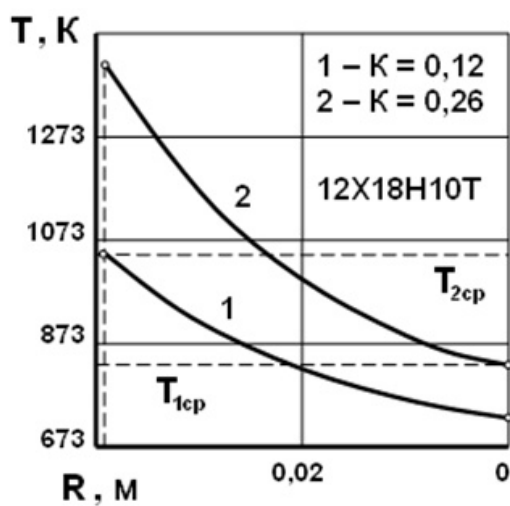


Рис. 3.8. Температурне поле в зоні з'єднання 12X18H10T – 12X18H10T ($\delta=0,048$ м) при поверхневому нагріванні тліючим розрядом різної зосередженості

Результати розрахункового визначення температур у площині контакту вузла $12X18H10T+12X18H10T$ для коефіцієнтів зосередженості розряду 0,12 та 0,26 см^{-2} (t_0 , відповідно, 37 і 17 с) задовільно узгоджуються з результатами вимірів (рис. 3.8), що дозволяє використовувати розроблені розрахункові залежності для попереднього визначення режимів нагрівання по заданому або припустимому градієнту температур у перетині зварюваних заготовок.

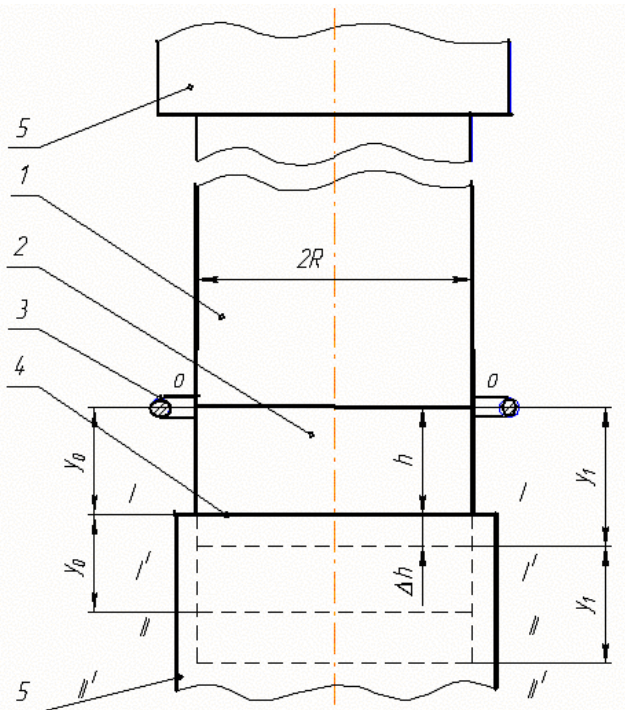
3.4. Особливості нагріву виробів обмежених розмірів при дифузійному зварюванні в тліючому розряді

Вище було показано, що у ряді випадків можливо і доцільно відмовитися від безпосереднього вимірювання температури в зоні зварювання, а контроль теплового стану цієї зони здійснювати на основі математичних моделей, що пов'язують контрольовані і регульовані параметри джерела нагріву з температурою деталей, що нагріваються. Проте, відомі моделі [55, 288], розроблені на основі схеми нагріву напівнескінчених тіл, що обмежує сферу їх застосування виробами відповідних габаритів і форми. В той же час, існує цілий ряд виробів, які в силу геометричних характеристик і, відповідно, характеру розповсюдження теплових потоків в них, не можуть бути віднесені до необмежених тіл. Такими виробами є, зокрема, біметалічні зварні твердосплавні штампи, склометалічні з'єднання у хвилеводах НВЧ-випромінювання [104] та ін. Особливістю цих виробів являється значна відмінність розмірів елементів, що сполучаються, в подовжньому (уздовж осі дії стискаючого навантаження) напрямку. Так, деталі біметалічних штампів, що сполучаються, знаходяться у співвідношенні 1: 3...1: 4, і якщо сталевий утримувач можна вважати напівнескінченим тілом, то різальна твердосплавна частина має протяжність всього 0,015...0,03 м (рис. 3.9). В цьому випадку зона зварювання (зона дії джерела теплоти) 0-0 виявляється розташованою у безпосередній близькості від межі 0_1-0_1 контакту заготівлі з досить масивним пуансоном притискного пристрою, що контактує з водоохолоджуванним корпусом камери. За наявності щільного контакту між ними (тепловий опір на межі 0_1-0_1 відсутній) підвищений відтік теплоти із заготівлі 2 (рис. 3.9) в притискний пристрій призводитиме до необхідності введення в зону

зварювання надлишкової кількості енергії, а також, до значних температурних градієнтів в цій заготовці, що неприпустимо як для твердих сплавів, так і для неметалічних матеріалів.

Для відвертання втрат енергії на притискному пристрої і для вирівнювання температур по довжині заготовки 2 між ними розміщують теплоізолюючі прокладення з матеріалу, що має низьку теплопровідність. У першому наближенні таке прокладення можна вважати адіабатичною межею, тобто такою, що не пропускає теплоту. В цьому випадку, тепловий потік, що поширюється від зони максимальних температур 0-0, досягаючи межі 0₁- 0₁, відбиватиметься від неї, сприяючи підвищенню температури в зоні зварювання 0-0. Змоделювати таке відображення можна, згідно рекомендацій, приведених в [245], введенням фіктивного джерела теплоти тієї ж потужності, що і основний, що діє по іншу сторону межі 0₁- 0₁ на відстані від неї (межа 0₂- 0₂ на рис. 3.9). Відстань між зоною зварювання і фіктивним джерелом буде складати $2y_0 = 2h$. Товщину теплоізолюючого прокладення, зважаючи на його незначну товщину, можливо не враховувати.

Приводячи, згідно [56], нагрів тліючим розрядом до схеми нагріву плоским джерелом, що діє в зоні з'єднання деталей 0-0, вираз для визначення температур в цій зоні можна представити таким чином



$$T(t) = \frac{q}{2F\sqrt{\pi\lambda c\rho}} \left[\int_0^t \frac{dt}{\sqrt{t}} e^{-bt} + \int_0^t \frac{dt}{\sqrt{t}} e^{-\frac{(2y_0)^2}{4at} - bt} \right] \quad (3.17)$$

- 1,2 - деталі, що сполучаються;
- 3 - анод;
- 4 - теплоізолююче прокладення;
- 5 - пуансони притискного пристрою.

(Інші позначення приведені в тексті).

Рис. 3.9. Схема нагріву тліючим розрядом заготовівель, що суттєво розрізняються габаритами

де перший доданок в дужках є підвищенням температури в зоні зварювання від дії в цій же зоні дійсного джерела теплоти, друге - підвищення температури від дії фіктивного джерела.

Умовні позначення у виразі (3.17) :

q - потужність джерела теплоти;

F - площа поперечного перерізу деталей, що сполучаються;

λ - теплопровідність матеріалу деталей;

$c\rho$ - об'ємна теплоємність матеріалу;

b - коефіцієнт температуровіддачі;

t - час нагріву.

Вираз (3.17) відповідає ідеальному випадку, при якому межа 0_1-0_1 повністю затримує тепловий потік, що йде із зони зварювання. У реальних умовах для теплоізолюючих прокладень застосовують зневоднену слюду або кераміку, що мають порівняно низький коефіцієнт теплопровідності (у слюди $\lambda_1 = 0,4 \dots 0,58$, кераміки $3 \dots 5$ при 1273 K [128]), проте, внаслідок малої товщини цих прокладень, що становить $\delta = 0,0003 \dots 0,001$ м для слюди і $0,003 \dots 0,005$ м для кераміки, їх теплові опори $R_1 = \delta/\lambda_1$ мають кінцеві значення. З цієї причини частина теплового потоку, що приходить до межі 0_1-0_1 , проникатиме через неї, витрачаючись на елементах притискного пристрою. У цих умовах, відбитий від межі 0_1-0_1 тепловий потік виявиться меншим, ніж в розглянутому раніше випадку і, відповідно, температура в зоні зварювання $0-0$ буде нижчою за розраховану згідно виразу (3.17). Зниження відбитого теплового потоку рівноцінне тому, що адіабатична межа віддаляється від зони з'єднання деталей на деяку відстань в положення $0_1'-0_1'$ (рис. 3.9). Величина умовного зміщення межі визначатиметься здатністю теплоізолюючого прокладення затримувати тепловий потік, що досягає межі 0_1-0_1 , заздалегідь пройшовши через матеріал заготовівлі протяжністю h , що також має певний тепловий опір $R_2 = h/\lambda$, тобто

$$\Delta h = \frac{R_2}{R_1} h . \quad (3.18)$$

Умовна адіабатична межа $0_1'-0_1'$ знаходитиметься від зони з'єднання на відстані

$$y_1 = h + \Delta h \quad (3.19)$$

В цьому випадку фіктивне джерело розташовуватиметься в положенні $0_2' - 0_2'$ на відстані

$$2y_1 = 2(h + \Delta h) \quad (3.20)$$

від зони зварювання $0-0$ і вираз (3.17), що описує зміну температури в цій зоні (при $y = 0$) і, в цілому, по довжині заготівлі 2 набере вигляду

$$T(t) = \frac{q}{2F\sqrt{\pi\lambda c\rho}} \left[\int_0^t \frac{dt}{\sqrt{t}} e^{-\frac{y^2}{4at} - bt} + \int_0^t \frac{dt}{\sqrt{t}} e^{-\frac{(2y_1)^2}{4at} - bt} \right] \quad (3.21)$$

У представленому вигляді вираз (3.21) з урахуванням теплофізичних властивостей прокладення, що характеризуються співвідношенням (3.18), може бути використаний для опису зміни температур в зоні зварювання в наступних випадках:

1. Тепловий опір прокладення $R_1 = 0$ (прокладення відсутнє), $\Delta h \rightarrow \infty$, підінтегральна функція в другому доданку наближається до нуля, що відповідає випадку зварювання двох напівнескінчених тіл. Підвищений тепловідвід в пуансоні притискного пристрою призводить до зниження температури в зоні зварювання.

2. $0 < R_1 < \infty$, тепловідвід в притискний пристрій знижується, Δh має кінцеве значення. Температура зони з'єднання залежить від теплофізичних властивостей прокладення.

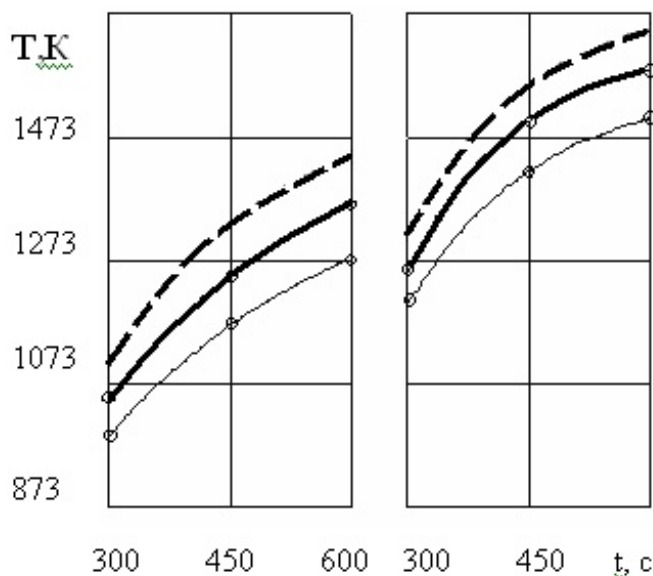
3. $R_1 \rightarrow \infty$, $\Delta = 0$ – випадок адіабатичної межі $0_1 - 0_1$, практично не досяжний в реальних умовах. Розрахункові значення температур помітно перевищуватимуть фактичні.

Верхню межу інтегрування виразу (3.21), що відповідає тривалості нагріву заготівель до заданої температури приймаємо рівною $t_n = t - t_1$, де t – поточний час, t_1 – тривалість наскрізного прогрівання перерізу деталей в зоні їх контакту від моменту запалення тліючого розряду, після чого можна вважати, що сформувалося плоске джерело теплоти в цій зоні. Тривалість t_1 визначається, виходячи з поняття товщини термічного шару (радіусу заготівель R або їх напівтовщини $S/2$), з виразу $R = \sqrt{6at_1}$, [28].

Адекватність отриманої розрахункової моделі, представленої виразами (3.18), (3.20) та (3.21) оцінювали порівнянням з результатами нагріву складених циліндричних зразків діаметром 0,028 м із сталей Ст.3-Ст.3 і 12Х18Н10Т-12Х18Н10Т, елементи яких знаходилися в співвідношенні 1: 4, при цьому про-

тяжність меншої деталі складала $h=0,02$ м. В якості теплоізолюючого прокладення використали кварцове скло завтовшки $h = 0,003$ м. Коефіцієнт теплопровідності кварцового скла слабо залежить від температури і складає $2...2,5$ для інтервалу температур $373...1273$ К [205].

Деталі, що нагріваються, були катодом, дротяний кільцевий анод розташовувався еквідистантно периметру зони їх контакту на відстані $0,006$ м від поверхні деталей. Температуру контролювали ХА-термопарами в двох точках на протилежних торцях меншої деталі (рис. 3.9), що дозволяє оцінити градієнт температур в ній. Нагрів здійснювали в середовищі азоту при струмі розряду 4 А і тиску газу $5,32$ кПа. Зусилля стискання деталей 2 МПа. Виміри здійснені у присутності теплоізолюючого прокладення і без нього. Експериментальні значення поточних температур зони з'єднання деталей (при $y=0$) приведені на рис. 4.11. Там же наведені значення температур, отримані чисельним інтегруванням виразу (3.21) методом Симпсона



для часових інтервалів $t = 300; 450; 600$ с. Величина умовного зміщення адиабатичної межі для вказаних умов складає: для зразків зі Ст.3 - $\Delta h = 0,0087$ м, зі сталі 12X18H10T - $0,013$ м.

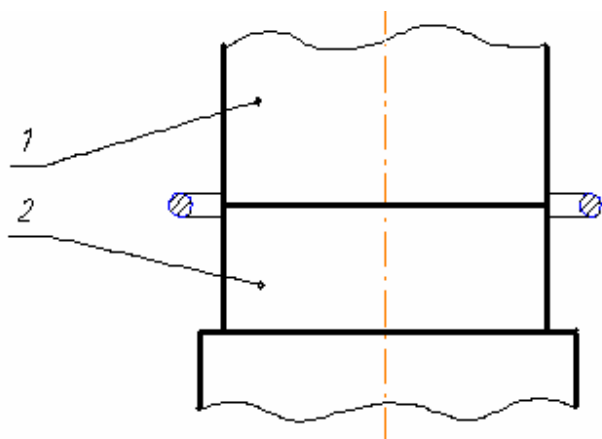
а) матеріал заготовель - сталь Ст.3;
б) сталь 12X18H10T;
— - експеримент;

- - - - чисельне інтегрування виразу (4.26);
— - результати вимірів за відсутності прокладень.

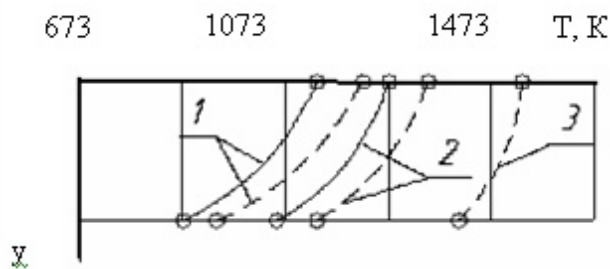
Рис. 3.10. Значення поточних температур зони з'єднання заготовель різних габаритів при нагріві тліючим розрядом (режими нагріву приведені в тексті).

На рис. 3.11 приведені фрагмент вузла, що сполучається, і результати виміру температур на протилежних кромках деталі 2, що відповідають моменту часу $t = 300$ с. Виміри також робили як у присутності прокладення, так і без нього.

го. Результати показують, що в даних умовах, зокрема, при нагріві заготовівель із сталі 12X18H10T градієнт температур по довжині деталі 2 змінюється від $\partial T/\partial y = 1,29...1,34$ при безпосередньому контакті її з пуансоном стискаючого пристрою до 1,16...1,18 за наявності між ними прокладення, що має вказані вище теплофізичні та геометричні характеристики. Збільшення теплового опору прокладення призводить до подальшого вирівнювання температур в заготівлі,



про що свідчать результати чисельного рішення виразу (3.21) для R_1



$\rightarrow \infty$ (рис. 3.10, крива 3). Дещо більш високі, у порівнянні з фактичними, градієнти температур, отримані розрахунковими методами (рис. 3.10, криві 1 і 2) пояснюються модельним представленням тліючого розряду, що є поверхневим розподіленням джерелом теплоти, плоским, зосередженим в зоні контакту деталей.

Матеріал заготовок – сталь 12X18H10T
Криві відповідають:
— - експеримент
- - - розрахунок
1 – прокладення відсутнє;
2 – при наявності прокладення;
3 – випадок ідеального тепло ізолюючого прокладення

Матеріал заготовок – сталь 12X18H10T

Криві відповідають:

— - експеримент

- - - розрахунок

1 – прокладення відсутнє;

2 – при наявності прокладення;

3 – випадок ідеального тепло ізолюючого прокладення

Рис. 3.11. Залежність градієнта температур по довжині заготовки 2 від характеристик теплоізолюючого прокладення

Отримані результати свідчать, що при зварюванні в тліючому розряді виробів обмежених розмірів, чутливих до нерівномірного розподілу температури у об'ємі, необхідні температурні градієнти можуть бути забезпечені відповідною теплоізоляцією заготовівель від елементів притискних пристроїв, для чого слід

брати до уваги теплофізичні і геометричні характеристики проміжних прокладень, що визначають їх тепловий опір.

Розрахунки за виразом (3.21) показують, що при з'єднанні сталевих заготовків, для яких можна вважати поширення теплоти одновимірним уздовж поздовжньої осі (циліндр, паралелепіпед та ін., які можуть бути до них зведені), при їх протяжності в цьому напрямі $h \geq 0,04 \dots 0,05$ м відбитий від протилежної зони їх контакту межі тепловий потік робить дуже незначний вплив на температуру в зоні зварювання, що дозволяє вважати ці заготовки напівнескінченими тілами і застосовувати для оцінки температурного поля в них відповідні спрощені розрахункові залежності.

Запропонована методика визначення температурних полів у виробках обмежених розмірів може знайти застосування і для інших джерел, нагрів якими може бути зведений до схеми нагріву плоским джерелом теплоти, зокрема, індукційного нагріву одновитковим індуктором.

4. ТЕХНОЛОГІЯ ЗВАРЮВАННЯ ТА ПАЯННЯ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ

4.1. Особливості формування з'єднань при зварюванні тиском у тліючому розряді

Плазму тліючого розряду використовують для з'єднання однорідних і різно-рідних матеріалів в різних поєднаннях, в різних газах і газових сумішах: азоті, аргоні, водні, гелії, вуглеводнях та ін. Це визначає перспективність його застосування як зварювального джерела нагріву у виробництві виробів широкої номенклатури. У табл. 4.1 наведені матеріали виробів та їх сполучення, що з'єднуються дифузійним зварюванням та паянням в тліючому розряді.

Основні режими дифузійного зварювання в тліючому розряді – температура нагріву і зусилля стиснення деталей, що з'єднуються, тривалість ізотермічної витримки - загалом, аналогічні режимам, застосовуваним при дифузійному зварюванні у вакуумі з радіаційним та індукційним нагріванням [87]. Однак, інше джерело нагріву, наявність розрідженого газового середовища вносять свої особливості в технологію процесу зварювання.

Таблиця 4.1

Матеріали, що з'єднуються при нагріванні тліючим розрядом

Матеріали, що з'єднуються	Галузі застосування	Літературне джерело
Вуглецеві та інструментальні сталі із твердими сплавами на основі карбидів вольфраму та титану	Штампова оснастка та інструмент, що працюють при інтенсивному абразивному впливі	[75, 76, 79]
Вуглецеві, інструментальні та леговані сталі в різноманітних сполученнях	Деталі машин, приладів, пристроїв різного призначення, інструмент	[24, 75]
Кольорові метали та сплави між собою та зі сталями	Елементи приладів, радіотехнічних пристроїв, вузли машин	[99]
Тугоплавкі та хімічно активні метали між собою та зі сталями	Зразки, вузли хімічного та енергетичного устаткування	[100, 116]
Армко-залізо, електротехнічні та магнітом'які сплави	Електротехнічні пристрої, магнітострикційні перетворювачі ультразвукової техніки	[25, 39]

Активує роль вакууму, в поєднанні з термомеханічної активацією, розглядалася різними дослідниками стосовно до зварювання активних і жароміцних металів і сплавів. Природно, що всі згадані види активаційного впливу не завжди необхідні і роль кожного з них залежить, в першу чергу, від характеристик матеріалів, що з'єднуються. Застосування вакууму як захисного середовища сприяє, як вважають, дисоціації оксидів в зоні з'єднання, однак, призводить до істотного ускладнення і подорожчання устаткування та до зниження продуктивності.

Наявність слідів кисню в розрідженому захисному газовому середовищі може сприяти окисленню поверхонь, що з'єднуються, в умовах підвищених температур при зварюванні в тліючому розряді. Оскільки перед зварюванням тиском з'єднувані поверхні обов'язково піддаються попередньому очищенню, то в зоні контакту завжди будуть присутні тонкий шар природного оксиду і шар адсорбованого кисню товщиною в декілька атомних шарів (одиниці нанометрів), що утворюються на поверхні за проміжок часу між процесом очищення і зварювання.

У процесі формування фізичного контакту, що протікає одночасно з нагрівом, взаємодія металу в зоні зварного з'єднання з киснем навколишнього середовища протікає в двох напрямках: 1) у зоні фізичного контакту, що утворився, йде дифузійне розсмоктування кисню по границях та об'єму зерен, яке інтенсифікується з підвищенням температури і розвитком площі контакту. Наприклад, тривалість розсмоктування оксидної плівки товщиною 5 нм для міді та нікелю становить 1 ... 10 с [89]; 2) з об'єму пір і каналів між пластично деформованими виступами кисень, який залишився, витрачається на доокислення цих пір. В результаті, по первісній границі контакту деталей може спостерігатися ланцюжок мікрівключень оксидів навіть після повної рекристалізації зони зварювання. Величина і кількість цих включень залежать від швидкості та повноти деформування мікрорельєфу.

У зв'язку з цим, при зварюванні тиском у тліючому розряді після підготовки деталей, встановлення їх у зварювальному пристосуванні і створення в камері максимального розрідження, забезпечуваного форвакуумними насосами (орієнтовно 1 ... 5 Па), до деталей прикладається необхідне зусилля стиснення і здійснюється нагрівання з максимально можливими або припустимими швидкостями з метою обмеження доступу кисню з навколишнього середовища вглиб контактної зони. Оскільки зварювання здійснюється зазвичай в очищених газах при тисках 5 ... 10 кПа, то парціальний тиск кисню не перевищує 0,133 Па, що дозволяє навіть на відкритих поверхнях, які не зварюються, отримати лише найтонші плівки оксидів [100]. Однак, це не виключає можливості появи оксидів у вузькій зоні на зовнішньому контурі контакту.

Процеси об'ємної взаємодії (третя стадія) при зварюванні тиском різнорідних металів визначаються як станом контактуючих поверхонь, так і наявністю градієнта концентрацій елементів на їх кордоні в початковий момент зварювання. Процеси дифузійного масообміну при зварюванні у тліючому розряді вивчалися у роботі [100]. Матеріалами для досліджень служили армкозалізо, сталь 12X18H9T і сталь 45. Зварювання цих матеріалів в різних поєдна-

ннях дозволило досліджувати взаємний вплив елементів при дифузії, оцінити роль окисних плівок типу Me_2O_3 в умовах іонного нагріву, а також, роль вуглецю як ефективного відновника.

Методика підготовки зразків відповідала промисловим умовам: токарна обробка за 6-м класом чистоти за 1...2 доби до зварювання і промивання зварюваних поверхонь ацетоном або спиртом безпосередньо перед встановленням у камеру.

Для з'ясування залежності міцності з'єднання від ширини дифузійного перехідного шару були використані з'єднання армко-залізо – сталь 12X18H9T. Вибране поєднання матеріалів дозволило отримати перехідний шар змінного складу від чистого заліза до легованої сталі без утворення крихких інтерметалідів. Показано (рис. 4.1), що при товщині перехідного шару 3 ... 5 мкм вже забезпечується міцність з'єднання, що дорівнює міцності слабшого матеріалу (руйнування відбувалося по армко-залізу поза зоною з'єднання). Найбільш високі властивості з'єднання ($\sigma = 360...380$ МПа) відповідають режимам зварювання: температура 1423...1473 К, зусилля стискання 5...8 МПа, час ізотермічної витримки 7...9 хвилин. Подальше збільшення товщини перехідного шару практично не підвищує міцність. При цьому є несуттєвим, яким чином досягається оптимальна товщина перехідної зони – підвищенням температури або збільшенням часу зварювання.

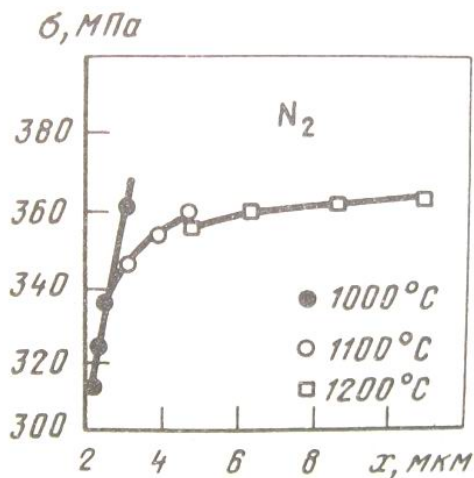


Рис. 4.1. Залежність міцності зварного з'єднання від товщини перехідного шару при стискаючих зусиллях 10 МПа

Роль вуглецю в процесі утворення дифузійного з'єднання достатньо складна. З одного боку, він відновлює оксиди на кордоні дифузії, а з іншого - наявність сильних карбідоутворювачів, таких як титан і хром, гальмує дифузійний масообмін.

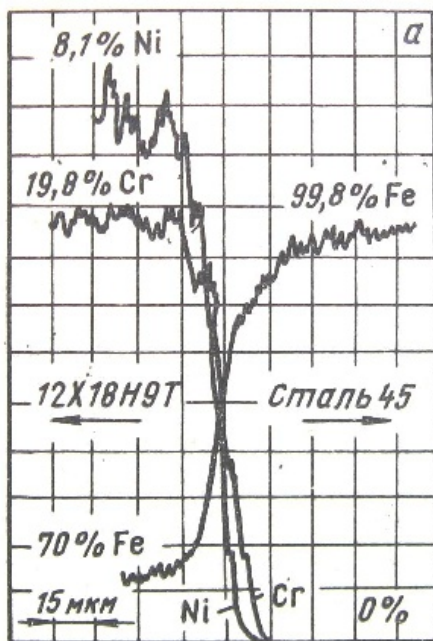
Для вивчення цього явища були проведені металографічні та мікрорентгено-спектральні дослідження дифузійної зони з'єднань сталей різного класу. В з'єднанні сталь 45 – сталь 12X18H9T (рис. 4.2) ширина дифузійної зони досягає 0,2 мм і складається з тонкого перехідного шару підвищеної твердості та зневугльцевої зони, що прилягає до неї зі сторони сталі 45 та зони укрупненої структури зі сторони сталі 12X18H9T. Укрупнення зерен сталі 12X18H9T у зоні шириною менш ніж 0,2 мм неможливо пояснити підвищеною температурою нагріву, оскільки до температури зварювання нагрівається зона шириною

10...20 мм, що на два порядки перевищує зону укрупнених зерен. В зоні, де дифузійний масообмін не спостерігається, структура сталі залишається незмінною.

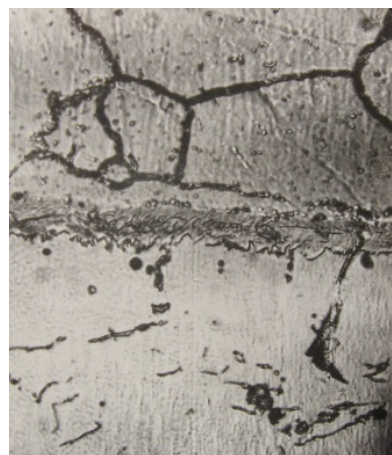
Поблизу перехідного шару структура сталі 12Х18Н9Т збагачена карбідами, особливо багато їх на границі між шаром та сталлю 12Х18Н9Т та по границях зерен сталі 12Х18Н9Т, де повинні бути найбільші концентрації вуглецю, хрому та титану. Твердість перехідного шару помітно перевищує твердість сталі 45 та сталі 12Х18Н9Т, що призводить до зниження в'язкості зони з'єднання при високих значеннях σ_b . Із віддаленням від перехідного шару кількість карбідів у зернах сталі 12Х18Н9Т різко знижується.

Відновлювальний характер взаємодії вуглецю з окислами в зоні зварювання підтверджується тим, що задовільні результати у зварному з'єднанні 12Х18Н9Т – 12Х18Н9Т були отримані лише із застосуванням парафіну в якості відновника, розміщеного в стику перед зварюванням. Дифузійна зона в цьому випадку відрізняється сильною подрібненістю зерна (рис. 4.3).

Як досить хімічно активний і дифузійно рухливий елемент вуглець відновлює окисні плівки в зоні контакту і забезпечує дифузійний масообмін між сплавами, що сполучаються. Однак, при наявності активних карбідоутворювачів (хром, титан та ін) хімічна взаємодія їх з вуглецем викликає зменшення зони взаємного дифузійного масообміну, що впливає на якість зварного з'єднання. Зварне з'єднання 12Х18Н9Т - 12Х18Н9Т, виконане в азоті або гелії за типовою технологією, завжди руйнувалося по стику без виривів і мало міцність близько 250 МПа, хоча вихідна міцність зварюваного матеріалу становить 644 МПа. При додаванні в стик між зварюваними поверхнями парафіну міцність зварного з'єднання зростала до 638 ... 650 МПа.



12Х18Н9Т



Сталь 45

Рис. 4.2. Розподіл елементів та мікроструктура зони з'єднання сталі 12Х18Н9Т та сталі 45

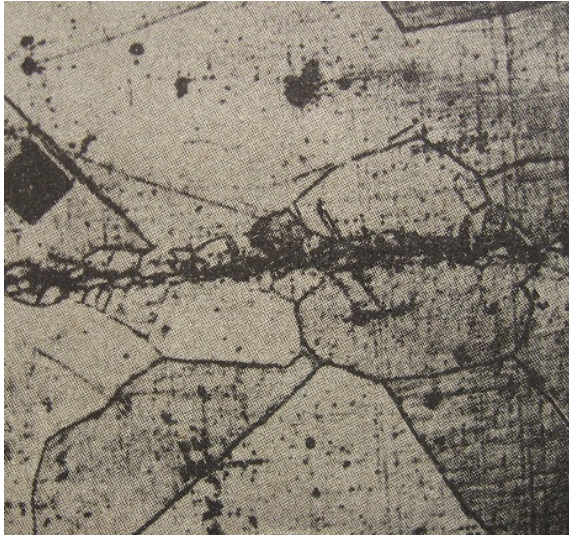


Рис. 4.3. Мікроструктура зони дифузійного з'єднання 12Х18Н9Т–12Х18Н9Т із проміжним відновлювальним шаром

З'єднання руйнувалося з виривами по всій площині стику і витримувало загин до 120° . Особливо істотним є вплив вуглецю на міцність зварних з'єднань із різнорідних сталей. Наприклад, сталь 12Х18Н9Т і сталь 45 з вихідною міцністю, відповідно, 644 і 494 МПа утворюють зварне з'єднання з міцністю на розрив 534 ... 540 МПа. При цьому руйнування відбувається по менш міцному матеріалу. Аналогічні результати спостерігаються при зварюванні 12Х18Н9Т з армко-залізом, яке має вихідну міцність 392 МПа, де міцність з'єднання досягала 402 ... 416 МПа. Отримані результати оцінки дифузійного масообміну при зварюванні сталей знаходяться у відповідності з висновками, отриманими при дослідженні термодинамічної активності вуглецю в залізних сплавах з різним вмістом хрому [5].

При з'єднанні маловуглецевих сталей, кольорових металів і однорідних матеріалів, коли в зоні з'єднання відсутні такі потужні активатори процесу дифузії, як вуглець або інші відновники, а також, градієнт концентрації дифундуючих елементів, процеси в зоні формування зварного з'єднання можуть протікати дуже повільно через низьку дифузійну рухливість елементів. У цьому випадку в зоні контакту необхідно розміщувати додаткові елементи, що забезпечують виконання зазначених функцій. Такі елементи вводяться у вигляді тонких проміжних шарів, розсмоктуються в процесі зварювання в матеріалах, що з'єднуються або розкладаються без залишку при нагріванні.

В якості елементів-активаторів, що видаляють окисли із зони контакту зварюваних деталей, використовують парафін, фтористий та хлористий амоній та інші флюсуючі матеріали. Застосування активаторів зачасти є більш ефективним, ніж відновлення окислів у високому вакуумі. До активаторів слід віднести також металеві прошарки, що утворюють тверді розчини з обома матеріалами, що сполучаються, які широко застосовуються для прискорення дифузійних процесів при зварюванні однорідних металів. Такі ж проміжні прошарки застосовуються і при зварюванні тиском різнорідних металів, здатних утворювати в зоні з'єднання при нагріванні крихкі евтектики або інтерметаліди.

При зварюванні тиском матеріалів з різними коефіцієнтами теплового лінійного розширення в зоні з'єднання можуть виникати значні термічні напруги. Для зниження таких напруг застосовують демпфіруючі проміжні металеві прошарки. У якості таких демпферів зазвичай використовують високопластичні метали - алюміній, мідь, нікель.

У процесі зварювання один і той же проміжний матеріал може виконувати декілька функцій. Проміжні матеріали можуть застосовуватися у вигляді фольги, пасти, порошку або напиленого шару. Широкі дослідження щодо використання проміжних матеріалів при зварюванні твердих сплавів і твердих сплавів зі сталями в тліючому розряді виконані І.М. Мухою та М.Н. Довбіщуком [75, 130]. Д.І. Котельниковим встановлені оптимальний склад і технологія отримання проміжних матеріалів при зварюванні в тліючому розряді скла з металами [100]. Роль і характеристики проміжних шарів при зварюванні з іонним нагріванням жароміцних матеріалів вивчені в роботах В.Ф. Квасницького [92, 127].

4.2. Зварювання сталей

Основна відмінність процесу зварювання в тліючому розряді від дифузійного зварювання в вакуумі – наявність контрольованого газового середовища, в якому горить тліючий розряд при тисках нижче атмосферного. Послідовність виходу на режим зварювання у тліючому розряді наступна. Після створення в робочій камері необхідної атмосфери при тисках $10^2 \dots 10^3$ Па між анодом і виробом-катодом збуджується тліючий розряд при напрузі на електродах 400 ... 800 В. Після запалювання розряду тиск газу в камері підвищується до 5 ... 15 кПа з одночасним збільшенням струму розряду і здійснюється нагрівання виробу до температури зварювання.

Процеси нагрівання і з'єднання сталей методами дифузійного зварювання у вакуумі широко вивчені [15, 72]. Вплив складу атмосфери при зварюванні в тліючому розряді досліджувався в [28] на прикладі з'єднання сталі 45. Зварювання здійснювали в окислювальному, нейтральному та відновлювальному газовому середовищі. Окислювальна атмосфера створювалася введенням в камеру вуглекислого газу, відновлювальна - упорскуванням ацетону (атмосфера вуглеводнів, утворена парами ацетону), нейтральна атмосфера створювалася тиском аргону. Кращі механічні властивості мають з'єднання, отримані при зварюванні в нейтральному або відновлювальному середовищі. Мікроструктура такого з'єднання наведена на рис. 4.4а). При зварюванні в нейтральній атмосфері руйнування з'єднання зазвичай відбувається по основному металу. Відносне подовження зразків складає 6 ... 10%. При зварюванні в окислювальній атмосфері міцність з'єднань дещо нижче, проте при механічних випробуваннях руйнування зварних з'єднань відбувається у зоні стику з виривами з ос-

новного металу. На мікроструктурі (рис. 4.4б) у стику спостерігається феритна смужка. В окремих місцях стику спостерігаються окисні плівки, але вони зустрічаються досить рідко.

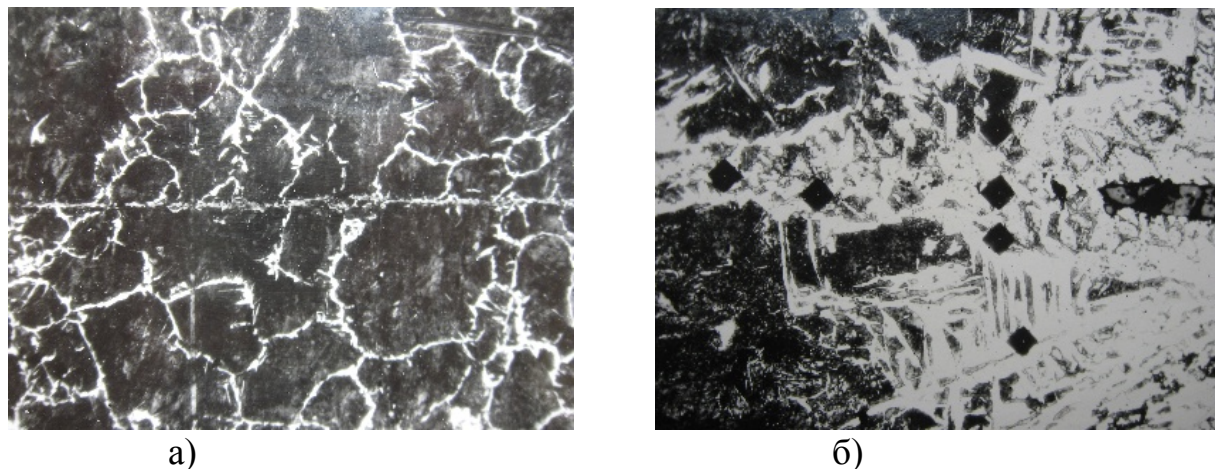


Рис. 4.4. Мікроструктура зони дифузійного зварювання сталі 45 у нейтральному (а) та окислювальному (б) середовищі

Якщо вуглецеві сталі можливо якісно зварювати в тліючому розряді, що горить в середовищі нейтральних або інертних газів (аргон, азот, гелій тощо), то для отримання рівномірних з'єднань виробів з високолегованих, жароміцних і тугоплавких сплавів необхідна відновлювальна атмосфера, що перешкоджає утворенню окисних плівок.

Зварювання жароміцних сплавів ЕП-99 та ЕИ-602 здійснювалося [127] в атмосфері, створеною за допомогою фтористого амонію, що вводиться в стик у вигляді шару порошку. Перед створенням контрольованої атмосфери камера продувалася аргоном. Дослідження показали, що при підвищенні тиску аргону до 3 ... 5 кПа в процесі нагрівання не вдається запобігти окислення сплавів. Кращі результати дає зварювання жароміцних сплавів з проміжним металевим прошарком, що розплавляється, і прошарком з фтористого амонію. У цьому випадку вдається отримати монолітне з'єднання.

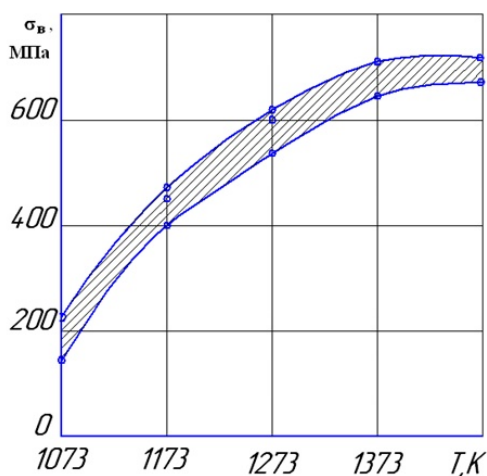
Дослідження режимів зварювання в тліючому розряді також здійснювалось в роботі [28] стосовно сталі 45. Зміна міцності зварних з'єднань в залежності від тиску стиснення показана на рис. 4.5, а). При тисках до 5 МПа деформація зразків не перевищує 1%, але руйнування відбувається по стику. Зразки, зварені при тисках 12...15 МПа, мали після зварювання деформацію до 4% і при випробуваннях руйнувалися по основному металу поблизу зони стику або на деякій відстані від неї. При подальшому збільшенні тиску стиснення деформація зразків зростає, однак міцність з'єднань практично не змінюється.

Вплив температури нагрівання на міцність зварних з'єднань, виконаних зі сталі 45 у нейтральній газовій атмосфері, показаний на рис. 4.5, б).

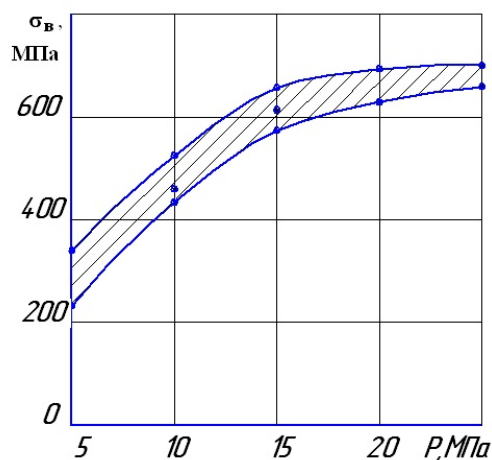
При наявності щільного контакту між чистими поверхнями міцність зварного з'єднання залежить від фізико-хімічних процесів, що протікають в стику, зокрема, від процесів дифузії. Ступінь повноти протікання цих процесів залежить від їх інтенсивності та тривалості. Вплив часу зварювання на міцність з'єднань

відображено на рис. 4.5, в). Зі збільшенням часу зварювання до 6 хв. міцність з'єднань помітно зростає, подальше збільшення тривалості зварювання супроводжується незначним зростанням міцності. Це свідчить про те, що дифузійні процеси, що протікають протягом 6 ... 10 хв., забезпечують отримання монолітного зварного з'єднання, рівномічного основному металу.

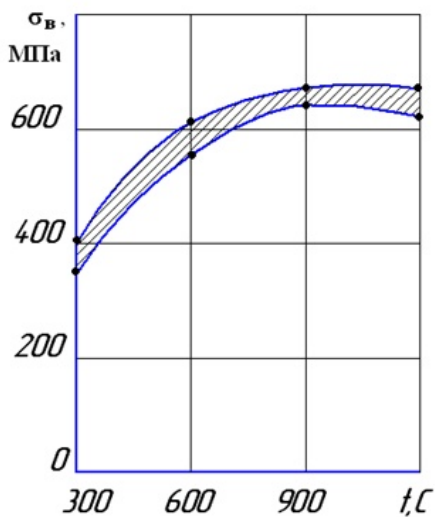
Порівняння отриманих результатів зварювання сталі 45 в тліючому розряді з результатами дифузійного зварювання у вакуумі, описаними в роботах [72, 87], показує, що характер впливу режимів зварювання на міцність з'єднань в обох випадках аналогічний, а зварні з'єднання, отримані зварюванням у тліючому розряді володіють всіма перевагами сполук, отриманих дифузійним зварюванням у вакуумі.



а)



б)



в)

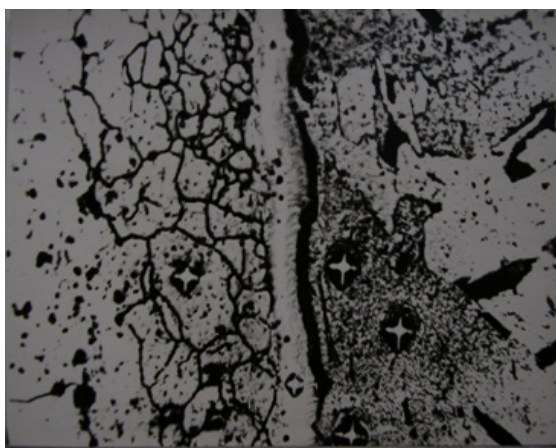
в)

Рис. 4.5. Залежність міцності дифузійно-зварного з'єднання сталь 45–сталь 45 від зусилля стискування (а), температури (б) та часу (в) зварювання

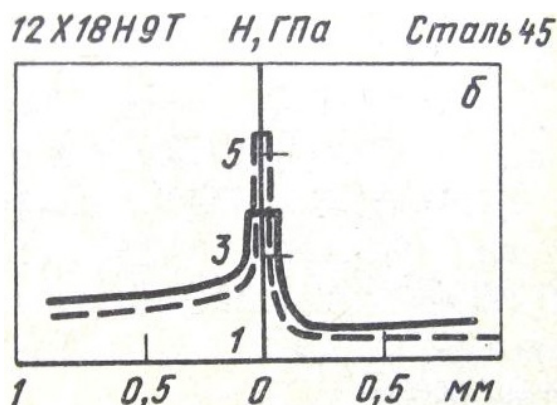
У зварних з'єднаннях вуглецевих сталей з легованими при температурі зварювання вуглець активно дифундує в леговану сталь, відновлюючи окисли, утворюючи карбіди титану і хрому, сприяючи процесам рекристалізації в зоні зварювання. Проте, утворення карбідів призводить до підвищення твердості і крихкості зварного з'єднання, що погіршує експлуатаційні характеристики виробу. На рис. 4.6,а представлена мікроструктура зварного з'єднання сталі 45 зі сталлю 12Х18Н9Т [99], де розрізняються знеуглецьована зона в сталі 45 і зона, насичена карбідною фазою, в сталі 12Х18Н9Т. Їх розділяє прошарок з перехідною структурою високої твердості 4 ... 5 ГПа (рис. 4.6 б). Застосування нагріву в тліючому розряді дозволяє знизити крихкість такого з'єднання, якщо виконувати зварювання у водні з попереднім прогріванням зварюваних поверхонь з метою створення знеуглецьованого шару на сталі 45 за рахунок утворення вуглеводнів і відновлення оксидів титану і хрому на сталі 12Х18Н9Т.

12Х18Н9Т

Сталь 45



а)



б)

Рис. 4.6. Мікроструктура (а) та мікротвердість (б) зони дифузійного зварювання в тліючому розряді сталі 45 та 12Х18Н9Т

Результати зварювання різних сталей в тліючому розряді в атмосфері вуглеводнів приведені в роботах [51, 52], де активне відновлювальне середовище створювалося парами ацетону в широкому діапазоні тисків, аж до утворення на поверхні рідкого евтектичного прошарку, який полегшує утворення з'єднання.

Результати зварювання сталей з іонним нагріванням у вуглеводнях та інших газових середовищах (азоті, аргоні, гелії) показують (таблиця 4.2), що властивості зварних з'єднань аналогічні отриманим при зварюванні у високому вакуумі з індукційним і радіаційним нагрівом. Оптимальні режими (температура, зусилля стиснення, тривалість) при зварюванні в тліючому розряді знаходяться в тих же межах, що і для зазначених способів.

Таблиця 4.2

Результати зварювання сталей в гілочному розряді

Матеріали, що зварюються	Робочий газ	Режими зварювання			σ _з , МПа	Характер руйнування
		Вакуум, кПа	Температура зварювання, К	Зусилля стискання, МПа		
Сталь 20+12Х18Н9Т	N ₂ (95%)+пропан-бутан(5%)	10	1423	6	360	480-520 По сталі 20
Сталь 45+12Х18Н9Т	Пари ацетону	10	1373	10	420	Тріщина по сталі 20, загин до 120° По сталі 45
	Гелій (техніч.)	10	1423	6	360	380-480
	N ₂ (95%)+пропан-бутан(5%)	10	1473	5	360	Тріщина по сталі 45, загин 120-135° По сталі 45
Сталь 3+12Х18Н9Т	Ar(90%)+пропан-бутан(10%)	10	1403	5	360	По сталі 45
	Пари аміаку (30%-ний водний розчин)	5	1423	10	360	Загин 120-130°
12Х18Н9Т+12Х18Н9Т	Аргон	12	1453	5	300	Тріщина по Ст. 3, загин 120-135°
	Гелій	40	1273	10	360	Загин 110-130°

4.3. Зварювання різнорідних металів і твердих сплавів

Зварювання тиском різнорідних металів в помітній мірі полегшується присутністю такого істотного активатора процесів дифузійного масообміну, як градієнт концентрацій елементів у зоні контакту. Ця умова прискорює процес утворення з'єднання і покращує якість зварювання, якщо матеріали, що з'єднуються, не утворюють між собою легкоплавких хімічних сполук (евтектик) або крихких інтерметалічних сполук. Оскільки процес дифузійного зварювання займає досить помітний час, товщина таких прошарків може досягати десятків та сотень мікрометрів. Твердість цих прошарків перевищує твердість з'єднуваних матеріалів іноді в рази, проте, вони володіють підвищеною крихкістю, істотно знижуючи міцність зварного з'єднання.

Для запобігання утворення небажаних структурних складових в зоні зварного з'єднання і підвищення його пластичності застосовують проміжні металеві прошарки. Наприклад, при зварюванні різнорідної пари 12X18H9T+BT-6, що широко застосовується у хімічному машинобудуванні, можливість утворення крихких інтерметалідів спонукає застосовувати проміжні прошарки з ванадію та міді [72]. Ванадій забезпечує задовільну якість з'єднання міді із титаном та блокує їх взаємодію. У свою чергу, мідь, забезпечуючи добру якість з'єднання із ванадієм та нержавіючою сталлю, визначає пластичність зварної зони. Руйнування з'єднання після зварювання у тліючому розряді в гелії протягом 600 с при температурі 1273 К і зусиллі стискання 6 МПа здійснюється по міді при навантаженні 408...432 МПа, тобто міцність з'єднання перевищує міцність міді.

При з'єднанні залізкобальтового сплаву ЕП-207 (пермендюр), з якого виготовляються магніострикційні перетворювачі ультразвукових технологічних установок, із хвильоводом з конструкційної сталі проміжні прошарки застосовують для зниження температури зварювання. У разі відсутності такого прошарку температура утворення якісного з'єднання складає біля 1273 К. В той же час точка Кюрі, при якій пермендюр суттєво погіршує свої магнітні властивості, складає 1173 К. Застосування проміжного мідного прошарку товщиною 0,1...0,2 мм при зусиллі стискання 9...11 МПа дозволяє знизити температуру зварювання до 1123 К, при цьому руйнування з'єднання здійснюється по пермендюру, як менш міцному матеріалу, на відстані 1...2 мм від стику [105].

Тліючий розряд знайшов широке застосування у якості джерела нагріву при дифузійному зварюванні ріжучого та штампового інструменту і, в першу чергу такого, робочі (ріжучі) частини якого виконані з твердого сплаву (ВК-6, ВК-15 та ін.), а тримач – з конструкційної сталі У8, 5ХНМ, 5ХНВ. З'єднання таких матеріалів іншими відомими способами – контактним зварюванням, зварюванням тертям та ін. практично неможливе. Номенклатура таких виробів надзвичайно широка (рис. 4.7), вони мають різноманітну геометричну форму при відносно незначних габаритах та площі контактуючих поверхонь. В цих умовах зварювання у тліючому розряді є більш ефективним у порівнянні з індукційним нагріванням внаслідок достатньо простої та швидкої адаптації джерела нагріву, в першу чергу, електродного вузла до зміни типорозміру деталей, що зварюються.

З'єднання дифузійним зварюванням твердосплавних деталей між собою вкрай утруднено внаслідок того, що такий сплав навіть при підвищених температурах володіє значною твердістю та малою пластичністю і для згладжування мікронерівностей необхідно прикладати значні стискаючі зусилля при одночасному підвищенні температури зварювання. Тому необхідно застосовувати проміжні прошарки, які дозволяють вирішити дві задачі: по-перше, знизити зварювальний тиск або температуру зварювання (або водночас обидва параметри), оскільки згладжування нерівностей в цьому випадку здійснюється не між твердими сплавами, а між твердим сплавом та пластичним металом прошарку; по-друге, при виборі певного металу прошарку можлива активація процесів взаємної дифузії.

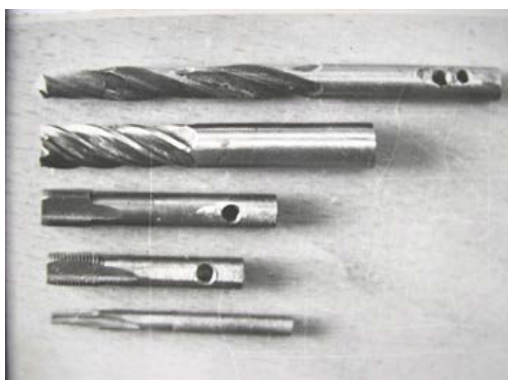


Рис. 4.7. Зразки ріжучого (а) та штампового(б) інструменту, отриманого дифузійним зварюванням у тліючому розряді

У зв'язку з викладеним, до матеріалу проміжних прошарків пред'являють певні вимоги, до яких слід віднести: необхідну пластичність при більш низьких температурах нагріву, метал прошарку не повинен утворювати із матеріалами, що зварюються, крихких інтерметалічних або хімічних з'єднань, стійких оксидів та інших крихких фаз, взаємодіяти з основними матеріалами з утворенням твердих розчинів, активувати процеси дифузійного масообміну.

З урахуванням визначених вимог у якості матеріалу проміжних прошарків при зварюванні твердих сплавів обрані кобальт та нікель [72]. Ці метали відносно пластичні, не утворюють небажаних з'єднань, добре взаємодіють із кобальтовою складовою твердих сплавів з утворенням твердих розчинів, які сприяють активації дифузійних процесів. Проміжні прошарки можливо застосовувати у вигляді фольги, порошку та напилених у вакуумі плівок. Здійснені експерименти [75] показали, що фольгу та порошок з нікеля або кобальта доцільно застосовувати при зварюванні деталей з плоскими поверхнями. Для зварювання твердосплавних деталей, що мають складну хвилясту поверхню (наприклад, злам) необхідно застосовувати прошарки у вигляді плівок, нанесених у вакуумі термічним випаровуванням або іонним розпиленням.

Ефективність застосування тонких плівок пояснюється тим, що внаслідок напилення в них утворюється значна кількість дефектів кристалічної будови, що володіють значною вільною енергією, яка активує процеси взаємної дифузії.

Згідно експериментальних даних [75, 103] найбільш міцні з'єднання твердих сплавів, що перевищують 1000 МПа, отримані при товщині плівкових прошарків 0,4...0,8 мкм та температурі зварювання 1423...1473 К.

Дифузійне зварювання твердих сплавів зі сталлюю основою представляє собою більш складний об'єкт, який складається з двох суттєво відмінних за термодинамічними властивостями матеріалів. В з'єднаннях твердих сплавів з конструкційними сталями різниця у коефіцієнтах теплового лінійного розширення досягає 300...500%. Внаслідок недостатньої пластичності твердих сплавів та поганого сприйняття ними розтягуючих навантажень здійснюється поява та розвиток мікротріщин у зварному з'єднанні під впливом внутрішніх напружень, що залишаються після зварювання та виникають в процесі експлуатації вузла.

Для нейтралізації небажаних ефектів та забезпечення високої працездатності зварних з'єднань при зварюванні твердих сплавів зі сталями застосовують проміжні прошарки, що компенсують напруження, які виникають внаслідок різниці коефіцієнтів лінійного розширення. Матеріалами для прошарків є нікель-кобальтові сплави, або окремо нікель та кобальт. Вони володіють добрими пружньо-пластичними властивостями і дифузійними характеристиками, мають більш низькі коефіцієнти лінійного розширення у порівнянні зі сталями. Оптимальна товщина таких прошарків 0,1...0,3 мм. Зварювання твердих сплавів зі сталями у тліючому розряді здійснюється в атмосфері водню або азоту при тисках газу 8...13 кПа, температурі нагріву 1373...1473 К, зусиллі стискання 10 МПа та ізотермічній витримці 10...15 хв.

Для зниження залишкових напружень зварні з'єднання твердих сплавів зі сталями доцільно після зварювання піддавати термічній обробці, яка складається у загартуванні сталлюю частини та наступному відпуску. Застосування тліючого розряду дозволяє виконувати ці операції в єдиному технологічному циклі із зварюванням.

4.4. Нагрівання та зварювання в тліючому розряді складних конструкцій

Дослідженнями і досвідом промислового застосування дифузійного зварювання з нагріванням в тліючому розряді виявлена його висока адаптивність до великої номенклатури виробів: починаючи від малогабаритних виробів електронної техніки масою в одиниці грамів, штампів і ріжучого інструменту, що мають компактну, відносно просту геометричну форму і масу не більше 1 ... 3 кг, до магніострикційних перетворювачів, що поєднують в собі масивні і тонколистові елементи складного рельєфу, загальною масою до 10 ... 15 кг [25, 103, 105].

Можливості зварювання у тліючому розряді виробів складної форми обмежені електрофізичними умовами виникнення розряду у порожнистому катоді або теплофізичними умовами спільного нагріву масивних і тонколистових елементів. Ці обмеження усуваються застосуванням екранів, що захищають зони прояву небажаних електро- та теплофізичних ефектів, або зміщенням зони дії розряду щодо небезпечної зони. Ці способи використовуються, зокрема, при дифузійному зварюванні магніострикційних перетворювачів, використовуваних в ультразвукових технологічних установках. Перетворювачі серії ПМС із зосередженими параметрами акустичного поля складаються (рис.) з масивного сталевго хвильоводу і пакету тонколистових елементів з залізокобальтового сплаву (пермендюру), що мають між собою жорстке закріплення. Дія тліючого розряду на тонколистові елементи неприпустима, тому що здатна привести до їх перегріву вище точки Кюрі і погіршення магніострикційних властивостей. Можлива схема нагрівання таких виробів показана на рис. 4.8.

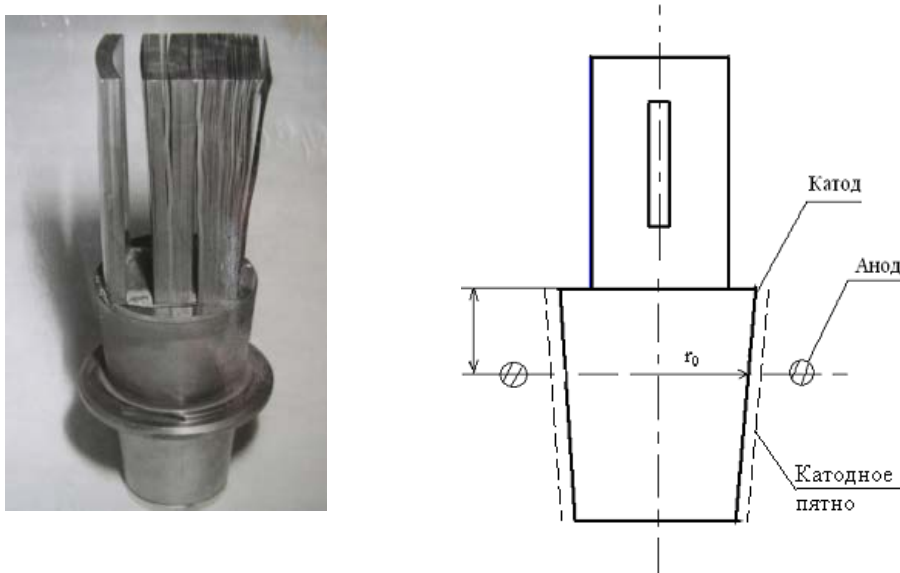


Рис. 4.8. Зовнішній вигляд та схема нагрівання тліючим розрядом при дифузійному зварюванні вузла магніострикційного перетворювача

При зварюванні виробів складної форми з рознесеними елементами, що приварюються (рис.), можливе використання складених контурних анодів, які дозволяють здійснювати одночасне нагрівання всіх зварюваних стиків. При одночасному зварюванні або паянні складних виробів з рознесеними елементами, що мають різну площу зварного контакту, доцільно використовувати секціоновані аноди, окремі секції яких підключаються до загального виводу джерела живлення через розв'язуючі баластні опори, значення яких вибирається виходячи з величини зварювального струму, необхідної для скрізного прогріву елемента конструкції, що приварюється, до температури зварювання.

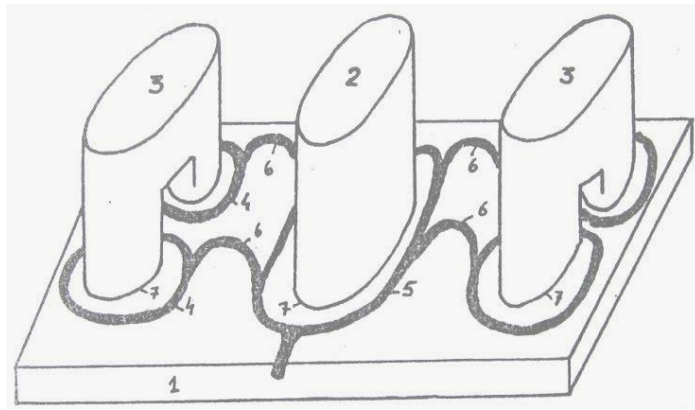
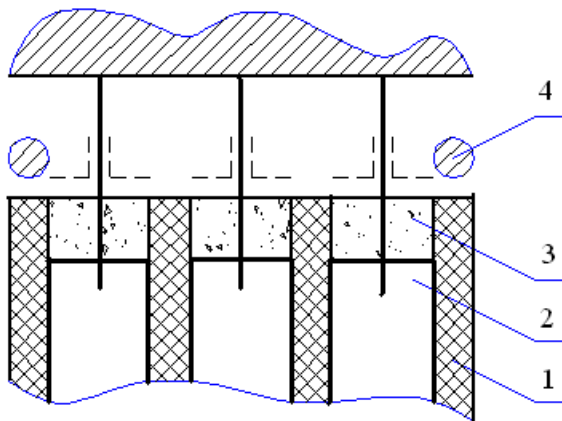


Рис. 4.9 Схема зварювання виробу, що складається з елементів 1, 2, 3 за допомогою багатоконтурного аноду 4,5,6 (7 – зона зварювання)

Перспективним є застосування тліючого розряду при груповому нагріванні в масовому виробництві малогабаритних виробів, таких як резистори, конденсатори та ін. На рис. 4.10 показані фото та схема нагрівання в тліючому розряді групи резисторів, корпуси яких встановлені у діелектричній обоймі. Відводи резисторів, що припаюються, підключаються до негативного полюсу джерела живлення і є, разом з корпусами, катодом тліючого розряду. Паяння здійснюється з використанням пастоподібного припою, що наноситься на контактні майданчики корпусів резисторів, які розташовуються в поглибленнях обойми.



а)



б)

Рис. 4.10. Схема групового паяння резисторів (а) та можлива конструкція багатопозиційного пристосування (б)

Специфічна властивість тліючого розряду проникати в щілини і порожнини може бути ефективно використана для нагрівання при зварюванні і паянні складених конструкцій, що мають наскрізні або відкриті з одного боку отвори і канали (теплообмінники, ґратчасті конструкції, що направляють газові потоки та ін.)

Розряд, проникаючи в усі порожнини і канали, наприклад теплообмінника, забезпечує його нагрівання по всьому об'єму конструкції (рис. 4.11). В силу малої теплової інерційності тонколистових елементів при великому об'ємі порожнин теплообмінника такий нагрів умовно можна вважати об'ємним. При застосуванні виробу в якості катода для стабільного об'ємного нагрівання підбирають такі параметри режиму (в першу чергу, тиск газу), щоб розряд в порожнині зберігав свою нормальність, не утворюючи зон підвищеної провідності, властивих розряду із порожнистим катодом. Це можливо, якщо мінімальний розмір вхідного отвору каналу в чотири і більше разів перевищує товщину зони катодного падіння потенціалу розряду. При цьому не відбувається злиття негативних тліючих свічень, виключається ефект порожнистого катода з притаманними йому локально підвищеними іонізацією і провідністю газорозрядної плазми, що призводять до просторової нестійкості нормального тліючого розряду.

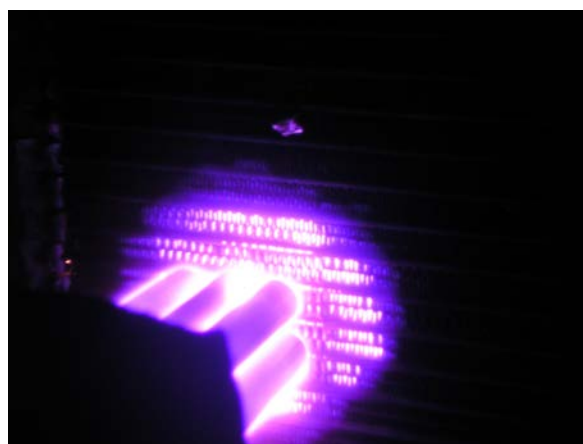
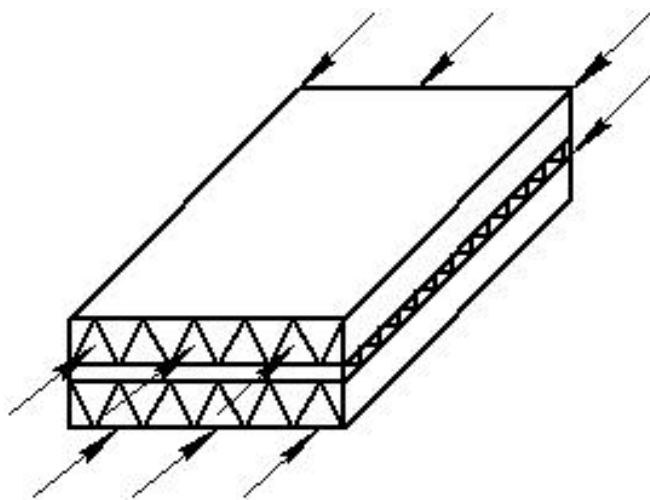


Рис. 4.11. Схема нагріву теплообмінника тліючим розрядом та зовнішній вигляд зони нагрівання

В роботі [100] представлена номограма (рис. 4.12), за допомогою якої за шириною зони катодного падіння d_k , знайденої за умови $d_k \leq 0,25a$, де a – найменший характерний розмір каналу або порожнини, визначаються мінімальне значення густини струму тліючого розряду і тиск газу.

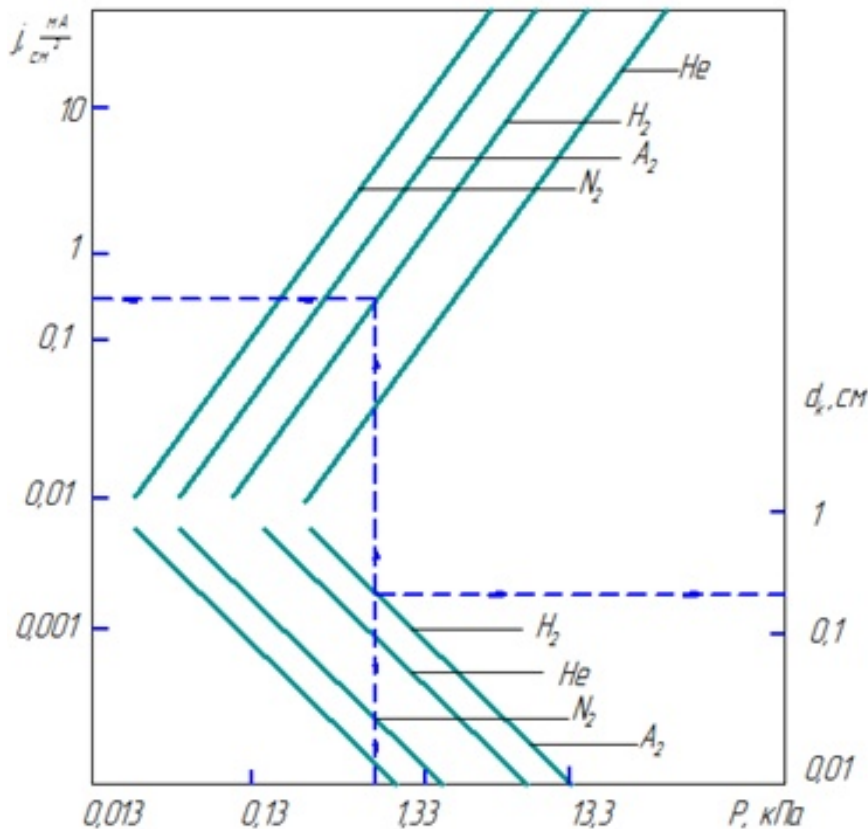


Рис. 4.12. Номограма для визначення параметрів тліючого розряду при нагріванні теплообмінників

Недоліком такої схеми нагрівання, коли виріб, що нагрівається, одночасно служить катодом розряду, є нерівномірність розподілу густини струму по довжині каналу – від максимальної на його вході з поступовим зниженням в глибину (рис. 4.13). Це, відповідно, призводить до нерівномірності температури нагріву по довжині каналу. У зв'язку з цим, такий варіант нагрівання може бути використаний для виробів з обмеженою протяжністю каналів або порожнин.

Більш раціональною є схема нагрівання [31, 33], при якій теплообмінник розташовується в зоні позитивного стовпа розряду, плазма якого, проходячи через канали, віддає у вигляді тепла частину електричної енергії, що виділяється в неї. Сам виріб при цьому електрично не пов'язаний з електродами розряду. Найбільш ефективним є розташування виробу між електродами розряду, що живляться змінним струмом. У цьому випадку полегшується тепловий режим електродів, вирівнюються умови нагрівання й, відповідно, температура по довжині каналу (рис. 4.13в). Максимальна довжина каналів виробу, що нагріваються і через які замикається плазма розряду, в цьому випадку визначається величиною напруги на виході джерела живлення, достатньої для пробію міжелектродного проміжку певної довжини. Інші параметри режиму нагріву можуть бути визначені згідно номограми (рис. 4.12) [100].

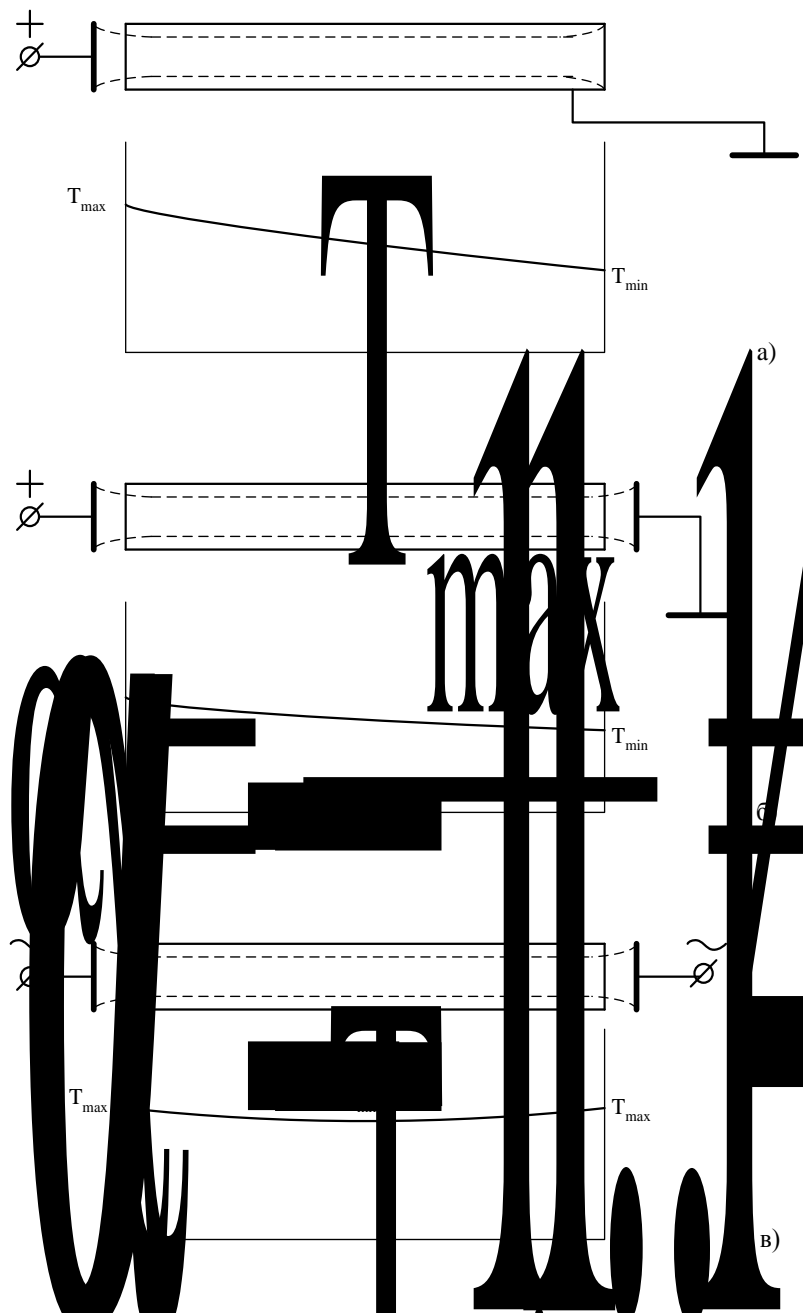


Рис. 4.13. Схеми нагрівання тліючим розрядом виробів із протяжними наскрізними каналами та характер розподілу температур по довжині каналів.

4.5. Активаційна дія тліючого розряду в умовах дифузійного зварювання

Поверхневі явища відіграють вирішальну роль в утворенні міцних зв'язків при з'єднанні різнорідних металів. Так, при поширенні рідких металів по твердій металевій поверхні одними з основних факторів є мікрорельєф і стан поверхні твердого металу (наявність забруднень, окисних плівок та ін.), структура приповерхневого шару [149]. При дифузійному зварюванні суттєву роль відіграє активація контактуючих поверхонь, що визначає подальший розвиток об'ємної взаємодії [58, 112].

Більшість металів і сплавів, що сполучаються за допомогою паяння та дифузійного зварювання, володіють помітною спорідненістю до кисню, тому не дивлячись на попередню механічну або хімічну обробку поверхонь, що сполучаються, вони покриті тонкою, а тому гнучкою і міцною плівкою окисів, що утворюються в період зберігання. Наявність оксидів на поверхні металу знижує його поверхневу енергію і, відповідно, здатність припою змочувати цю поверхню, а при певній товщині шару може повністю перешкодити утворенню міжатомних зв'язків. При дифузійному зварюванні ця проблема ще істотніша. Відсутність рідкої фази в зоні контакту не забезпечує відрив окисної плівки від поверхні та її диспергацію в розплаві, а обмежена макропластична деформація поверхонь, що сполучаються, не створює умови для появи багаточисельних розривів плівки оксидів, що утворюється за період між закінченням очищення й початком зварювання.

Оскільки окисні плівки в більшості випадків міцніші за метали, що зварюють (табл. 4.3), вони гальмують процеси утворення хімічних зв'язків і розвитку дифузійного масообміну. Протягом інкубаційного періоду відбувається їхнє розчинення в металі або флюсування проміжними матеріалами [2, 127, 141].

Таблиця 4.3 [164, 165]

Співвідношення твердостей окисів та металів
(оцінка за мінералогічною шкалою)

Твердість окису вище твердості металу більш, ніж у 1,2 рази	Берилій, магній, алюміній, кальцій, залізо, нікель, мідь, цинк, цирконій, кадмій, індій, олово, телур, свинець, вісмут, торій
Співвідношення твердостей окису та металу від 0,8 до 1,2	Кремній, титан, ванадій, хром, марганець, ніобій, тантал
Окис м'якше за метал у 0,8 рази та нижче	Молібден, технецій, вольфрам, уран

Тривалість цього періоду залежить від властивостей окисів і характеру пластичного деформування мікрорельєфу, коли зминаються мікростави, руйнуються покриваючі їх окиси й закриваються мікростави з наявними в них подрібненими окисами.

У результаті формується фізичний контакт, неоднорідний за своїм складом. Він містить у собі три типи контактів: 1) метал+метал; 2) метал+окис; 3) окис+окис, у яких істотно розрізняються процеси руху дислокацій, виникнення й дії активних центрів, розвитку дифузійного масообміну й формування моноліту.

Об'ємні взаємодії між з'єднаними матеріалами розвиваються найбільш інтенсивно через контакт першого типу. А в контакті третього типу процес формування зварного з'єднання може зупинитися на стадії поверхневої взаємодії [122]. Затримка в розвитку дифузійного масообміну повинна бути тим менша, чим менше контактів другого й третього типів і чим більш дефектна оксидна плівка. Попередній підігрів металів, що з'єднують, з метою сублімації окисів у високому вакуумі досить тривалий, енергоємний і не завжди ефективний процес. До того ж, процес сублімації окисів у вакуумі припиняється з моменту початку формування фізичного контакту поверхонь, що з'єднують. Тому, усяка активація процесу утворення зварного з'єднання, що складається в усуненні окисів, повинна закінчуватися безпосередньо в момент торкання та стискання поверхонь, що зварюють. Звідси, необхідність пошуку шляхів активації поверхонь матеріалів, що зварюють у твердій фазі, сформульована ще багато років тому [100, 173], залишається, як і раніше, актуальним завданням в області дифузійного зварювання.

Застосовані на даний час механічні та хімічні способи підготовки деталей, що з'єднують дифузійним зварюванням, здійснюються до їхньої установки в робочий вакуумний об'єм і тому не забезпечують достатньої чистоти поверхонь до початку формування фізичного контакту. Крім того, їм властиві істотні недоліки: насичення поверхонь абразивами, наявність залишків активних миючих речовин на поверхні, які є джерелами газовиділення у вакуумі, наводнення поверхонь електролітами. Більш ефективними є способи підготовки поверхонь, що проводяться безпосередньо перед приведенням їх у контакт і стисканням деталей, що зварюють.

Останнім часом помітну роль починають відігравати електрофізичні методи активації, пов'язані в першу чергу, із дією на поверхню потоків заряджених часток. У роботі [54] у лабораторних умовах показано, що застосування іонно-променевої обробки для очищення поверхні зразків сталевих смуг за швидкістю і якістю обробки значно перевершує хімічний спосіб очищення. Так, за технологічним циклом, прийнятим на Магнітогорському металургійному комбіна-

ті, в процесі хімічного очищення впродовж 25 с видаляються забруднення у кількості 1300...1350 мг/м². У процесі іонно-плазмового розпилення поверхні пучками важких іонів з енергією 20...50 кеВ така ж кількість забруднень видаляється за 2...5 с [125]. Проте, реалізація такого методу потребує застосування складного високовакуумного і високовольтного устаткування.

З фізичних методів підготовки поверхонь до вакуумного паяння й дифузійного зварювання найбільш перспективним видається застосування тліючого розряду, що дозволяє обробляти поверхні різної конфігурації (у тому числі і внутрішні порожнини) і різної площі (від одиниць до десятків тисяч квадратних сантиметрів). На даний час у літературі зустрічаються окремі обмежені, а іноді суперечливі відомості про попередню обробку металевих поверхонь тліючим розрядом перед зварюванням і нанесенням покриттів. Так, в роботі [128] для підготовки до зварювання тиском мідних і латунних деталей застосовується темний (піднормальний) розряд при тиску в камері 10⁻³ Па, струмі розряду 10⁻⁴ А і напрузі на електродах до 10 кВ. В той же час, у роботах [98, 157] відзначається, що очищення сталевих зразків може проводитися при тисках газу в камері обробки до 100...670 Па і більше в умовах, які наближаються до нормального режиму горіння тліючого розряду, тобто при енергії бомбардуючих іонів не вище 200...500 В, що приблизно відповідає падінню напруги в області катодного падіння потенціалу нормального тліючого розряду. У роботах [144, 148], присвячених обробці сталевієї смуги перед нанесенням алюмінієвого покриття, відзначається доцільність використання аномального тліючого розряду, що забезпечує високу енергію бомбардуючих іонів. Проте для цілей зварювання і паяння результати цих робіт використані бути не можуть, оскільки основне вирішуване завдання в них – формування на поверхні металу шару оксидів для кращої адгезії алюмінієвого покриття, для чого обробка здійснюється в середовищі кисню або повітря [132].

У роботі [22] досліджена активація (очищення) поверхонь металів, що з'єднували, іонною обробкою в тліючому розряді, що проходить у зварювальній камері безпосередньо перед дифузійним зварюванням.

В якості зразків використали заготовки діаметром 10 мм і висотою 30 мм зі сталі 45, сталі 12Х18Н10Т та титанового сплаву ВТ-3-1. Приблизно за 20...24 години до зварювання виконували чистову токарну обробку поверхонь, що з'єднують, а безпосередньо перед зварюванням їх або знежирювали розчинниками, або виконували іонне очищення в тліючому розряді при тиску газу (аргону) у камері 5...10 Па й напрузі на електродах розряду 2000...2500 В протягом 300 с. Оброблювані деталі були катодом тліючого розряду. Торці деталей, що зварюють, у процесі обробки встановлювали співвісно на відстані 10...12 мм один від одного і на них розташовувалася катодна пляма розряду (рис. 4.14).

Після обробки деталі приводилися в контакт механічною системою стискання й здійснювалося їхнє дифузійне зварювання.

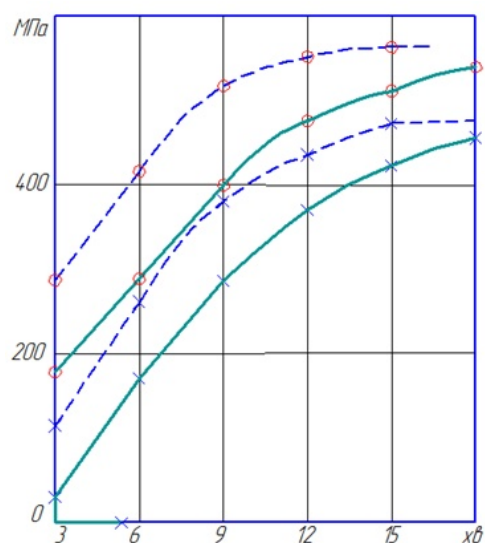
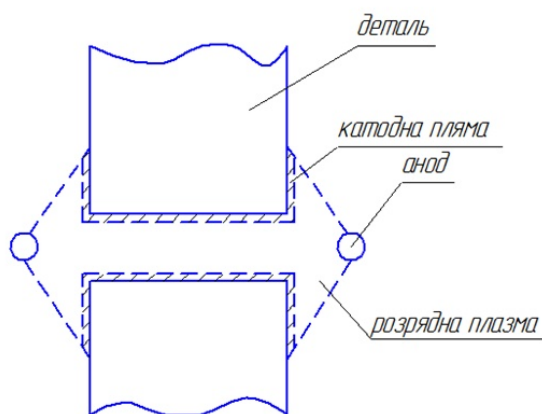


Рис. 4.14.. Схема іонної обробки зварюваних поверхонь металів

Рис.4.15. Кінетика формування міцності дифузійного з'єднання із застосуванням попередньої іонної обробки (-----) і без неї (—)

(x – VT3-1 + сталь 12X18H10T; □ – VT3-1 + VT3-1)

Активаційну дію іонної обробки на формування міцного з'єднання визначали за результатами механічних випробувань зразків, зварених в однорідному й різнорідному сполученнях на режимі: температура зварювання 1223 К, зусилля стискання деталей 10 МПа. Час зварювання варіювали в межах 6 - 9 - 12 - 15 - 20 хв.

Вплив попередньої іонної обробки на формування зварених з'єднань виявився в зниженні тривалості інкубаційного періоду, що передуює початку утворення хімічних зв'язків і розвитку дифузійного масопереносу. Тривалість інкубаційного періоду орієнтовно оцінювали за часом досягнення однакового рівня міцності з'єднань при зварюванні з іонною активацією й без неї.

Найбільше помітно цей вплив виявився при однорідному з'єднанні титанових сплавів і титана з нержавіючою сталлю, де тривалість зварювання скоротилась на 28...32 % й 22...24% відповідно (рис. 4.15). Набагато менш істотний вплив попередньої іонної обробки поверхонь, що з'єднували, при зварюванні зразків зі сталі 45, де активним відновлювачем поверхні є вуглець.

Дослідження поверхні сталі 12X18H10T на растровому електронному мікроскопі показали, що до іонного очищення вона покрита глобулями не змочуючих поверхню забруднень (рис. 4.16а), а після очищення відкривається її тонкий

мікрорельєф (рис. 4.16б). Звичайно, на цих зображеннях не видні тонкі прозорі шари адсорбованих газів й окислів, що утворилися на поверхні вже після іонної обробки.



а)

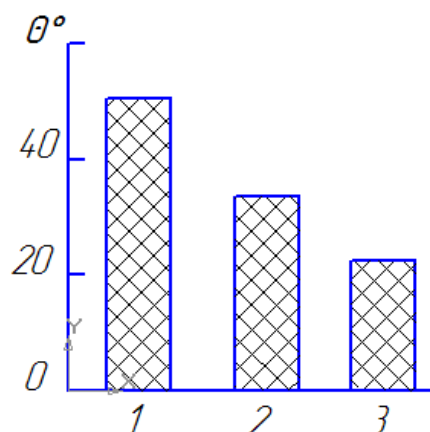


б)

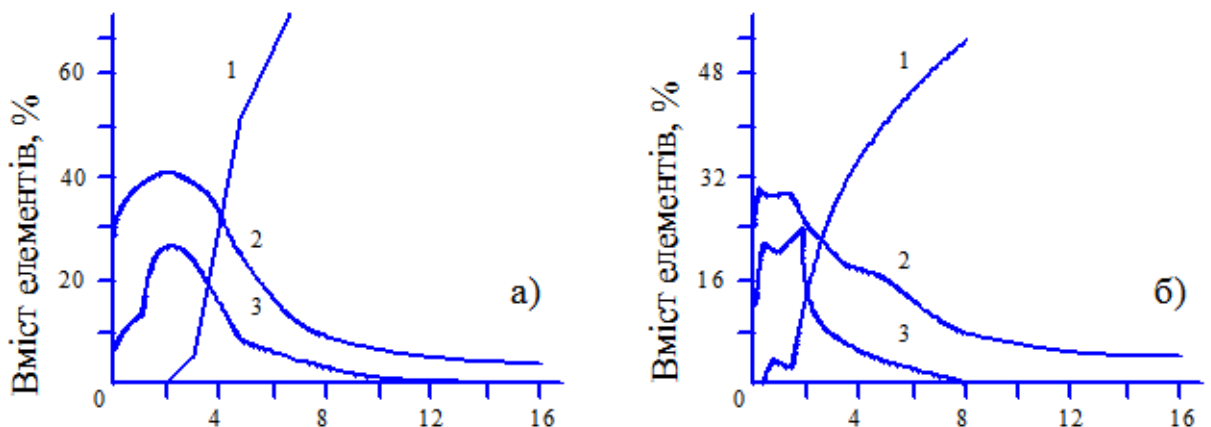
Рис. 4.16. Рельєф поверхні сталі 12X18H10T до (а) та після (б) іонної обробки (збільшення 5000х)

Дослідження змочуваності поверхні тієї ж сталі дистильованою водою, що наноситься у вигляді краплі масою 0,02 г, свідчить про помітне зниження крайового кута після іонної обробки як у порівнянні з вихідною поверхнею, так і після промивання її ацетоном (рис. 4.17). При цьому шорсткість поверхні сталі в результаті іонної обробки, виміряна за допомогою профілографа-профілометра типу А1 моделі 252, збільшилася щодо первісної шорсткості $R_z=0,4 \dots 0,6$ мкм досить незначно (не більш, ніж на 10...15%). У зв'язку із цим, більш імовірною є активація поверхонь, викликана зміною їхнього хімічного складу.

Рис. 4. 17. Зміна кута змочування поверхні сталі в залежності від способу її обробки:
1 – вихідна поверхня;
2 – промивання поверхні ацетоном;
3 – іонна обробка поверхні



Перевірку цього припущення робили на зразках з малолегованого алюмінієвого сплаву АМц, виготовлених з листового гарячюкатаного прокату. Алюміній зручний для цих цілей тим, що на його поверхні завжди присутній шар природного окису товщиною порядку 3 нм. В умовах гарячої прокатки або відпалу на повітрі товщина цього шару зростає до 15 нм [134] і він може бути досить легко виявлений сучасними вимірювальними засобами. Хімічний склад поверхні й поверхневого шару зразків до й після іонної обробки визначали методом спектроскопії оже-електронів за допомогою інструментального комбайна LAS-2000 фірми “Riber” (виміри виконані в ІЕЗ ім. Е. О. Патона НАН України). Результати вимірів наведені на рис. 4.18, де видно, що в результаті іонної обробки склад поверхні помітно змінився. Найбільш істотно результати обробки проявляються у зменшенні товщини прошарку, що відокремлює чистий алюміній від поверхні, і що представляє, очевидно, поверхневу оксидну плівку. Останнє підтверджується тим, що саме на цю глибину доводиться максимальна концентрація кисню в поверхневому шарі, загальний вміст якого після іонної обробки також помітно знизився. Можна вважати, що аналогічним чином у процесі іонного бомбардування відбувається видалення або істотне зменшення товщини менш стійких, ніж Al_2O_3 , окисних плівок хрому й титана на поверхні досліджуваних сталевих і титанових зразків. Це повинне сприяти їхньому руйнуванню й подрібненню в процесі утворення фізичного контакту й макропластичної деформації при дифузійному зварюванні.



1 – алюміній; 2 – кисень; 3 – алюміній в Al_2O_3

Рис. 4.18. Концентраційні профілі розподілу елементів у поверхневих шарах сплаву АМц до (а) і після (б) іонної обробки поверхні (по осі абсцис зазначений час виміру у хв.)

Отримані результати дозволяють рекомендувати застосування в єдиному циклі іонне очищення й дифузійне зварювання однорідних і різнорідних металів і сплавів. Найбільш ефективна така технологія при зварюванні активних металів, а також, з'єднань, у зоні зварного контакту яких є присутнім недостатня кількість елементів-відновників й/або відсутній такий потужний прискорювач процесів масопереносу, як помітний градієнт концентрації легуючих або матричних компонентів, що входять до складу матеріалів, що зварюються.

В той же час слід зазначити, що така технологія може бути застосована обмежено, оскільки вимагає суттєвого ускладнення устаткування, а саме системи стискання деталей, і є придатною для деталей відносно простої форми, в першу чергу циліндричної.

У роботі [] експериментально визначені оптимальні режими обробки тліючим розрядом металевих поверхонь перед дифузійним зварюванням як окремої технологічної операції, а також, визначена тривалість зберігання ефекту очищення поверхонь дією тліючого розряду. В якості інструменту обробки застосовували аномальний тліючий розряд, оскільки він дозволяє в широких межах змінювати падіння напруги в катодній області, тобто енергію бомбардуючих іонів, залежно від тиску газу і густини струму [4] (рис. 1.1).

Для оцінки ефективності іонної обробки використані матеріали, з'єднання яких утруднене наявністю на їх поверхні термічно та хімічно стійких окисних плівок - хромисті сталі 40X, 20X13 і 12X18H10T. Якість обробки оцінювали по розтіканню припою на оброблених поверхнях і за результатами механічних випробувань паяних та дифузійно-зварних зразків. У дослідах використані зразки з листового прокату, поверхня якого раніше не піддавалася будь-якому виду обробки, розміром $30 \times 20 \times 0,2$ мм при співвідношенні площі поверхні до об'єму $S/V \approx 10$ і $30 \times 20 \times 5$ мм при $S/V \approx 1$. В якості припою використали несамофлюсуючий припій ПСр- 72 з масою навішування 0,2 г. Для порівняння застосовували попереднє хімічне травлення поверхні зразків у відповідних реактивах [269], використовуваних в техпроцесах паяння.

Для іонного очищення застосована діодна схема травлення, оброблювані деталі слугували катодом розряду (рис. 4.19). Після обробки здійснювалась розгерметизація камери, зразок з навішуванням припою встановлювався в нагрівач і після вакуумування нагрівався до температури 1103 К. Тривалість проміжку часу між іонною обробкою та нагріванням зразка не перевищувала 15...18 хв.

Основними параметрами іонної обробки є:

- напруга на електродах розряду;
- тиск газу в камері обробки;
- густина струму і питома потужність розряду в зоні обробки;
- тривалість обробки.

- 1 – катод (зразок);
- 2 - утримувач зразка;
- 3 - заземлений анод;
- 4 - катодна пляма розряду

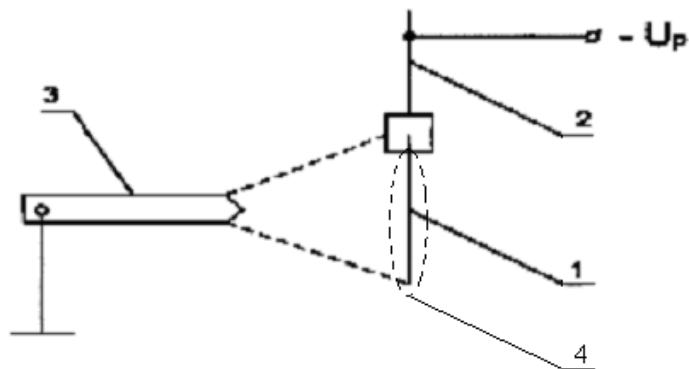


Рис. 4.19. Діодна схема обробки поверхні зразків тліючим розрядом

В якості робочого середовища використали інертний газ – аргон, тому основним механізмом обробки поверхонь є фізичне розпилення, швидкість якого визначається коефіцієнтом розпилення K_p . Величина K_p істотно залежить від тиску газу в камері і при тисках більше 13,3 Па знижується внаслідок утворення на поверхні мішені (зразка) щільних адсорбованих шарів, що перешкоджають розпиленню матеріалу мішені. Тому в роботі діапазон зміни тиску газу встановлювався в межах 1,33... 16,03 Па, при цьому нижня межа визначалася умовами існування тліючого розряду для застосованої діодної схеми розпилення, а верхній – вказаними вище умовами.

В першу чергу визначали вплив на якість підготовки поверхонь величини напруги на міжелектродному проміжку, яку варіювали в межах $U_p = 500...5000$ В. В цьому випадку при тисках газу, використовуваних в дослідях, величина катодного падіння потенціалу в аномальному тліючому розряді складає, згідно [4], орієнтовно від 300 до 4000 В. При нижчих напругах ефективність катодного розпилення помітно знижується [54], верхня межа встановлюваної напруги обмежувалася появою в міжелектродному проміжку мікродугових розрядів.

Результати свідчать (рис. 4.20), що із збільшенням напруги на електродах при однакових інших умовах площа розтікання припою S_p на усіх зразках зростає з одночасним зниженням крайового кута змочування. Величина напруги на електродах розряду, необхідна для забезпечення задовільного (порівняно із хімічною обробкою) розтікання припою, визначається властивостями оксидних плівок на поверхні деталей і зростає від 1200...1800 В для сталі 40Х, на поверхні якої присутні оксиди типу шпинелі ($FeO \cdot Cr_2O_3$) із незначним вмістом оксидів хрому, до 3000...3500 В для сталі 12Х18Н10Т, на поверхні якої утворюються досить стійкі оксиди хрому. Проте, після досягнення певної величини напруги для зразків із співвідношенням $S/V = 10$ спостерігається зменшення S_p (рис. 5.3), тоді як для більш масивних зразків з $S/V = 1$ такий ефект відсутній. Це можна пояснити тим, що збільшення напруги в умовах аномального розряду приводить до одночасного збільшення густини струму і питомої потужності ро-

зряду на поверхні зразків, сприяючи їх нагріву до температури 453 К і більше, коли на поверхні починають з'являтися ледве помітні кольори побіглості внаслідок наявності слідів кисню в камері у складі залишкових газів і в аргоні, що напускається. В цьому випадку ефективність обробки погіршується, оскільки з нагріванням швидкість окислення поверхні зростає і наближається до швидкості її розпилення. Масивніші зразки помітному нагріву не піддаються, проте підвищення напруги на розряді вище 2000...3500 В (відповідно до змісту хрому в матеріалі зразків) вже практично не впливає на якість обробки поверхонь сталевих зразків.

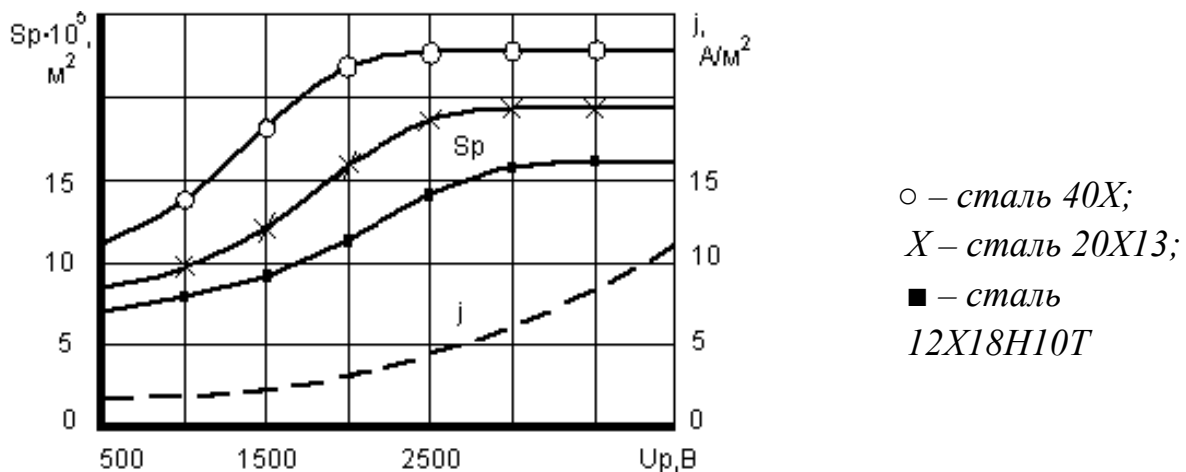


Рис. 4.20 Залежність площі розтікання припою S_p по поверхні сталі від напруги на електродах тліючого розряду в процесі обробки (j – густина струму на поверхні зразка, тиск газу 4,65.5,32 Па)

Як вже відзначалось, процес іонної обробки характеризується також густиною струму розряду j на оброблюваних поверхнях, яка в газових розрядах визначається не тільки напругою на електродах, а й величиною тиску газу в камері обробки. Для даного діапазону зміни тиску газу встановлено, що при низьких тисках (близько 1,33 Па), мабуть, внаслідок недостатньої концентрації заряджених часток в плазмі (малій мірі іонізації) стан поверхні після обробки несуттєво відрізняється від початкового (рис. 4.21). Зі збільшенням тиску газу в розряді в процесі обробки площа розтікання припою по поверхні зростає, досягаючи максимальних значень при тиску 3,99...7,98 Па, після чого починає дещо знижуватися. Останньому, як впливає з рис. 4.20, відповідає підвищена густина струму на поверхні зразка, сприяючи його нагріву. Крім того, підвищення тиску газу одночасно збільшує вміст в камері кисню, який прискорює окислення оброблюваної поверхні, а також, призводить до зниження величини катодного падіння потенціалу в розряді, тобто до зниження енергії бомбардуючих часток.

Зіставлення результатів, приведених на рис. 5.3 і 5.5 показує, що найефективніше обробка сталевих поверхонь відбувається при густині струму 0,4...1 мА/см².

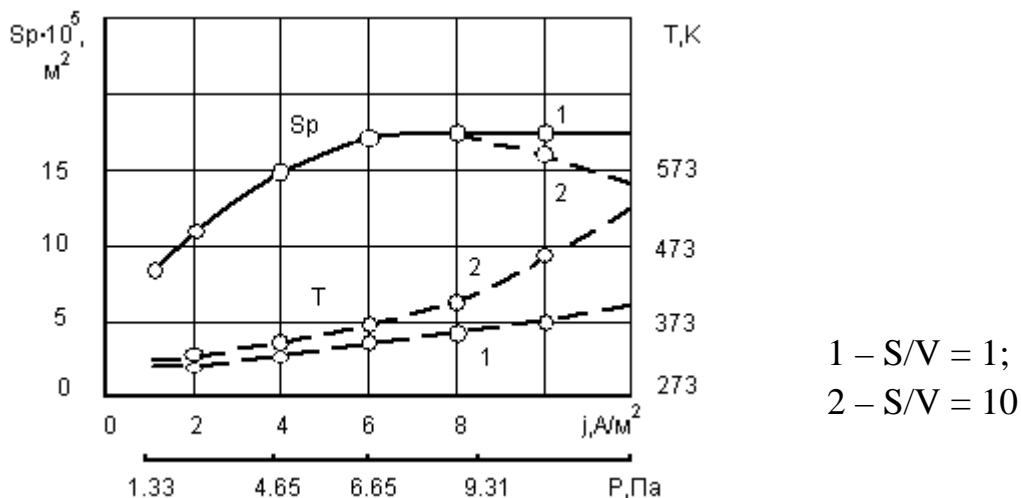


Рис. 4.21. Залежність площі розтікання припою по поверхні сталі 12X18H10T від густини струму тліючого розряду в процесі іонної обробки (T – температура нагрівання зразка в процесі обробки)

У розглянутих вище дослідях обробку розрядом здійснювали фіксований час, що становить 300 с, тому для визначення оптимальної тривалості процесу додатково здійснювали обробку в досить широкому часовому інтервалі - від 30 до 600 с на визначених раніше режимах (напруга розряду 3000 В, тиск газу 5,32 Па, густина струму 0,6 мА/см²). Отримані результати розтікання припоїв по оброблених поверхнях (рис. 4.22) свідчать, що тривалість процесу обробки до досягнення кращих показників визначається об'ємним вмістом в металі легкоокисних елементів. Зокрема, для досліджених сталей тривалість обробки залежить від вмісту в них хрому і складає від 120...150 с для сталі 40Х до 300...360 с для 12X18H10T.

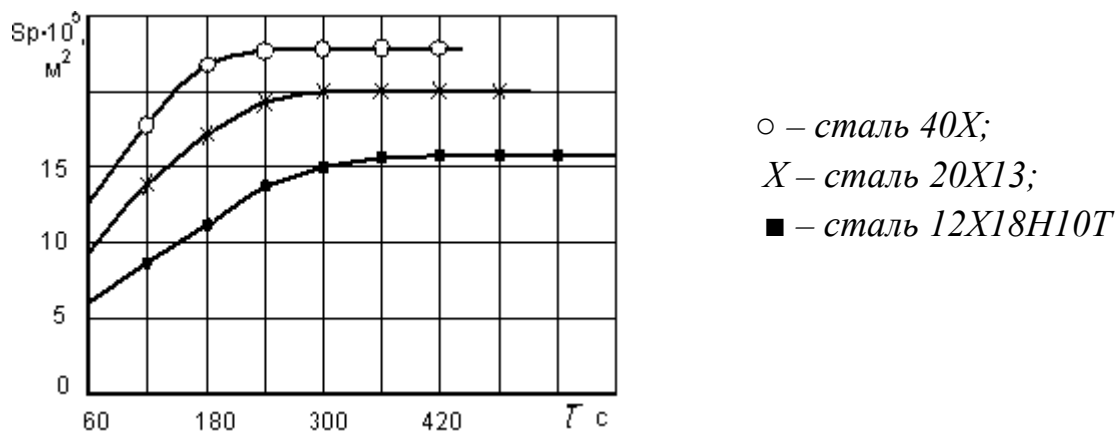


Рис.4.22 Вплив тривалості іонної обробки поверхонь сталей на розтікання по них припою

У виробничих і дослідницьких умовах між процесом підготовки заготовів і їх паянням або зварюванням практично завжди існує проміжок часу, що становить від десятків хвилин до десятків годин, упродовж якого оброблена поверхня є у контакті з атмосферою приміщення. Методи хімічної обробки дозволяють, у деяких випадках, зберігати в цих умовах необхідний стан поверхні досить тривалий час завдяки утворенню на поверхні захисної плівки відповідного хімічного складу [134]. У зв'язку з цим доцільно оцінити тривалість зберігання результатів впливу іонної обробки на металеві поверхні. Для цього зразки із сталі 12Х18Н10Т обробляли тліючим розрядом на режимі: напруга на розряді 3000 В, тиск газу 5,32 Па, густина струму розряду 0,4...0,6 мА/см², тривалість обробки 300 с; витримували їх на повітрі протягом 15, 30 та 60-ти хвилин, 1-ї, 5-ти та 20-ти годин, а також, протягом 5-ти годин в камері обробки при вакуумі $2,66 \cdot 10^{-3}$ Па, після чого визначали характер розтікання припою по поверхні.

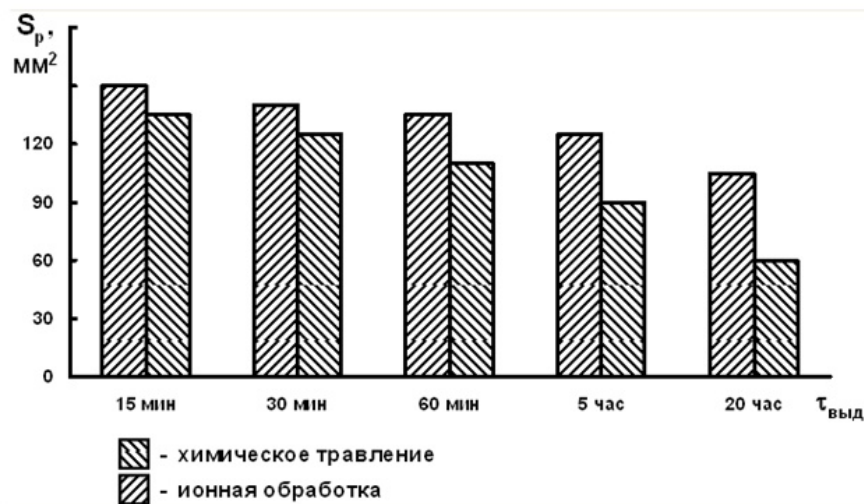


Рис. 4.23. Характер розтікання із часом припою по поверхні сталі 12Х18Н10Т в залежності від способу її очищення.

Результати, приведені на рис. 4.23, показують, що з часом стан поверхні, що характеризується площею розтікання припою і крайовим кутом змочування, на оброблених розрядом зразках змінюється швидше, ніж після хімічної обробки і до кінця доби зберігання наближається до стану початкових необроблених зразків, що свідчить про високу хімічну активність поверхні і її сприйнятливості до дії забруднень з навколишнього середовища. Дещо кращі результати отримані при зберіганні зразків у вакуумі (кут змочування склав 42° після 5-ти годин витримки у вакуумній камері проти 49° при зберіганні на повітрі), проте і в цьому випадку якість підготовки зразків знижується, що, імовірно, пов'язане із осаджуванням на оброблених поверхнях пари вакуумної олії. В той же час, як впливає з рис. 4.23, помітного погіршення стану обробленої розрядом поверх-

ні сталі 12X18H10T після 15-ти і 30-ти хвилинної витримки на повітрі порівняно з контрольними зразками, що пройшли хімічну обробку, не спостерігається. Мабуть, за такий короткий час окисна плівка на поверхні помітно вирости не встигає, а основні забруднення, адсорбовані поверхнею – пари води, жирів та ін., видаляються при подальшому нагріві зразків у вакуумі.

Вплив попередньої іонної обробки на формування зварних з'єднань в умовах дифузійного зварювання оцінювали за результатами механічних випробувань на зрізання зварних напусткових з'єднань вказаних сталей. Отримані результати порівнювали із міцністю аналогічних зварних з'єднань, поверхні яких попередньо оброблені хімічним травленням. Результати випробувань свідчать, що припустимий проміжок часу між іонною обробкою та зварюванням, по закінченні якого міцність зварних з'єднань знижується не більш, ніж на 10...15%, складає для сталі 12X18H10T до 1...1,5 години, сталі 20X13 – до 4...5-ти годин, сталі 40X – до 16...20-ти годин.

4.6. Керування процесами масопереносу при дифузійному зварюванні важкозварюваних металів

Можливість з'єднання різнорідних металів і утворення міцних зв'язків визначається насамперед фізико-хімічними властивостями металів, що з'єднуються, і застосованою технологією зварювання. Фізичні властивості металів, від яких залежить їх зварюваність, можуть істотно відрізнятися. Міцні зварні з'єднання утворюють метали і сплави, до складу яких входять елементи, що володіють необмеженою взаємною розчинністю не тільки в рідкому, але й у твердому стані, тобто утворюють безперервний ряд твердих розчинів. Взаємна розчинність елементів визначається подібністю кристалічних ґраток розчинника і компонента, що розчиняється, різницею в атомних радіусах компонентів і величиною електронегативності, яка характеризує енергію зв'язку між двома елементами. Згідно правила Юм - Розері [175] елементи з однаковим типом кристалічної ґратки утворюють безперервний ряд твердих розчинів тільки при малих відмінностях між атомними радіусами (в межах $\pm 15\%$) і електронегативності (не більш $\pm 0,4$) компонентів. За межами зазначених допусків валентний і розмірний фактори несприятливі для утворення твердих розчинів і, відповідно, надійного зварного з'єднання.

У зв'язку з цим при зварюванні металів, що істотно різняться фізичними властивостями, у зону з'єднання вводять проміжний елемент, який задовольняє вказаним вище правилам для обох металів-розчинників, що з'єднуються. Зокрема, при дифузійному зварюванні міді з тугоплавкими металами (вольфрамом і молібденем) в якості такого елемента застосовують нікель [72] у вигляді фольги або отриманого будь-яким способом тонкого шару на з'єднуваних по-

верхнях. У той же час, відносно низький коефіцієнт дифузії нікелю в ці метали обмежує розвиток перехідної дифузійної зони і не дозволяє досягти високої міцності з'єднання.

Останнім часом встановлено ефект проникнення атомів металу з поверхні на макроскопічні відстані вглиб підкладки при низьких температурах (до 473 К) в умовах іонного бомбардування поверхні в тліючому розряді. Виявлена в роботі [61] глибина проникнення в нікель і алюміній атомів цезію, що знаходиться у вигляді тонкого шару на поверхні зразка, склала десятки мікрометрів. При цьому коефіцієнти дифузії атомів цезію в нікель і алюміній на 1 ... 2 порядки перевищують аналогічні значення, отримані в умовах ізотермічного відпалу.

Виявлений ефект був використаний в роботі [38] при розробці технології дифузійного зварювання хрому з міддю, з'єднання яких має ті ж проблеми, що і для зазначених раніше пар металів, оскільки розчинність хрому в міді складає всього 0,0021% при температурі 1173 К [161]. У роботі досліджували вплив іонного бомбардування в умовах тліючого розряду на проникнення атомів нікелю в хром і можливість впливати таким чином на ширину дифузійної зони і, відповідно, міцність з'єднання.

Для цього на з'єднувану поверхню зразка з малолегованого сплаву хрому ВХ-2К, попередньо оброблену механічно, термічним випаровуванням у вакуумі наносили шар нікелю товщиною 1 ... 2 мкм. Потім здійснювали бомбардування цього шару іонами аргону, отриманими в плазмі тліючого розряду при тиску газу порядку 13,3 Па. Обробку проводили аномальним тліючим розрядом при напрузі на електродах 600 В. Тривалість іонного бомбардування становила 900 с. Після цього здійснювали дифузійне зварювання отриманого зразка хрому з мідним (мідь М1), поверхня якого також попередньо оброблялася механічно з наступним промиванням ацетоном. Зварювання зразків здійснювали на режимі: температура 1193 К, зусилля стиснення 16 МПа, час витримки 900 с. В якості контрольних використовували зразки, зварені через напилений на хром шар нікелю тієї ж товщини без іонної обробки. Якість зварювання оцінювали за результатами механічних випробувань зразків на зріз. У першому випадку міцність зразків склала 162 ... 172 МПа проти 118 ... 120 МПа у зразків, підданих тільки напилюванню. В обох випадках руйнування спостерігалось по хрому, мабуть, внаслідок його досить високої крихкості. Характер руйнування при цьому істотно різний: у напилених зразків зона руйнування являє собою не суцільний шар тонких лусочок хрому на поверхні мідного зразка, у напилених і оброблених іонами зразків спостерігаються значні виривання з поверхні хрому, що може свідчити про більш значну глибину дифузійної зони у бік хрому. Дослідження розподілу елементів в перехідній зоні, виконані за допомогою мікрорентгеноспектрального аналізатора "Сомевах" SX-50 з діаметром зонда 1 мкм показали, що при зварюванні зразків з тільки напиленням шаром нікелю останній інтенсивно дифундує в сторону мідного зразка (рис. 4.24) внаслідок високого коефіцієнта дифузії нікелю в мідь ($4 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2/\text{с}$ при $T = 1273 \text{ К}$). Завдяки цьому дифузійна зона в сторону міді виявилася досить розвиненою (16 ... 18 мкм). У бік хрому нікель дифундував помітно гірше, що може бути викликано як більш низьким коефіцієнтом дифузії (коефіцієнт дифузії нікелю в хром $6,7 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2/\text{с}$ при $T = 1273 \text{ К}$).

$10^{-16} \text{ м}^2 / \text{с}$ при тій же температурі), так і наявністю на його поверхні окисної плівки, що утрудняє дифузію. В результаті, дифузійна зона в сторону хрому виявилася незначною (не більше 3 ... 4 мкм). При зварюванні зразків після напилення і іонного бомбардування характер розподілу нікелю в зоні з'єднання істотно змінюється (рис. 4.24б). Завдяки попередньому примусовому втіленню атомів нікелю в поверхневі шари хрому він у процесі зварювання досить рівномірно розподіляється відносно зони з'єднання, що призвело до істотного збільшення протяжності перехідної зони в бік хрому (до 8 ... 9 мкм). Дослідження мікротвердості перехідної зони (рис. 4.25), виконані за допомогою мікротвердомера М - 400 фірми "LECO", показали наявність на межі розподілу хром-мідь прошарку, який різко відрізняється за твердістю від обох з'єднуваних металів, шириною в першому випадку до 10 ... 20 мкм, у другому - 30 ... 50 мкм, що відповідає результатам мікрорентгеноспектрального аналізу.

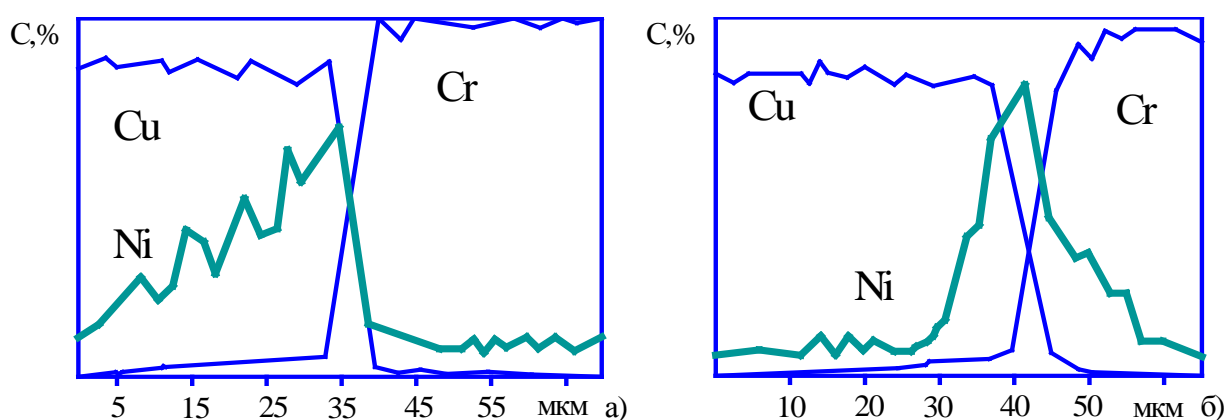


Рис. 4.24. Розподіл елементів в перехідній зоні з'єднання хром-мідь через напилений (а) та додатково оброблений іонами (б) проміжний шар нікелю

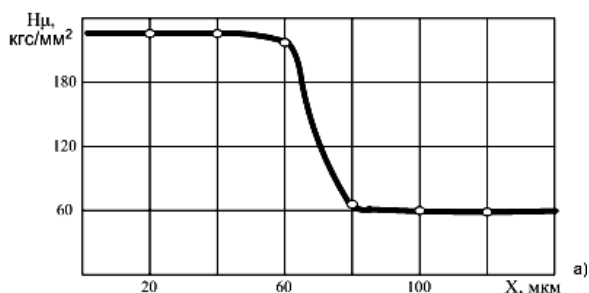
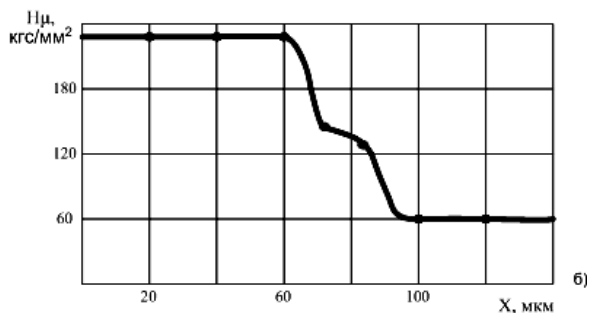


Рис. 4.25. Розподіл мікротвердості в зоні з'єднання хром-мідь з напиленням (а) та обробленим іонами (б) проміжним шаром нікеля



Механізм активації руху атомів нікелю вглиб хрому під дією іонного бомбардування в умовах тліючого розряду не може бути пояснений в рамках застосовуваних методів зміни складу і структури поверхневих шарів металів іонною імплантацією [54] і іонно-променевим перемішуванням [84], оскільки істотно відрізняється від них умовами проведення процесу, в першу чергу енергією бомбардуючих іонів, що досягає у вказаних процесах 100 кеВ і вище. В умовах обробки тліючим розрядом енергія іонів складає всього 0,2 ... 3 кеВ. У цьому випадку більш ймовірним є легування поверхневого шару зразка атомами віддачі (первинно зміщеними атомами) з плівки, що знаходиться на поверхні, при бомбардуванні її іонами інертних газів [172]. Атоми віддачі отримують досить високу енергію від прискорених іонів і можуть переміщатися в твердому тілі на відстань кількох одиниць або десятків нанометрів. Подібний ефект може спостерігатися і в процесах іонної імплантації при великій концентрації легуючого домішка в іонізованій паровій фазі, по-цьому в ряді джерел [65, 172] його називають імплантацією атомів віддачі. Якщо енергія, передана іоном первинно зміщеному атому, перевищує порогову енергію зміщення атома, яка для більшості металів знаходиться в межах $T_d = 10 \dots 30$ еВ, то він, у свою чергу, може змістити інші атоми і т.д. Середнє число атомів, зміщених атомом віддачі, визначається енергією первинно зміщеного атома, яку в першому наближенні можна прийняти відповідною падінню напруги в прикатодній області тліючого розряду. В аномальному тліючому розряді при тисках газу $p \ll 133$ Па величина цього падіння складає 0,9 ... 0,95 напруги на електродах розряду [4].

Звідси випливає, що одиничний вплив прискореного іона на поверхневі атоми плівки призводить до послідовного зсуву в напрямку удару декількох десятків або сотень атомів останньої, що в умовах малої товщини плівки може призводити до втілення атомів плівки в підкладинку (зразок) за рахунок зміщуючих і заміщуючих атомних зіткнень. Тривалий динамічний вплив на переміщені атоми прискорених іонів, що передають їм енергію і імпульс в напрямку від поверхні, сприяє просуванню атомів плівки вглиб підкладинки.

Процес іонної обробки характеризується кількома основними параметрами: напругою на розряді, що прискорює іони, густиною струму розряду і тривалістю обробки. Представляє інтерес уточнення їх ролі в процесі іонного легування і, відповідно, формування надалі дифузійної зони, а також, визначення оптимального діапазону зміни їх значень.

Вплив цих факторів на якість зварювання в роботі оцінювали за результатами механічних випробувань зварних зразків. Для визначення оптимального діапазону енергій бомбардуючих іонів змінювали напругу на міжелектродному проміжку в межах від 200 до 1500 В. Обробку поверхні зразка з нанесеною плівкою нікелю здійснювали протягом 900 с при тиску аргону 13,3 ... 15,9 Па. Діапазон тисків вибраний з умови обмеження дії ефекту катодного розпилення плівки в процесі бомбардування, який найбільш помітно проявляється при тисках газу менше 13,3 Па [10]. Результати випробувань зварних зразків показують (рис. 4.26), що в діапазоні напруг розряду 200 ... 400 В енергія іонів, очевидно, недостатня для переміщення атомів плівки в поверхневі шари хрому, що проявляється у в зниженій міцності з'єднання, яка незначно перевищує міцність зраз-

ків, зварених без застосування іонного бомбардування. У той же час, при напругах розряду понад 1000 В міцність з'єднання також знижується, що може бути викликано тим, що за інших рівних умов (тиску газу і тривалості обробки) коефіцієнт розпилення нікелю іонами аргону при зміні напруги розряду від 200 до 1200 В зростає в три рази [65], що призводить до зниження його концентрації в підкладинці. Як показують результати, найбільш оптимальний діапазон напруг розряду для легування поверхні хрому нікелем лежить в межах 600 ... 900 В.

Два інших параметри обробки – густина струму розряду j і тривалість впливу іонів на поверхню τ визначають дозу опромінення (або флюенс іонів) $Q = j\tau$, тобто кількість частинок, що бомбардують одиницю поверхні за даний час, і можуть взаємно корелювати між собою. Однак, виконані дослідження показали, що діапазон зміни густини струму розряду на поверхні зразка обмежений.

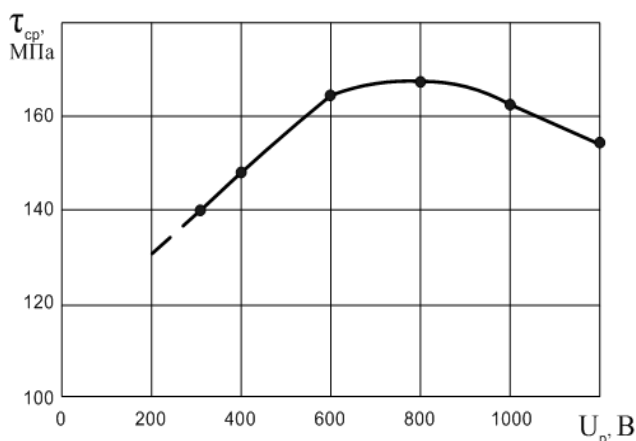


Рис. 4.26. Залежність міцності з'єднання від напруги на електродах тліючого розряду в процесі іонної обробки шару нікелю (тиск газу в камері 1,33...15,9 Па, час обробки 900 с.)

В умовах аномального тліючого розряду струм розряду i , відповідно, густина струму при незмінній напрузі на електродах визначається тиском газу в камері обробки. Зі збільшенням тиску густина струму зростає приблизно в квадратичній залежності і при певній її величині сприяє суттєвому нагріванню зразка і появі шару окислів на поверхні напиленої плівки. Міцність зварного з'єднання в цьому випадку помітно знижується (рис. 4.27), руйнування відбувається по зоні з'єднання. У зв'язку з цим, доцільно проводити процес легування поверхневого шару металів у тліючому розряді при температурі зразків не вище 423 К, коли свідомо відсутнє окислення їх поверхні.

Оцінку впливу тривалості іонного бомбардування напиленої на зразок хрому плівки нікелю на міцність зварного з'єднання хрому з міддю здійснювали при напрузі розряду 600 В і тиску газу 13,3 Па. Тривалість обробки варіювали в межах від 300 до 3600 с. Встановлено (рис. 4.28), що при цих режимах зі збільшенням тривалості бомбардування міцність з'єднання плавно зростає, досягаючи максимуму в 212 ... 223 МПа приблизно за 2400 с, після чого практично не змінюється. Мікрорентгеноспектральні дослідження показали, що в цьому випадку протяжність перехідної зони в бік хрому сягає 12 мкм.

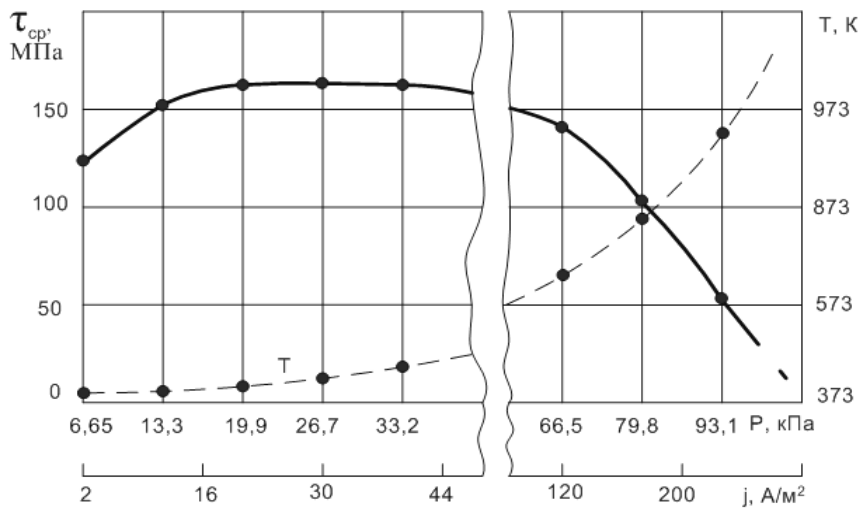


Рис. 4.27. Залежність міцності з'єднання від тиску газу P та густини струму j в процесі попередньої іонної обробки шару нікеля (T – температура нагріву зразка)

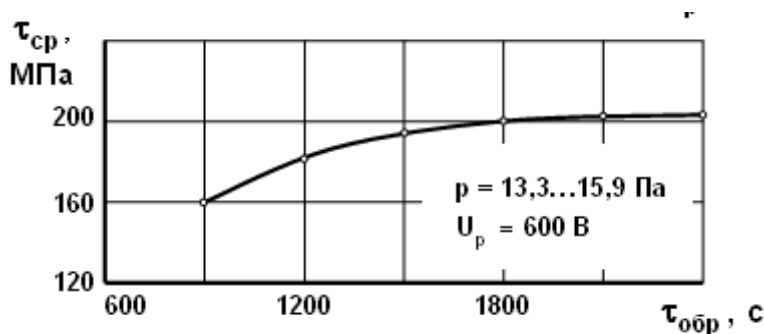
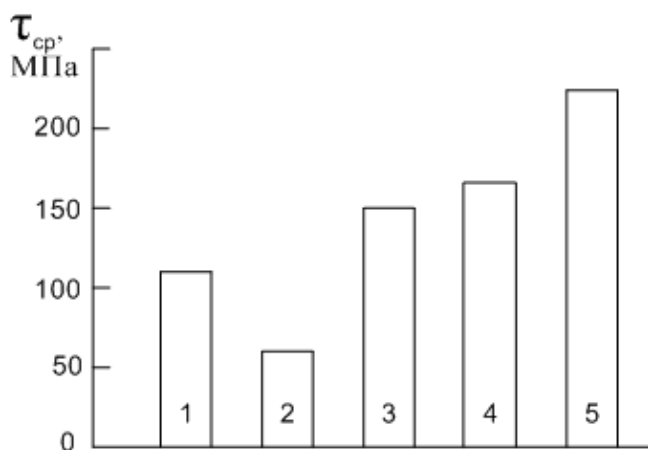


Рис. 4.28. Залежність міцності зварного з'єднання хром-мідь від тривалості іонного бомбардування шару нікелю

У розглянутих випадках забезпечення якісних показників зварювання досягалося застосуванням проміжного шару нікелю, що володіє розчинністю з обома металами, що сполучаються - хромом і міддю. Додаткове іонне бомбардування шару нікелю служило в якості інструменту, що забезпечує прискорене примусове втілення нікелю в приповерхневі шари хрому, оскільки термічний коефіцієнт дифузії нікелю в хром на два порядки нижче, ніж в мідь. Примусово впроваджений в хром нікель утворює "стежки", по яких мідь завдяки її високому коефіцієнту дифузії в нікель ($9,58 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2/\text{с}$ при 1273 К [74]), проникає в об'єм хрому, розширюючи дифузійну зону і підвищуючи, тим самим, міцність з'єднання. Порівняльні показники міцності з'єднань хром-мідь через прошарок нікелю при різних режимах іонного бомбардування наведені на рис.4.29.

Проте, у ряді технічних застосувань в з'єднанні хром-мідь неприпустима присутність третього елемента, який може впливати на службові властивості виробу (електропровідність, теплопровідність та ін) [57]. З'єднання таких матеріалів через напилений у вакуумі шар міді і перфорований мідний прошарок [135] не забезпечило достатньої активності процесів масопереносу і міцність з'єднання не перевищила 120 ... 140 МПа при температурі зварювання 1273 К і зусиллі стиснення 24 МПа. У першу чергу це пояснюється, як вже зазначалося, дуже малою розчинністю хрому і міді один в одному, що викликано, згідно наведеного вище правила Юм-Розері, істотною відмінністю фізичних властивостей металів. Однак, для іонної металургії ці відмінності виявляються менш значними. Згідно емпіричному правилу, сформульованому Д. Судом [180], метастабільні сплави заміщення утворюються при іонній імплантації, якщо радіус атомів імплантованого домішка лежить в межах 85 ... 140% радіуса атомів розчинника, а їх електронегативності відрізняються менше, ніж на $\pm 0,7$. Це дає можливість створювати іонною обробкою гомогенні суміші речовин, нерозчинних в рівноважних умовах.



- 1 – термічне напилення нікелю без іонної обробки;
 2 – іонна обробка на режимі: $U_p = 600 \text{ В}$; $\tau_{обр} = 900 \text{ с}$, температура нагріву зразка $T_{обр} = 873 \text{ К}$;
 3 – $U_p = 1200 \text{ В}$, $\tau_{обр} = 900 \text{ с}$;
 4 – $U_p = 600 \text{ В}$, $\tau_{обр} = 900 \text{ с}$;
 5 – $U_p = 600 \text{ В}$, $\tau_{обр} = 2400 \text{ с}$.

Рис. 4.29. Міцність зварних з'єднань хром-мідь через шар нікеля в залежності від умов обробки шару

У роботі [38] вивчена можливість підвищення міцності з'єднання хром-мідь за допомогою попереднього втілення атомів міді з нанесеної на хром термічним напиленням мідної плівки товщиною 1 ... 2 мкм, бомбардуванням цієї плівки іонами аргону в тліючому розряді. Бомбардування здійснювали, як і в попередньому випадку, при напрузі на розряді 600 В, тиску газу 13,3 ... 15,9 Па протягом 900 і 1800 с. Зварювання зразків здійснювали при температурі 1193 К, зусиллі стиснення 16 МПа протягом 1200 с, тобто на істотно більш "м'яких" режимах, ніж у роботі [135]. Міцність зварних зразків, отриманих

після іонного бомбардування плівки протягом 1800 с, досягла 161 МПа, що на 15% вище, ніж у вказаній роботі. При цьому залежність міцності з'єднання від умов іонного бомбардування аналогічна з'єднанню через прошарок нікелю.

Таким чином, результати досліджень свідчать, що модифікація хімічного складу поверхневих шарів металів методами імплантації іонів віддачі з нанесених на їх поверхню тонких металевих плівок, бомбардуванням останніх іонами інертних газів в тліючому розряді при енергії іонів 600 ... 1000 В є ефективним способом впливу на процеси дифузійного масопереносу при зварюванні тиском металів, що істотно розрізняються фізико-хімічними властивостями і володіють незначною взаємною розчинністю в твердому стані.

Особливістю цього способу активації дифузійних процесів є те, що легування поверхневих шарів металів атомами віддачі з використанням бомбардування в тліючому розряді може здійснюватись безпосередньо на установці дифузійного зварювання при її незначному доопрацюванні.

4.7. Змочування металевих поверхонь припоями при нагріванні та паянні в тліючому розряді

Технологічні властивості тліючого розряду в поєднанні з відносно простим устаткуванням визначають перспективність застосування його як джерела нагріву і в процесах паяння металів, що підтверджується як рядом дослідницьких робіт [43, 81], так і досвідом промислового застосування [71]. Однак, якщо для процесів дифузійного зварювання в тліючому розряді вже сформувалися основні вимоги до техпроцесу, обладнання, вибору режимів зварювання, то процеси паяння в тліючому розряді в достатній мірі ще не вивчені, що не дозволяє сформулювати рекомендації для призначення режимів нагріву заготовок, що з'єднуються, вибору газових середовищ і умов горіння розряду. Мабуть, цим пояснюються обмежені відомості про застосування тліючого розряду в умовах паяння, пов'язані, в основному, із радіотехнічною галуззю.

Основною характеристикою здатності до паяння є змочування поверхні з'єднуваних металів рідким припоєм, що визначається умовами розтікання припоїв по твердих металевих поверхнях. Основним параметром процесу паяння є температура нагріву, обумовлена фізико-хімічними властивостями металів, що паяють, температурою плавлення припоїв, характеристиками робочого середовища, в якому здійснюється процес.

Паяння у нейтральних або відновних газових середовищах в широкому діапазоні тисків застосовується досить широко і ефективно, при цьому наголошується, що наявність і склад газового середовища суттєво впливають на температуру розтікання припоїв по металевій поверхні [48]. У цьому випадку встановлювати температурний режим паяння, орієнтуючись на відому температуру плавлення припоїв, вже не представляється можливим. В літературі [149] наведені відомості про умови змочування металевих поверхонь різними припоями і

чистими металами у вакуумі і різних газових середовищах із зазначенням необхідної температури нагріву, що забезпечує задовільне розтікання припоїв.

Для паяння в плазмі тліючого розряду такі рекомендації відсутні, при цьому скористатися зазначеними вище пропозиціями не представляється можливим [163], тому що в цьому разі виріб є одним з електродів розряду і між ним (і припоєм) та анодом існує значне електричне поле, здатне впливати на поведінку рідкого припою. Крім того, на поверхні виробу та твердого або розплавленого припою спостерігається ефект катодного розпилення під дією цього поля, що змінює склад металевих поверхонь і впливає на величину енергії поверхневого натягу на межі припой - тверде тіло і припой - іонізований газ (плазма).

Найбільші труднощі виникають при паянні активних металів або сплавів, що містять активні елементи, де розтікання припоїв обмежується наявністю окисних чи інших плівок на поверхні. До останніх відноситься і такий широко вживаний клас конструкційних матеріалів, як леговані сталі.

В роботі [41] розглянуто умови розтікання припоїв по поверхні сталей в умовах нагріву тліючим розрядом, що горить в середовищі найбільш використовуваних газів - аргону і азоту. В якості матеріалів, що паяють застосовували конструкційні сталі 20Х13, 40ХН, 36НХТЮ, 12Х18Н10Т, які мають у своєму складі різний вміст хрому, здатного впливати на змочування їх поверхні припоями. Розміри зразків $20 \times 20 \times 0.2$ мм, маса припою становила 0.2 г. Поверхня зразків попередньо промивалася ацетоном. У дослідах оцінювали температуру розтікання припоїв і кут змочування. Характер розтікання припоїв при нагріванні в тліючому розряді оцінювали порівнянням з розтіканням в тих же, але нейтральних (неіонізованих) газових середовищах при аналогічних тисках газу. Діапазон зміни тиску газу становив від 13.3 Па до 2.66 кПа. Нагрівання зразків у нейтральному газовому середовищі здійснювали радіаційним способом молібденовим нагрівачем, при нагріванні в тліючому розряді зразки служили катодом розряду. Після моменту початку розтікання припою, який визначався візуально, здійснювали витримку на цьому режимі протягом 30 с і після охолодження визначали кут змочування на оптичному мікроскопі, забезпеченому кутоміром. У якості припоїв використовували мідно-срібний припій ПСр-72 і мідь М1. Оцінку розтікання припоїв в дослідах проводили як у відсутності флюсу, так і з попереднім флюсуванням поверхонь кип'ятінням зразків протягом 3-х хвилин у насиченому водному розчині флюсу ПВ-209 для припою ПСр-72 та ПВ-200 для міді.

Результати (рис. 4.30) свідчать, що за відсутності флюсу в обох випадках (в іонізованому і нейтральному газових середовищах) з підвищенням тиску газу кут змочування θ зростає для всіх досліджених матеріалів. При цьому при знижених тисках газу кут θ при нагріванні в тліючому розряді менше, ніж в нейтральному газовому середовищі. Це може бути обумовлено ефектом катодного розпилення поверхні прискореними іонами, що забезпечують додаткове очищення поверхні металу і припою від забруднень, ефективність якого зростає з пониженням тиску газу [19, 142]. Підтвердженням цьому може служити те, що при нагріванні зразків тліючим розрядом, що горить в середовищі аргону,

кут змочування зазначених металів на 3 ... 7 ° нижче, ніж у середовищі азоту при тих же тисках. Це може бути викликано тим, що коефіцієнт розпилення поверхонь в аргоні майже в два рази вище, ніж в азоті [54].

З підвищенням тиску газу кут змочування при нагріванні зразків у тліючому розряді помітно зростає і за певних значень тисків починає перевищувати кут θ , що спостерігається при нагріванні в нейтральному газовому середовищі при цих же тисках (рис. 4.30). Це може бути пов'язано з інтенсифікацією окислювальних процесів на поверхні зразків внаслідок іонізації газового середовища і викликаного цим підвищення активності елементів--окислювачів [84], в першу чергу кисню, кількість якого з підвищенням тиску робочого газу в камері неминуче зростає. Крім того, як уже зазначалося, з підвищенням тиску газу знижується коефіцієнт катодного розпилення і погіршується видалення поверхневих домішок.

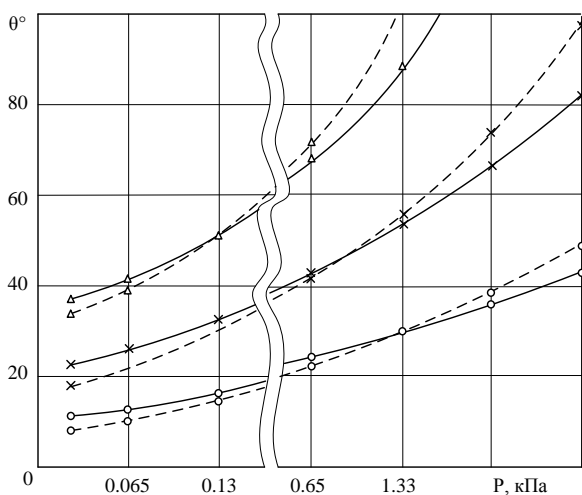
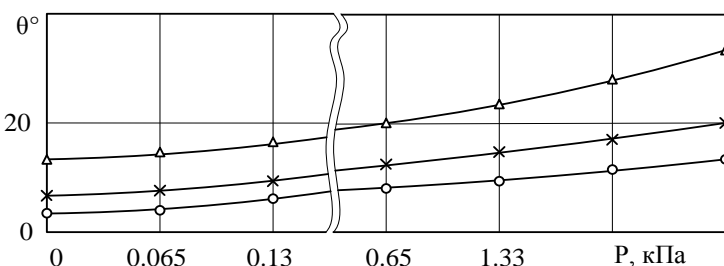


Рисунок 4.30. - Залежність крайового кута змочування поверхні сталей припоєм ПСр-72 від тиску газу при нагріванні в нейтральному газовому середовищі (----) і плазмою тліючого розряду (-.-) у відсутності флюсу



Δ - сталь 12X18H10T
 \times - сталь 20X13
o - сталь 40XH

Рисунок. 4.31. Залежність крайового кута змочування поверхні сталей припоєм ПСр-72 від тиску газу при нагріванні плазмою тліючого розряду з попередніми флюсуванням поверхонь

При нагріванні зразків тліючим розрядом в присутності флюсу, нане-сеного на контрольну поверхню зазначеним вище способом, кут змочування припоями істотно зменшується (до $25 \dots 30^{\circ}$) і слабо залежить від роду і тиску газу (рис. 4.31), практично порівнюючись зі значеннями кута θ при флюсовому паянні в нейтральному газовому середовищі тими ж припоями.

Оцінку температури розтікання припоїв також здійснювали в умовах флюсового та бесфлюсового паяння при різних тисках газу в камері. Для сталей 40ХН та 36НХТЮ задовільне змочування поверхонь в умовах нагріву тліючим розрядом без флюсу спостерігається вусьому дослідженому діапазоні тисків газу, що може бути пояснено малим вмістом хрому в сталі. Температура перегріву, що характеризує перевищення температури нагріву зразків над температурою плавлення припою, необхідна для забезпечення розтікання припою ПСр-72 по поверхні цих сталей зростає з підвищенням тиску газу в камері в присутності розряду від $48 \dots 60^{\circ} \text{C}$ при тиску 13.3 Па до $100 \dots 120^{\circ} \text{C}$ при тиску 1,33 ... 1,5 кПа (рис. 4.32). Близькі (менше на $12 \dots 23^{\circ} \text{C}$) значення температури перегріву отримані при растекании припою М1. Для зразків зі сталі 20Х13 температура перегріву в тліючому розряді зростає більш помітно і досягає тих же значень для припою ПСр-72 при тиску 0,7 ... 0,9 кПа. На зразках зі сталі 12Х18Н10Т в умовах нагріву тліючим розрядом без флюсування поверхні при тиску газу більше 0,26 ... 0,3 кПа розтікання застосовуваних припоїв не відбувається при нагріванні аж до 1573 К (гранична температура для ХА-термопар).]

Проте, у присутності флюсу температура перегріву для сталей 40ХН, 20Х13 істотно знижується, складаючи $26 \dots 35^{\circ} \text{C}$ в досліджуваному діапазоні тисків газу, практично не залежачи від величини тиску. Для сталі 12Х18Н10Т ця температура трохи вища і досягає $48 \dots 70^{\circ} \text{C}$ (рис. 6.3) у тому ж діапазоні тисків газу. В цих умовах для розглянутих матеріалів виявлено задовільне змочування поверхонь припоями, а також, затікання припоїв в капілярний і некапілярний зазор з утворенням галтелі поблизу виходу припою з зазору. Таким чином, встановлені режими пайки в тліючому розряді цілком вписуються у відомі (рекомендовані) режими флюсової пайки зазначених матеріалів.

Вище (див. п. 2.2) була показана істотна роль позитивного стовпа тліючого розряду в нагріванні катода. Це обумовлено тим, що залежно від міжелектродної відстані і тиску газу в позитивному стовпі може витрачатися до 50 ... 80% всієї енергії, що виділяється в розряді, а також достатньо високою температурою нейтрального газу в стовпі, що досягає 1000 ... 1500 К при тисках газу 1 ... 5 кПа. Такі істотні енергетичні характеристики позитивного стовпа дають підставу використовувати в ряді випадків нагрівання виробів саме плазмою позитивного стовпа. У першу чергу це може стосуватися паяння малогабаритних і тонкостінних виробів (наприклад, конструкції стільникового типу, теплообмінники з численними каналами і розвиненою поверхнею нагріву, групове паяння малогабаритних деталей та ін), де можливо забезпечити достатньо рівномірне обтікання їх розрядної плазмою.

У той же час, нагрівання електрично нейтральною плазмою позитивно-ного стовпа має свої особливості. Оскільки швидкість електронів плазми набагато перевищує швидкість позитивних іонів, то на металевих поверхнях виробу

накопичується негативний заряд, утворений електронами, що першими досягають поверхонь та осідають на них. Останній відштовхує наступні електрони і притягує іони плазми. У результаті над металевою поверхнею утворюється шар просторового позитивного заряду (рис. 6.5), що росте до тих пір, поки різниця потенціалів ϕ , що виникає над поверхнею, не врівноважить густину струмів обох зарядів. Для тисків газів в плазмі тліючого розряду 0.13 ... 1.33 кПа величина цієї різниці потенціалів складає $\phi = 5 \dots 15$ В [70].

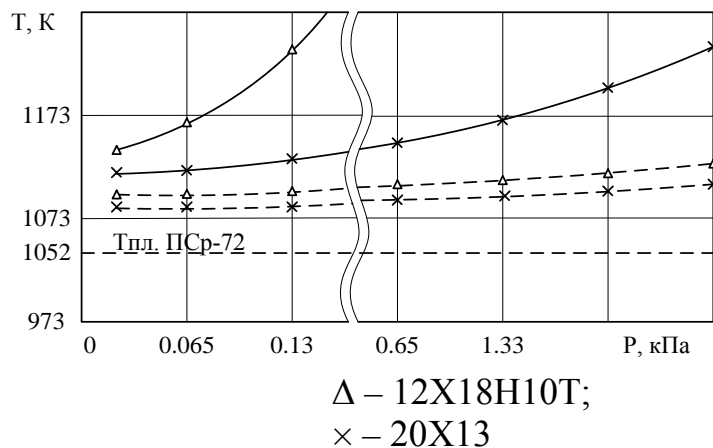


Рисунок. 4.32. Залежність температури перегріву сталей до розтікання припою ПСр-72 від тиску газу при нагріванні тліючим розрядом у відсутності (----) та присутності флюсу (- - -)

Наявність потенціалу в поверхневій плазмі і створюваного ним електричного поля, очевидно, може впливати на міжфазні параметри, оскільки ефект катодного розпилення в цьому випадку відсутній.

Експериментальне вивчення впливу плазми позитивного стовпа розряду на характер розтікання припою проводили в середовищі азоту при тисках газу 0.13 та 1.33 кПа. Зразок зі сталі 36НХТЮ розміром $15 \times 15 \times 0.2$ мм з навішуванням припою ПСр-72 розміщувався в металевому каналі перетином 20×6 мм довжиною 40 мм, встановленому між електродами розряду таким чином, що через нього пропускається плазма стовпа розряду. Збільшенням сили струму розряду домагалися плавлення припою. Результати розтікання припою показують, що в атмосфері низькотемпературної плазми кут змочування за відсутності флюсу зростає на $8 \dots 11^\circ$ у порівнянні з нагріванням при тих же тисках газу в умовах, коли виріб використовувався у якості катода (рис. 4.30). Зазначене збільшення кута θ в низькотемпературній плазмі може бути пов'язаним з виникненням стрибка потенціалу на міжфазних межах метал - плазма і може бути пояснено наступним чином. У плазмі під дією стрибка потенціалу зменшуються міжфазні натяги на границях тверде тіло - плазма (σ_{13}) і рідина (розплавлений припой) - плазма (σ_{23}) (рис. 4.33). При цьому натяг на міжфазному кордоні тверде тіло - рідина (σ_{12}) залишається незмінним, тому що електричне поле екранується металевою поверхнею. У результаті, в рівнянні Юнга [48] перший член правої ча-

стини помітно не змінюється, а другий член за абсолютною величиною зростає, що й призводить до збільшення кута θ :

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{13}}{\sigma_{23}} - \frac{\sigma_{12}}{\sigma_{23}}$$

Слід зазначити, що досвід застосування тліючого розряду для дифузійного зварювання показує, що використання нагрівання в розряді низьких тисків, що горить в аномальному режимі не завжди є ефективним, оскільки нагріванню одночасно піддається не тільки весь виріб, але й частина пристосувань та самої камери, що неминуче призводить до енергетичної надмірності процесу.

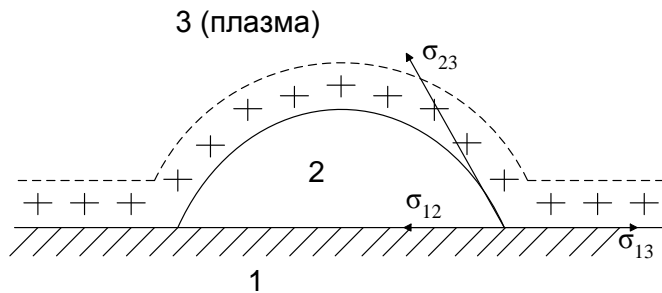


Рис. 4.33. Схема утворення шару просторового позитивного заряду над металевою поверхнею при нагріванні в плазмі тліючого розряду

Більш ефективним є нагрів нормальним тліючим розрядом, що горить при тисках більш 0,5...1 кПа і здійснює локальний нагрів зони з'єднання. У зв'язку з цим, паяння достатньо габаритних конструкцій, особливо таких, де є можливість флюсування поверхонь, що паяються, доцільно проводити в нормальному тліючому розряді при тисках газу до 1.33 ... 2.66 кПа.

Підвищення технологічності процесу паяння в тліючому розряді може бути досягнене застосуванням активних газових середовищ і газоподібних флюсів для видалення оксидів активних металів при температурі паяння. Цей напрямок ще потребує детальних досліджень.

5. ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ТА ПАЯННЯ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ

5.1. Установки для дифузійного зварювання та паяння в тліючому розряді

Нагрів тліючим розрядом здійснюється в середовищі розріджених газів, що дозволяє істотно підвищити техніко-економічні показники обладнання в порівнянні з іншими способами нагріву при дифузійному зварюванні і вакуумному паянні - радіаційним, індукційним: не потрібне застосування високовакуумних систем, використовуються досить прості за конструкцією та в експлуатації джерела живлення розряду, що в цілому в 3-4 рази знижує вартість обладнання. Простота обладнання для зварювання у тліючому розряді, його високі енергетичні характеристики і хороша адаптація до широкої номенклатури виробів дозволяють виконувати його універсальним, придатним до використання не тільки в масовому, але і в серійному та одиничному виробництві; виключає небезпеку впливу на людину шкідливих факторів. Крім того, тліючий розряд володіє специфічною властивістю – здатністю активувати зварювані поверхні [113].

У таблиці 7.1 наведені характеристики ряду установок, що використовують тліючий розряд у якості джерела нагріву для зварювання та паяння. Промислове обладнання для зварювання та паяння в тліючому розряді відрізняється від лабораторного тим, що робочі камери мають більші розміри, а система живлення, що має підвищену потужність, оснащується захисними пристроями, які захищають деталі, що зварюються, від можливого непередбачуваного впливу потужних електричних дуг. Як правило, промислові установки для зварювання та паяння у тліючому розряді комплектуються з наступних основних вузлів:

- 1) робоча камера;
- 2) джерело живлення тліючого розряду;
- 3) система стиснення зварюваних деталей (для зварювальних установок);
- 4) система вакуумування;
- 5) система подачі робочого газу;
- 6) система управління і контрольно-вимірвальна апаратура.

Компонування всіх універсальних установок для зварювання та паяння проводиться на єдиному каркасі, або для цього, як основа, використовуються типові вакуумні пости. Модернізація полягає у видаленні високовакуумних вузлів і монтуванні системи стиснення, яка може бути, залежно від зусилля стиснення, гідравлічною, електромеханічною або механічною; робочої камери з герметичними струмопідводами; магістралі та відповідної арматури для подачі

робочого газу в камеру; джерела живлення розряду з контрольно-вимірювальною та регулюючою апаратурою.

Таблиця 5.1

Характеристики обладнання для зварювання та паяння в тліючому розряді

Тип джерела живлення тліючого розряду (установки)	Потужність джерела живлення, кВ·А	Особливості конструкції та призначення установки	Літературне джерело
ИОН-1	10	Універсальна напівпромислова із пристроєм стабілізації розряду	[101]
ИЕП	8	Лабораторна, універсальна	[106]
ИОН-1-м	15	Універсальна, промислова для нагріву в середовищі водню	[79]
ДС-00-01	10	Універсальна, промислова, напівавтоматична	[107]
ИОН-30	30	Промислова двохкамерна для зварювання магнітострикційних перетворювачів	[105]
ИОН-3	3,2	Лабораторна, універсальна, переносна із системою стискання за рахунок термонатягу	[104]
ИОН-3м	3	Лабораторна, універсальна із механічною системою стискання	[111]
ИОН-5	5	Лабораторна, універсальна із електромеханічною системою стискання	[21]
ИОН-3-п	3	Лабораторна, універсальна для паяння	[33]
ИОН-60-п	60	Універсальна для паяння, напівпромислова	[82]
Трансформатор із середньою точкою та випрямлячем	12	Промислова для паяння електровакуумних приладів	[71]

У якості приклада на рис. 5.1 наведена схема установки для дифузійного зварювання ИОН-5, основні параметри якої вказані у таблиці 5.1

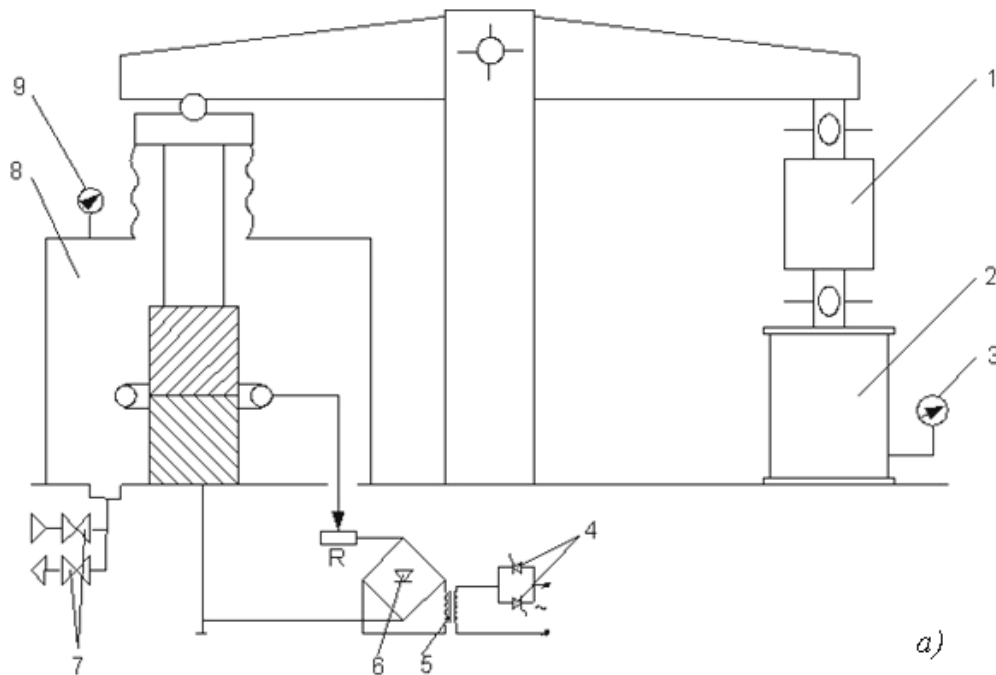


Рис. 5.1. Схема установки дифузійного зварювання ИОН-5.

Установка складається з електромеханічного приводу 1 системи стиснення з аксіальним ходом штоку. Для контролю зусилля стиснення деталей застосований гідроциліндр 2 із манометром 3. Зусилля стиснення від електроприводу за допомогою важільного пристрою та рухомого сильфонного вузла передається до зварюваних деталей, встановлених у робочій камері 8. За допомогою вентилів 7 забезпечується з'єднання камери із форвакуумним насосом або газовим балоном. Живлення розряду здійснюється від промислової мережі змінного струму через тиристорний регулятор напруги 4, підвищуючий трансформатор 5 та високовольтний випрямляч 6. Реостатом R здійснюється плавне або ступінчасте регулювання струму тліючого розряду.

Центральним елементом устаткування є робоча охолоджувана вакуумна камера, габарити і форма якої визначаються виходячи з розмірів найбільш великих виробів, які передбачаються для розміщення в неї при зварюванні або паянні. Принципово важливим є підвід від'ємного потенціалу до корпусу камери і всієї установки та їх заземлення. Завдяки цьому забезпечується робота з нормальним тліючим розрядом за будь-яких габаритів виробів, виключається

проблема ізоляції виробів від камери, забезпечується можливість періодичного іонного очищення всієї внутрішньої поверхні камери для підтримки необхідних умов вакуумної чистоти, підвищується надійність і безпека електричної системи.

На відміну від установок для дифузійного зварювання з іншими джерелами нагріву в установках для зварювання тиском у тліючому розряді відсутня необхідність у глибокому вакуумі і тому вони оснащуються лише форвакуумними насосами. Це знижує їх вартість, габарити та скорочує тривалість налагодження та ремонту. Для зварювання у тліючому розряді можливо застосовувати практично будь-який газ. Газом заповнюють камеру на початку процесу зварювання і в подальшому газ в камеру не додають.

При зварюванні тиском у тліючому розряді застосовуються дві групи пристосувань та оснащення: 1) для фіксації та стискання зварюваних деталей; 2) для їх нагрівання. Перша група аналогічна оснащенню, що застосовується у обладнанні для дифузійного зварювання у вакуумі. Друга група пов'язана із нагрівачем, функцію якого виконує електричний розряд. Оскільки розряд здійснюється між електродами, одним з яких є виріб (катод), електрично з'єднаний із заземленим корпусом камери, то другий електрод – анод, власне і є тим елементом технологічного оснащення, який визначає положення нагрівача (тліючого розряду) відносно об'єкта нагрівання.

Анод звичайно виконується у вигляді неохолоджуваного дротяного контуру, встановленого еквідистантно відносно зварного стика. Площа перерізу анодного дроту повинна бути такою, щоб контур був достатньо жорстким при монтажі та в експлуатації при температурі його нагрівання до температури 973...1073 К. Матеріал аноду обирають таким, щоб він не взаємодівав з робочим газом, склад якого залежить від матеріалу катоду. Тому при дифузійному зварюванні тугоплавких металів, коли температура катоду досягає 2000...2300 К, матеріал аноду може відповідати матеріалу катода, зокрема, це може бути молибденова стрічка. Для розширення технологічних можливостей установки аноди повинні бути змінними і монтуватись на анодотримачі, закріпленому на опорі з ізоляційного матеріалу. Більш ефективним, але й більш складним є застосування рухомого анодотримача, розташованого на вертикальному гвинті із реверсивним приводом, який дозволяє ззовні камери керувати переміщенням анода по вертикалі, змінюючи положення зони максимальних температур на катоді. Оскільки вакуумна камера та пристосування, розташовані в неї, знаходяться під від'ємним потенціалом, відстань між ними та анодом повинна суттєво перевищувати відстань між анодом та катодом. Це забезпечить усунення утворення подвійного розряду і зосередить його потужність в зоні нагріву (зварювання).

У таблиці 5.2 наведені межі зміни основних параметрів, що характеризують процеси дифузійного зварювання і паяння в тліючому розряді, досягнуті на існуючому обладнанні.

Таблиця 5.2

№ п / п	Параметр і його розмірність	Межі регулювання параметра
1.	Сила струму тліючого розряду, А	$10^{-3} \dots 10^2$
2.	Напруга на аноді розряду, 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, К	1500...2000
6.	Густина струму на катоді (виробі), А/см ²	$10^{-3} \dots 1$
7.	Міжелектродна відстань, м	0,005...0,05
8.	Коефіцієнт зосередженості енергії у плямі нагріву, см ⁻²	0,01...0,5
9.	Площа плями нагріву, см ²	1...10 ⁴

При зварюванні в тліючому розряді використовують типову контрольно-вимірювальну апаратуру, відповідну вимогам до точності контролю та регулювання технологічних параметрів процесу, наведених у таблиці.

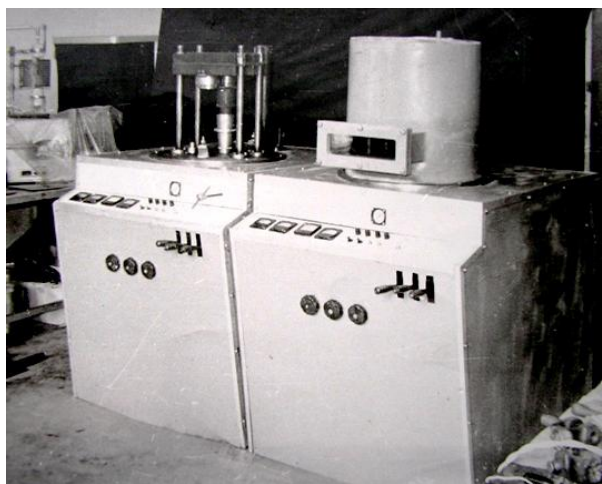
Контроль температурного режиму здійснюється за допомогою термопар, які через герметичний ввід у камері підключають до вимірювального або регулюючого приладу. Розташовувати термопару необхідно таким чином, щоб вона не піддавалась безпосередній дії тліючого розряду. Якщо закріпити термопару на виробі не представляється можливим, контроль проводять за допомогою фотоелектричних мікропірометрів з межами виміру 873 ... 2273 К, що забезпечують високу точність вимірювання температур на відстані до 1 м на порівняно малій площі виробу, що нагрівається. 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

пропускної здатності, що може привести до похибки вимірювання. Це вимагає очищення скла вікон після кожного циклу зварювання та періодичної їх заміни.

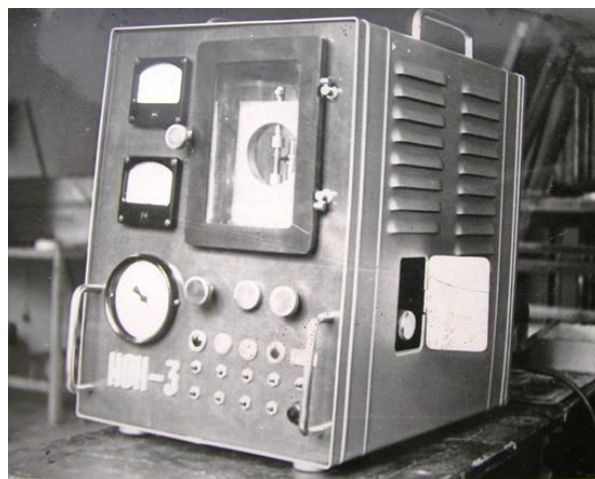
Подача робочого газу в камеру здійснюється за допомогою електропневмоклапану. Для контролю та регулювання тиску газу у вакуумній камері застосовують електроконтактні або інші вакуумметри із електричним виходом. Пристосування для фіксації та стиснення зварюваних деталей можуть бути механічними, електромеханічними, гідравлічними або пневматичними і, в цілому, аналогічні вживаним в обладнанні для дифузійного зварювання у вакуумі [88].

Завдяки використанню типових, широко застосованих в промисловості пристроїв та приладів для автоматичного контролю, запису та регулюванню основних параметрів іонного нагріву і зварювання: струму розряду, тиску газу в камері, зусилля стиснення зварюваних деталей, є можливість створення повністю автоматизованих процесів зварювання і паяння в тліючому розряді.

На рис. 5.2 показаний зовнішній вигляд деяких установок для дифузійного зварювання у тліючому розряді.



а)



б)

Рис. 5.2. Двокамерна чотирьохпозиційна установка дифузійного зварювання ИОН-30 (а) із гідравлічною системою стиснення та малогабаритна переносна установка ИОН-3 (б) із стисненням деталей за рахунок термічного натягу потужністю, відповідно, 30 та 3 кВт.

5.2. Системи електроживлення та управління тліючим розрядом

При розробці та створенні джерел живлення потужнострумове тліючого розряду необхідно враховувати специфічні особливості, що відрізняють його від зварювальної електричної дуги: а) менші струми; б) більш високі падіння напруги на розрядному проміжку; в) можливість переходу тліючого розряду в дуговий. Останнє вимагає розробки джерел живлення, стабілізуючих розрядний струм та здатних витримувати стрибки струму, що у три–пять разів перевищують номінальні значення.

Оскільки статичні вольт-амперні характеристики тліючого розряду мають горизонтальну та зростаючу ділянки, то стійкий стан системи «джерело-розряд» забезпечується лише при падаючій зовнішній характеристиці джерела живлення. Положення робочої точки, що відповідає сталому режиму тліючого розряду, можна переміщувати за допомогою:

- 1) зміни кута нахилу зовнішньої характеристики джерела регулюванням величини опору зовнішнього кола (рис. 5.3, криві 1 і 2);
- 2) еквідистантного переміщення характеристики джерела вгору або вниз зміною напруги U_0 на його вихідних клеммах (рис. 5.3, криві 1 і 3).

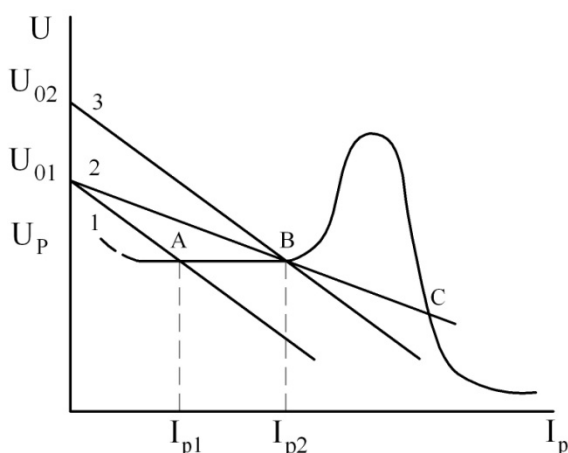


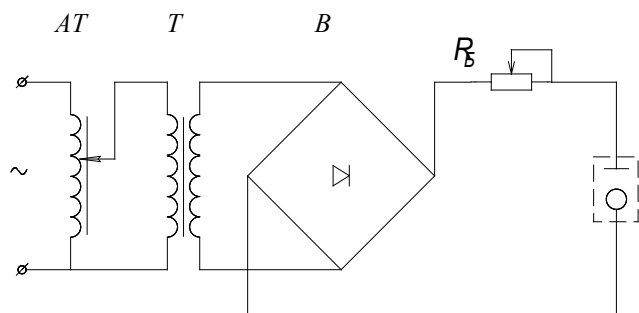
Рис. 5.3 Способи регулювання режиму тліючого розряду (пояснення в тексті)

A, B – робочі точки, що відповідають струмам розряду I_{p1} та I_{p2}

Перший із зазначених способів реалізований у джерелі (рис.7.2), в якому для створення крутопадаючої характеристики використовується баластний опір R_B в колі розряду [51]. Як показано в п.2.6, така схема джерела забезпечує стабільне горіння тліючого розряду у відсутності істотних збурень, викликаних, в першу чергу, порушенням технологічної дисципліни. Однак, в такій схемі значна частина потужності джерела (30 ... 60%) розсіюється на самому баластному опорі, що негативно позначається на енергетичних показниках процесу зварювання. Крім того, таке джерело не оказує протидії зміні форми розряду, тобто лавиноподібному наростанню струму в момент утворення дуги та її подальшій стабілізації на виробі.

Тим не менш, таке джерело живлення тліючого розряду в даний час широко використовується як в промислових, так і в експериментальних установках порівняно невеликої потужності (одиниці кіловат). Це пояснюється тим, що він

достатньо простий у виготовленні, володіє високою надійністю, має невисоку вартість і порівняно невелику масу (до 8 кг / кВт).



AT – автотрансформатор, T – підвищувачий трансформатор, B – випрямляч

Рис.5.4. Схема джерела з регульованим баластним реостатом R_B

Заміна у джерелі живлення активного баласту на індуктивно-ємнісний перетворювач (ІЄП) за резонансною схемою Бушєро [106] дозволила створити зовнішню характеристику, близьку до штикової, і завдяки цьому розширити діапазон стійкості тліючого розряду. Елементи ІЄП (рис.5.4) обираються за умови резонанса при заданій частоті напруги живлення:

$$\omega L = 1/\omega C \quad \text{або} \quad \omega^2 LC = 1$$

Чим менше величина активного опору індуктивностей фільтрів, або чим більша добротність котушок $Q = \omega L/R$, тим точніше джерело забезпечує підтримання заданого режиму при змінному розрядному опорі.

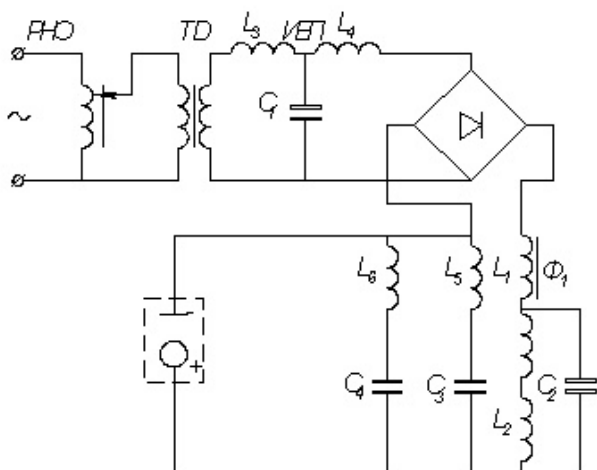


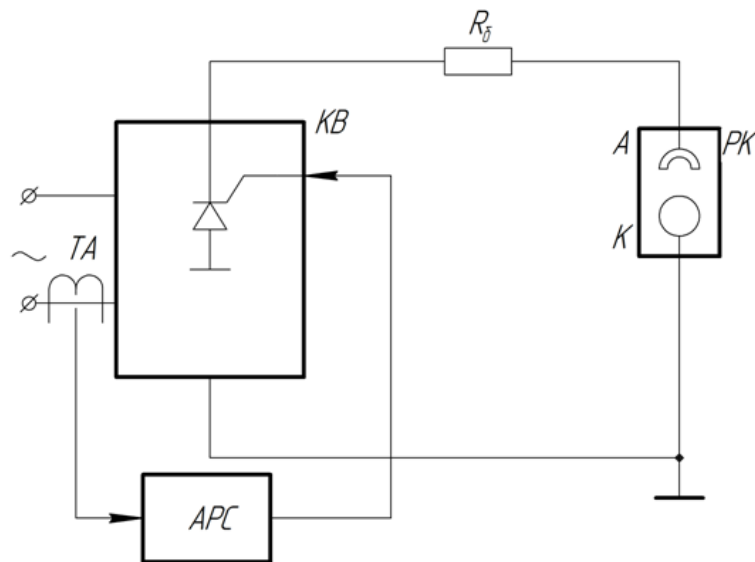
Рис.5.4. Схема джерела живлення тліючого розряду на основі індуктивно-ємнісного перетворювача

Втрати енергії в такому баласті помітно нижче і к.к.д. джерела зростає до 0,7 ... 0,8. Однак, такі джерела володіють значною масою (від 11 до 22 кг на 1 кВт в залежності від конструкції і потужності). Вони значно складніше і дорожче джерел з активним баластним опором, мають обмежений діапазон регулювання режиму і тому поширення не отримали. Застосування їх доцільне при масовому виробництві однотипної продукції.

В установках підвищеної потужності (5 ... 30 кВт) застосовують більш економічні джерела живлення на основі керованих тиристорних перетворювачів. Вони мають високе відношення корисної потужності до маси, при цьому втрати енергії в самому джерелі не перевищують 10% від його загальної потужності.

Особливістю джерел живлення з використанням тиристорів є те, що тиристори надійно працюють лише в колах змінного струму. Для використання їх в колах постійного струму, як це має місце при зварюванні та паянні, необхідно застосовувати складні схеми примусового вимикання тиристорів, що складаються з багатьох компонентів [49]. Тим не менш, плавне регулювання, широкий діапазон зміни режимів і можливість їх стабілізації, дають підставу вважати цей тип джерела кращим, ніж попередні [41]. Регулюючі тиристори можуть бути ввімкнені як у первинному, так і у вторинному високовольтному колі трансформатора, при цьому у разі регулювання з боку низької напруги в коло тліючого розряду для створення падаючої характеристики джерела і обмеження струму короткого замикання вмикають активний або індуктивний опір порівняно незначної величини (20 ... 30 Ом).

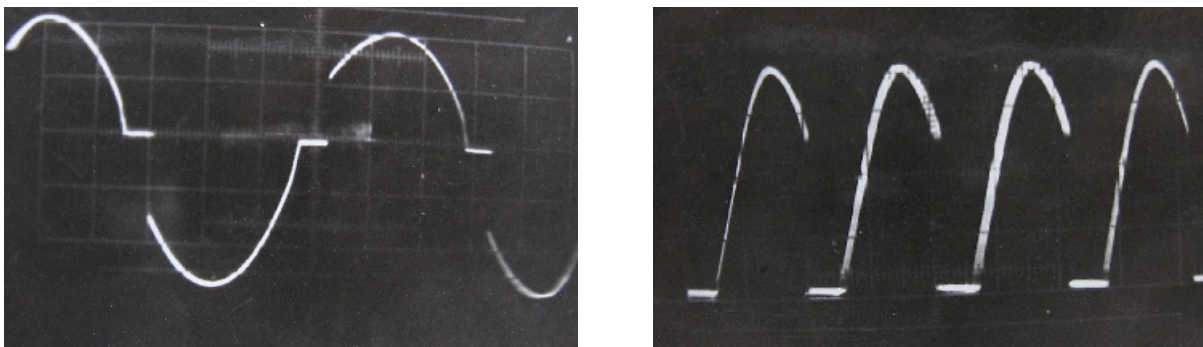
На рис. 5.5 наведена схема джерела живлення тліючого розряду на основі керованого тиристорного випрямляча. Для захисту самого джерела і зварюваних виробів від струмових перевантажень, що виникають при переході тліючого розряду в дуговий або при значних коливаннях напруги мережі, у схемі використаний зворотній зв'язок за струмом розряду, що забезпечує його стабілізацію на встановленому рівні.



ТА – трансформатор (датчик) струму; *KB* – керований тиристорний випрямляч;
APC – автоматичний регулятор струму; *PK* – розрядна камера

Рис.5.5. Схема джерела живлення тліючого розряду на основі керованого вентильного (тиристорного) перетворювача

Тим не менш, цим джерелам притаманний недолік, обумовлений особливостями управління тиристорами. Якщо в попередніх схемах джерел застосовується так зване амплітудне регулювання, коли управління струмом розряду здійснюється зміною його амплітудного значення, а тривалість його протікання за час напівперіоду залишається майже незмінною і займає переважну частину напівперіоду, то в тиристорних джерелах застосовується широтне (фазове) регулювання, пов'язане зі зміною кута відмикання тиристорів α (рис.5.6). При цьому на малих струмах розряду, тобто при великих значеннях кута α між сусідніми імпульсами струму з'являються значні за тривалістю проміжки, протягом яких тліючий розряд відсутній. У цей час відбувається охолодження зварюваних деталей, що знижує ефективність нагріву і збільшує його тривалість. З цієї причини тиристорні джерела при струмах розряду до 3 ... 4 А поступаються за ефективністю джерелам з активним струмообмежуючим опором і повною мірою виявляють свої позитивні якості при підвищених струмах, тобто при малих кутах відмикання α .



а)

б)

Рис. 5.6. Осцилограми падіння напруги на тиристорі, ввімкненому в коло змінного (а) та постійного (б) струму

Крім того, недоліком тиристорних джерел живлення з фазовим керуванням є дискретність їхньої роботи. З моменту відмикання тиристор стає некерованим до тих пір, поки напруга на ньому не впаде до нуля (рис.5.6). При потужних дугових розрядах навіть за досить малий період їх існування може відбутися пошкодження деталей. Тому, незважаючи на такі властивості тиристорних джерел живлення, як компактність, економічність і ефективність управління параметрами розряду вони потребують спільного застосування спеціальних пристроїв, що захищають вироби від випадкових електричних дуг.

На рис. 5.7 наведена принципова схема тиристорного джерела живлення тліючого розряду потужністю 10...20 кВт, який поряд із випрямленням та регулюванням зварювального струму забезпечує його стабілізацію на встановленому рівні в моменти переходу тліючого розряду в дуговий. Силова частина джерела складається з регулятора напруги РНО, підвищуючого трансформатора Tr_1 та несиметричного тиристорного випрямляча $D_1...D_4$. Керування роботою випрямляча здійснюється генератором пилоподібних імпульсів, побудованим на транзисторах T_1 та T_2 . Вихідні імпульси генератора через трансформатор

Тр₂, проміжні підсилюючі тиристри Д₅, Д₆ поступають на керуючі електроди силових тиристорів Д₃, Д₄. Кут відкриття силових тиристорів і сила зварювального струму регулюються змінним резистором R₁. Для захисту виробів від перевантажень, що виникають при переході тліючого розряду в дуговий або стрибках напруги мережі, застосовується опір зворотного зв'язку R₂, ввімкнений послідовно у коло розряду і сигнал з якого подається на вхід генератора.

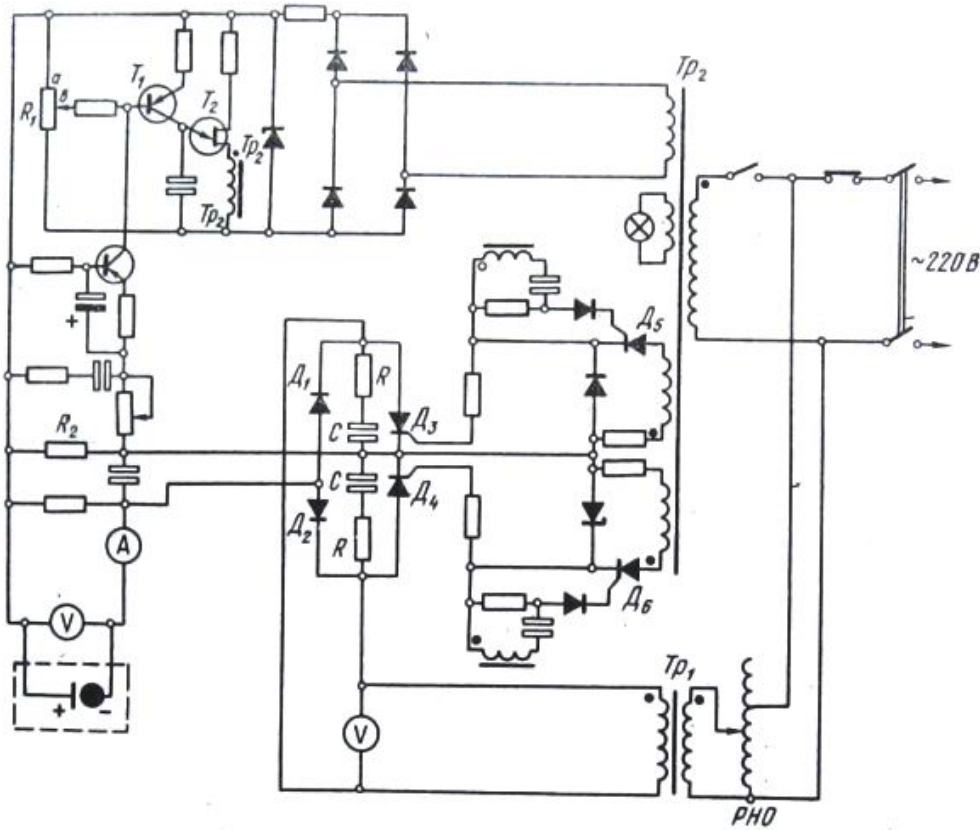


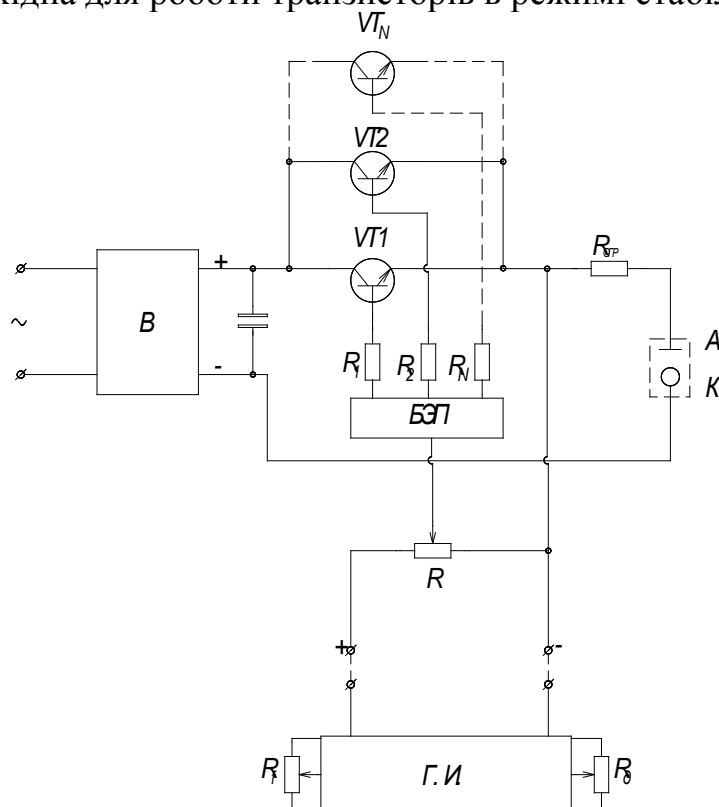
Рис. 5.7. Схема тиристорного джерела живлення тліючого розряду

З порівняння властивостей розглянутих джерел випливає, що оптимальним для тліючого розряду слід визнати джерело, побудоване на принципі амплітудного регулювання параметрів, що має круто падаючу зовнішню характеристику і відносно невеликі втрати на елементах схеми.

На рис. 5.8 наведена схема джерела живлення порівняно невисокої потужності - до 2 ... 3 кВт [30]. Це викликано тим, що в якості регулюючого елемента, замість баластного реостата, у схемі використовується транзистор, ввімкнений послідовно з блоком випрямлення в коло тліючого розряду. При напрузі на електродах розряду 600 ... 800 В джерело забезпечує струм розряду до 3...4 А, для чого в регулюючому вузлі застосовано паралельне з'єднання високовольтних транзисторів серії КТ - 838 (КТ-828). Застосування транзисторів забезпечує отримання зовнішніх характеристик джерела, що наближаються до вертикальних, чим полегшується стабілізація струмового режиму тліючого розряду без використання зворотних зв'язків та відповідних датчиків. Транзистор забезпечує амплітудне регулювання величини струму тліючого розряду без помітних перерв в його горінні, чим досягається висока ефективність нагріву. Джерело

має кращі мас - енергетичні характеристики в порівнянні з джерелом, наведеним на рис. 5.4 - приблизно 5 ... 6 кг / кВт, оскільки в ньому використовується тільки силовий підвищувачий трансформатор, без регулюючого автотрансформатора. Завдяки цьому застосування такого джерела найбільш ефективно в малогабаритних установках для зварювання та паяння.

Джерело може працювати як в безперервному, так і в імпульсному режимі, що необхідно для запобігання перегріву при зварюванні виробів із тонкостінними елементами. Для отримання імпульсного струму розряду в коло керування регулюючих транзисторів, тобто в їх базові кола, подається сигнал з виходу генератора прямокутних імпульсів. Регулювання потужності розряду в цьому випадку можна проводити не тільки зміною амплітуди керуючих імпульсів, але й регулюванням їх частоти в діапазоні 0,1 ... 100 Гц і шпаруватості в межах 1,5 ... 4. Це значно розширює можливості джерела, оскільки дозволяє здійснювати при підвищених тисках газу достатньо локальний, і в той же час, досить плавний нагрів виробу. Кількість паралельно з'єднаних силових транзисторів обирається за умови 5...7-ми кратного запасу за струмом, оскільки вони працюють при напругах на колекторі, що наближаються до їх граничних значень. Для запобігання перегрівання транзисторів у схему вводиться зворотній зв'язок, що підтримує на транзисторах мінімальну напругу колектор-емітер (3...5 В), яка необхідна для роботи транзисторів в режимі стабілізаторів струму.



B - випрямляч;

БЕП - блок розв'язуючих емітерних повторювачів;

Г. І. - генератор імпульсів;

R_f, R_d - регулятори частоти і шпаруватості імпульсів

Рис.5.8. Схема силової частини транзисторного джерела живлення тліючого розряду

У виробничій практиці можуть зустрічатися різні поєднання умов на катоді–виробі, здатні негативно впливати на стабільність горіння тліючого розряду, викликати його перехід в електричну дугу. Нагрівання з розподіленого стає концентрованим, що може призводити до оплавлення поверхні деталей. У зв'язку з цим, електричне коло, що живить тліючий розряд, повинно містити пристрої, що блокують виникаючу електричну дугу для захисту виробів і джерел живлення від струмових перевантажень. Для ефективного гасіння (розпаду) електричної дуги необхідно знизити густину струму в катодній плямі дуги до величини, нижче критичної, що можливо здійснити шляхом: 1) зменшення сили струму; 2) шунтування дуги колом із більш високою провідністю; 3) руйнування катодних плям дуги; 4) зменшення напруги на електродах до рівня, нижче критичного для існування дуги.

Вимоги до пристроїв для гасіння дуг полягають в тому, що: 1) дуга повинна гаситися настільки швидко, щоб її вплив на деталі був мінімальним, а тліючий розряд повинен так само швидко виникати після гасіння дуги, 2) перевантаження джерел живлення повинне бути мінімальним і вони повинні короткочасно протистояти дуговим струмам. Останнє буде залежати від часу спрацьовування захисної апаратури, що реагує на виникаючі перевантаження.

Принципово таким пристроєм може бути будь-який пристрій, що впливає на струм розряду або напругу джерела живлення. Пристрої, що встановлюються у схемі електроживлення розряду, повинні реагувати на зміну струму або напруги і впливати на них таким чином, щоб привести їх до значень, що відповідають області існування тліючого розряду. З цією метою можуть бути використані і регулятори інших параметрів процесу - тиску газу, температури нагріву і т.д., які також пов'язані зі стійкістю розряду. Однак, регулювання за струмом або напругою простіше реалізується, а пристрої, що здійснюють регулювання, менш інерційні і більш прості в експлуатації. Швидкодія є основною вимогою, що пред'являється до дугогасних пристроїв. Реєстрація зміни виду розряду і спрацьовування пристроїв повинні бути настільки короткочасними, щоб не встигла відбутися стабілізація дугового розряду. Цей час становить $10^{-6} \dots 10^{-4}$ с [178]. При зварюванні досить масивних деталей з урахуванням їх теплової інерції цей час може бути збільшено до $10^{-2} \dots 10^{-1}$ с.

Розроблені до теперішнього часу дугогасні пристрої попереджають стабілізацію дуги на виробі за рахунок:

- стабілізації струму розряду на незмінному рівні;
- відключення напруги живлення розряду,
- шунтування розрядного проміжку ланцюгом більш високої провідності.

До першої групи можна віднести пристрої (рис.5.9), зібрані на основі R - C та R - L - C фільтрів [106], що обмежують швидкість наростання струму дуги, яка утворюється, за рахунок своєї інерційності. До цієї ж групи належать описані вище тиристорні джерела живлення, які мають зворотні зв'язки за струмом розряду і, завдяки цьому, можуть забезпечувати його стабілізацію з певною точністю.

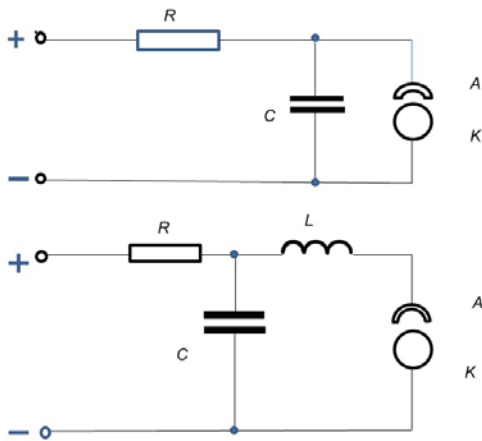


Рис.5.9. Схеми R–C (а) та R–L–C (б) фільтрів у колі тліючого розряду

Застосування пристроїв цієї групи для цілей дугогасіння ефективно при порівняно невеликих струмах тліючого розряду (до 4 ... 5 А) в силу фізичної нестійкості малоамперної дуги. Формування електричної дуги в потужнострумівому тліючому розряді може завершитися її стабілізацією на виробі і без помітного зростання струму в розрядному проміжку завдяки достатньо високій густині струму в катодній плямі дугового розряду, що утворюється на поверхні виробу.

До другої та третьої груп відносяться перемикаючі пристрої, що забезпечують або шунтування розрядного проміжку, або відключення джерела живлення [14, 137]. Може здійснюватися як відключення розрядного проміжку від джерела живлення, так і зміна полярності електродів при переході розряду в дугу [136, 138]. Ця група пристроїв при застосуванні сучасних електронних приладів може забезпечити необхідну швидкість відключення електричної дуги, але їх спрацьовування призводить до деіонізації міжелектродного проміжку, що вимагає застосування додаткових високовольтних джерел для наступного запалювання тліючого розряду в умовах достатньо високих робочих тисків газу в робочій камері.

Необхідність усунення вказаного недоліку призвела до розробки пристроїв стабілізації горіння тліючого розряду релейно-тиристорного та тиристорно-напівпровідникового типів, що забезпечують зниження струму в розрядному проміжку при формуванні дуги не до нуля, а до деякої кінцевої величини, при якій подальший розвиток та існування дугового розряду стають неможливими. Пристрої забезпечують ступінчасте управління струмом розряду, при цьому кожна ступінь вмикається в коло розряду відповідним тиристором. При появі дугового розряду, що супроводжується зростанням струму, пристрої покроково знижують струм в колі до тих пір, поки не зникнуть ознаки дугового розряду. Основною ознакою формування дугового розряду в міжелектродному проміжку, як впливає з осцилограм (рис. 2.7), доцільно приймати не зміну абсолютної величини струму, як у відомих пристроях, а істотну зміну швидкості його наростання при переході від однієї форми розряду до іншої. Поява в тліючому розряді каналу електричної дуги супроводжується зниженням тривалості переднього фронту імпульсу струму i , отже, помітним збільшенням швидкості його зростання – до $dI/dt=10^5 \dots 10^6$ А/с, що на порядки перевищує цю величину для

пульсуючого випрямленого струму тліючого розряду (приблизно 10^3 А/с для струмів розряду 5...10 А). Для реагування на ці зміни швидкості зростання струму в розроблених пристроях використовується диференціальний трансформаторний датчик, первинна обмотка якого ввімкнена в розрядне коло, а з вторинної обмотки знімається е.р.с., пропорційна швидкості зміни струму у часі. Це дозволяє робити налаштування або зміну режиму зварювання без випадкового спрацьовування пристрою.

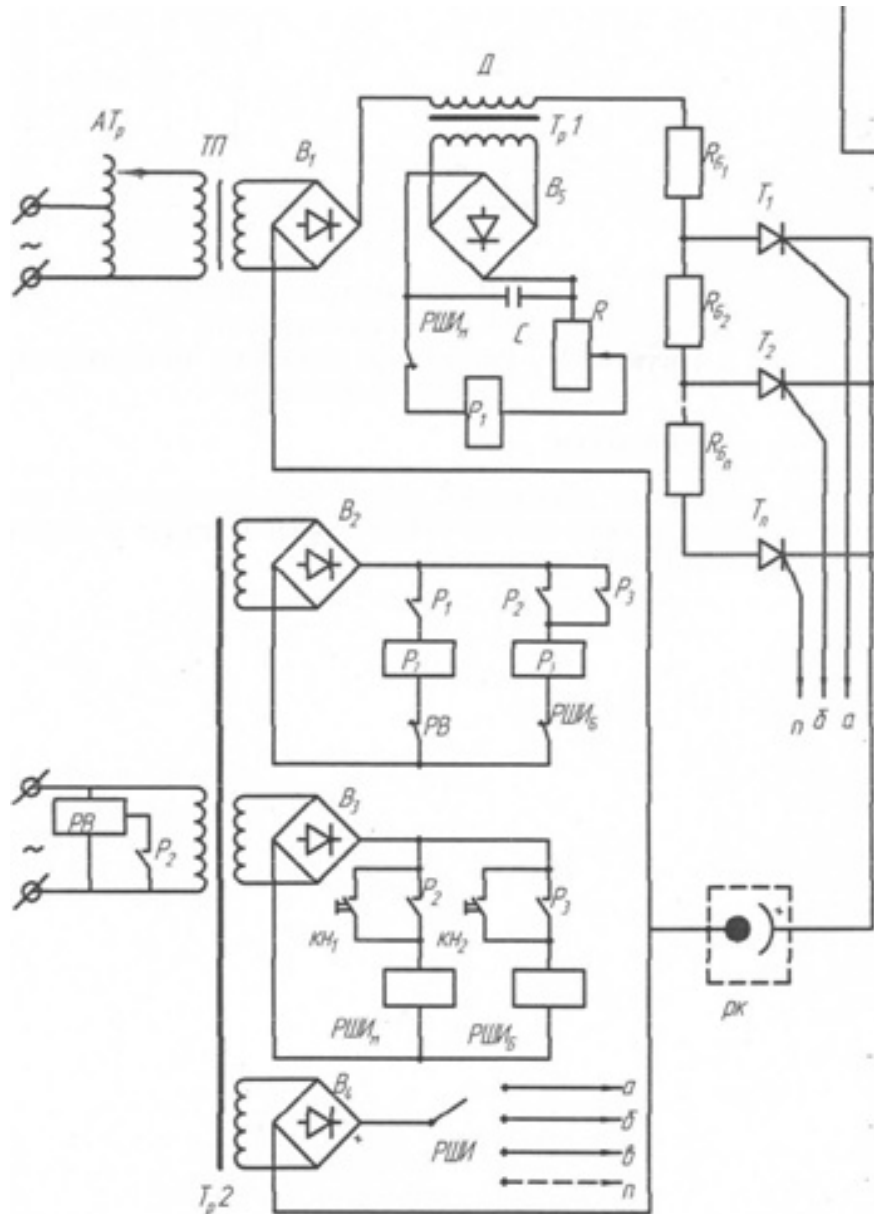


Рис. 5.10. Схема стабілізуючого пристрою релейного типу

Сигнал з виходу датчика в релейній схемі керує реверсивним кроковим шукачем, який послідовно вмикає в коло відповідні силові тиристори (рис. 5.10). У напівпровідниковій схемі пристрою для цієї мети використовується лінійка транзисторних або мікросхемних тригерів, що мають різну чутливість спрацьовування. Після усунення дугового розряду пристрої так само покроково

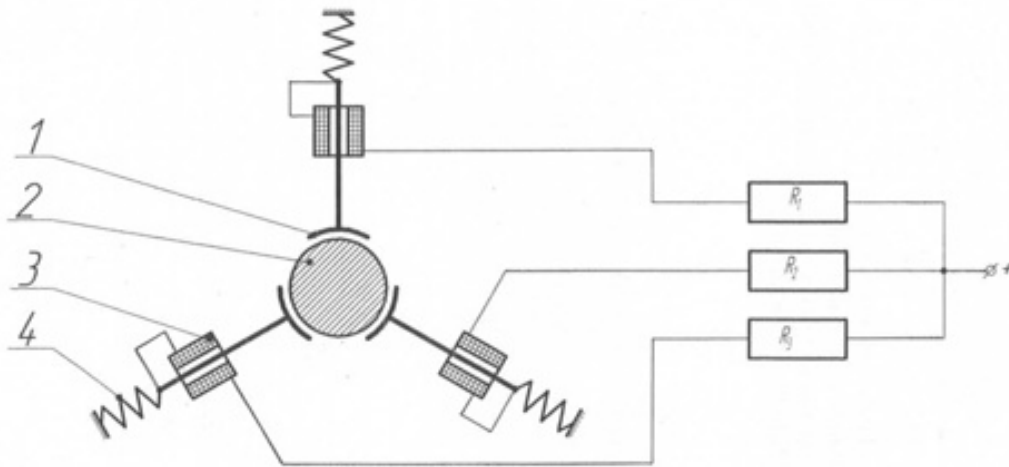
автоматично повертають параметри електричного кола до початкового режиму горіння тліючого розряду. Процес нагріву при цьому не уривається.

Пристрої мають ознаки самоналагоджувальних систем, оскільки не лише визначають нижній поріг струму, при якому подальший розвиток дугового розряду припиняється, але і так само автоматично визначають і встановлюють максимально допустимий за умовами нагріву (рід і тиск газу, міжелектродна відстань, матеріал і температура катода та ін.) струм тліючого розряду, що стійко горить. Швидкодія пристроїв, що визначається часом спрацьовування першого ступеня зниження струму складає для релейної схеми близько 0,1 с, для напівпровідникової – порядку 0,01 с.

Пристрої виконані у вигляді окремих блоків і можуть бути змонтовані у будь-якій діючій установці, незалежно від її потужності, характеру виробництва і типу виробів.

Вище, у п. 2.6 було показано, що ефективним засобом запобігання утворення електричної дуги і зниження міри її дії на виріб являється секціонування анодного вузла тліючого розряду. Проте, при застосуванні потужного тліючого розряду цей спосіб призводить до ускладнення електродного вузла, збільшенню часу на його переналагодження при зміні типорозміру зварюваних деталей.

В той же час відомо, що струм дуги суттєво залежить від її довжини. Це явище було покладене в основу модернізації багатоелектродної системи нагріву з метою спрощення її конструкції і підвищення ефективності дугогасіння. Для цього кожна секція анода забезпечується електромагнітом, феромагнітним осердям якого служить рухомий сталевий стержень анодотримача (рис. 5.11).



- 1– анод із рухомим анодотримачем
- 2– катод (деталь)
- 3– електромагніт
- 4– зворотна пружина

Рис. 5.11. Схема системи стабілізації тліючого розряду із рухомими анодними секціями

Через обмотку електромагніту, анодотримач і анод замикається ланцюг розряду, тому положення анодотримача усередині котушки електромагніту визначатиметься величиною струму через неї. При включенні такого електродного вузла в ланцюг живлення розряду переміщення анодотримача внаслідок втягування його в обмотку електромагніту при випадковому збільшенні струму призводитиме до зростання протяжності міжелектродного проміжку із одночасним збільшенням його опору, що забезпечує стабілізацію струму в колі. Тобто, в даному випадку реалізується автоматичне регулювання за відхиленням струму розряду, а електромагніт є одночасно датчиком відхилення і регулятором струму в цій системі. При стрибкоподібному зростанні струму у момент утворення дуги спостерігатиметься перерегулювання, коли досить масивний анодотримач разом із анодом при русі з прискоренням під дією зростаючого магнітного поля забезпечить значну довжину міжелектродного проміжку, внаслідок чого струм в ланцюзі зменшуватиметься аж до обриву дуги. Після згасання дуги і зниження струму в обмотці електромагніту анод повертається в початкове положення під дією поворотної пружини. Таким чином, здійснюється ефективне коригування енергетичних параметрів нагріву на окремій ділянці поверхні деталей, де виникло збурення, за незмінних умов нагріву на іншій поверхні. Така схема дугогасіння дозволяє скоротити кількість секцій анода з одночасним збільшенням розрядного струму через них у 2...3 рази.

ПІСЛЯМОВА

Застосування тліючого розряду в дифузійному зварюванні, початок якому було покладено ще в 1962 році дослідженнями В.С. Ваніна і продовжене роботами Д. І. Котельникова та ряду інших дослідників, призвело до того, що це джерело нагріву досить швидко зайняло гідне, а в ряді випадків, переважаюче становище серед інших джерел енергії для дифузійного з'єднання. Це пов'язано з відносною простотою і невисокою вартістю обладнання, широким діапазоном регулювання параметрів режиму розряду, універсальними технологічними можливостями.

Однак, подальший розвиток і промислове застосування цього джерела енергії для технологічних процесів обмежувалося недостатністю експериментальних і розрахункових даних про технологічні та енергетичні властивості тліючого розряду, недостатньо розвинутими уявленнями про механізм нагріву тліючим розрядом середніх тисків і способах управління його енергетичними характеристиками, недостатньою густиною енергії в розрядній плазмі і, відповідно, низькою продуктивністю іонного нагріву. Рішенню останньої проблеми, в свою чергу, перешкоджала незавершеність робіт з виявлення причин переходу тліючого розряду в дуговий та забезпечення стабільного існування тліючого розряду в умовах підвищених струмів і питомих потужностей розряду, відсутність надійних методів вибору і контролю основних технологічних параметрів процесу, що визначають якість з'єднання, відсутність ефективних методів управління нагрівом тліючим розрядом.

Така ситуація призводила тривалий час до того, що в реальному виробництві в управлінні процесами зварювання і паяння в тліючому розряді значну роль відігравав людський фактор, пов'язаний, в першу чергу, з суб'єктивністю прийняття і виконання рішень в умовах багатофакторного технологічного процесу, що вимагало високої кваліфікації та досвіду оператора.

Автор сподівається, що видання цієї книги в помітній, хоча й далеко не повній мірі, розкриваючи і визначаючи шляхи вирішення зазначених проблем дозволить науково-технічним працівникам підприємств і науково-дослідних організацій більш широко і ефективно здійснювати розробки, пов'язані із застосуванням іонного нагрівання в умовах дифузійного зварювання та інших технологічних процесів високотемпературної фізико-технічної обробки матеріалів.

Перспективність застосування тліючого розряду, як джерела тепла прямої дії, визначається широким діапазоном його технологічних параметрів,

економічністю, простотою і компактністю устаткування, можливістю повної автоматизації процесу. У той же час, на думку автора необхідність подальших розробок викликана відсутністю універсального обладнання, що випускається промисловістю, доцільністю вдосконалення процесів зварювання і паяння, створення принципово нових зварних конструкцій з різномірних матеріалів.

Досвід застосування тліючого розряду показує [41], що подальші розробки найбільш перспективні в наступних напрямках:

1. Розробка обладнання для комплексних технологічних процесів, коли тліючим розрядом здійснюються підготовчі, основні та завершальні операції.

2. Розробка технологій та обладнання для зварювання або паяння складних конструкцій, які мають вільні внутрішні порожнини або великі зі складним рельєфом поверхні, а також складних за конструкцією паяних з'єднань.

3. Розробка АСУ процесом дифузійного зварювання або паяння в тліючому розряді на базі мікропроцесорної техніки з використанням математичних моделей для формування оптимальних алгоритмів керування.

4. Дослідження приелектродних зон і процесів, що протікають на поверхні електродів, для виявлення нових закономірностей і технологічних можливостей нагрівання і обробки плазмою тліючого розряду, визначення способів підвищення стабільності тліючого розряду середніх тисків.

Вирішення зазначених проблем забезпечить підвищення наступних якостей дифузійного зварювання і паяння при нагріванні плазмою тліючого розряду:

1) надійність, простоту, ефективність та доступність для їх широкого використання в різних галузях промисловості;

2) розширення технологічних можливостей дифузійного методу з'єднання різномірних матеріалів;

3) розширення сфери застосування зварювальних процесів для потреб народного господарства, зокрема для таких галузей як: інструментальна, електротехнічна, машино- і приладобудівна, при зварюванні виробів з різномірних матеріалів в поодинокому, серійному та масовому виробництві.

Список літератури

1. **Абильситов, Г. А.** Мощные газоразрядные CO₂ лазеры и их применение в технологии / Г. А. Абильситов, Е. П. Велихов, В. С. Голубев. – М.: Наука, 1984. – 105 с.
2. **Адамсон, А. В.** Физическая химия поверхностей / А. В. Адамсон. – М. : Мир, 1979. – 568 с.
3. **Акишин, А. И.** Ионная бомбардировка в вакууме / А. И. Акишин. – М. : Госэнергоиздат, 1963. – 288 с.
4. **Актон, Д.** Газоразрядные лампы с холодным катодом / Д. Актон, Д. Свифт. – М. : Энергия, 1965. – 479 с.
5. **Арзамасов, Б. Н.** Материаловедение / Б. Н. Арзамасов, И. И. Сидорин, Г. Ф. Косолапов [и др.] – М.: Машиностроение, 1986. – 383 с.
6. **А.с. 403516** СССР, кл. В 23К 1/12. Способ пайки слоистых конструкций / В. Ф. Хорунов (СССР). – Заявл. 19.05.71; опубл. 1973; Бюл. №43.
7. **А.с 487725** СССР, кл. В 23К 1/12. Способ пайки изделий / В. А. Кривега, Л. Г. Купцов (СССР). – Заявл. 10.07.73; опубл. 1975; Бюл. №38.
8. **А.с. 525257**, СССР, кл. Н 05В 7/16. Устройство для стабилизации сильноточного тлеющего разряда / В. И. Блинов, В. В. Кириченко, Н. Е. Сизова, В. Е. Денисов (СССР). – Заявл. 26.06.74; опубл. 1976; Бюл. №30.
9. **А.с. №528709**, СССР, кл. Н 05В 7/16. Устройство для стабилизации сильноточного тлеющего разряда / В. И. Блинов, В. В. Кириченко, Н. Е. Сизова, В.Е. Денисов. – Заявл. 26.06.74; опубл. 1976; Бюл. №34.
10. **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.
11. **А.с. 935221**, СССР, кл. В 23К 20/14. Способ получения неразъемного соединения / Д. И. Котельников, А. А. Михеев, Г. П. Болотов, В. В. Машков, А. П. Болотный (СССР). – Заявл. 05.12.79; опубл. 1982; Бюл.№22.
12. **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.
13. **Бабад – Захряпин, А. А.** Радиационно – стимулируемая химико – термическая обработка / А. А. Бабад-Захряпин, Г. Д. Кузнецов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 94 с.
14. **Бабад – Захряпин А.А.** Химико – термическая обработка в тлеющем разряде /А.А. Бабад-Захряпин, Г. Д. Кузнецов. – М. : Атомиздат, 1975. – 176 с.
15. **Бачин, В. А.** Теория, технология и оборудование диффузионной сварки / В. А. Бачин, В. Ф. Квасницкий, Д. И. Котельников. – М. : Высшая школа, 1991. – 349 с.
16. **Беккерт, М.** Справочник по металлографическому травлению / М. Беккерт, Х. Клемм. – М. : Металлургия, 1979. – 335 с.
17. **Белоусов, Ю. В.** Оценка сосредоточенности поверхностного источника теплоты с нормальным распределением тепловой мощности / Ю. В. Белоусов // Сварочное производство. – 2002. – №8. – С. 8-12.
18. **Беляев, Н. М.** Методы нестационарной теплопроводности / Н. М. Беляев, А. А. Рядно. – М. : Высшая школа, 1978. – 328 с.
19. **Бериш, Р.** Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Физическое распыление одноэлементных твердых тел / Р. Бериш // Проблемы прикладной физики. – 1984. – Вып. II. – 484 с.
20. **Болотов, Г. П.** Определение параметров внешней электрической цепи сильноточного тлеющего разряда в условиях сварки и пайки / Г. П. Болотов, В. А. Пахаренко // Вестник НТУУ “Киев. политехн. ин – т”. Сер. "Машиностроение". – 2007. – №49. – С. 207-213.
21. **Болотов, Г. П.** Установка для диффузионной сварки в тлеющем разряде / Г. П. Болотов // Информ. листок. – Чернигов: МТЦНТИ, 1992. – №2 – 92. – 4 с.
22. **Болотов, Г. П.** Очистка тлеющим разрядом металлических поверхностей перед диффузионной сваркой и пайкой в вакууме / Г. П. Болотов, М. Г. Болотов, Р. Н. Рыжов // Вестник НТУУ "КПИ". Сер. "Машиностроение". – 2009. – №57. – С. 124-127.

23. **Болотов, Г. П.** Особенности нагрева изделий ограниченных размеров при диффузионной сварке в тлеющем разряде / Г. П. Болотов // Автоматическая сварка. – 2000. – №5. – С. 18 - 20.
24. **Болотов, Г. П.** Тлеющий разряд как источник нагрева в процессах сварки и пайки (обзор) / Г. П. Болотов // Автоматическая сварка. – 2001. – №8. – С.41 - 44.
25. **Болотов, Г. П.** Применение тлеющего разряда для пайки выводов резисторов / Г. П. Болотов // Автоматическая сварка. – 1991. – №9. – С. 72 - 73.
26. **Болотов, Г. П.** Стабилизация тлеющего разряда в технологических процессах / Г. П. Болотов // Деп. в ГНТБ Украины. – №598 – Ук94, 1994. – 9 с.
27. **Болотов, Г. П.** Экспериментальное исследование влияния условий сварки на стабильность тлеющего разряда / Г. П. Болотов // Деп. в ГНТБ Украины. – №606. – Ук94, 1994. – 8 с.
28. **Болотов, Г. П.** Опыт применения тлеющего разряда при сварке и пайке / Г. П. Болотов. – Чернигов : ВСНТО, 1981. – 34 с.
29. **Болотов, Г. П.** Совершенствование методов стабилизации сильноточного тлеющего разряда, используемого в процессах сварки и пайки / Г. П. Болотов, В. Я. Гребениченко // Прогресивна техніка і технологія машинобудування і зварювального виробництва. – К. : НТУУ “КПІ”, 1998. – Т. 4. – С. 303 - 306.
30. **Болотов, Г. П.** Источники питания тлеющего разряда при сварке и пайке / Г. П. Болотов, Д. И. Котельников // Деп. в ГНТБ Украины. – №596 – Ук 94, 1994. – 9 с.
31. **Болотов, Г. П.** Способ пайки в тлеющем разряде изделий со сквозными каналами / Г. П. Болотов, Д. И. Котельников // Информ. листок. – Чернигов: МТЦНТИ, 1991. – №69 – 91. – 3 с.
32. **Болотов, Г. П.** Активацийна дія тліючого розряду в умовах дифузійного зварювання / Г. П. Болотов, М. Г. Болотов, Р. М. Рижов // Вісник Донбаської держ. машинобудівної академії. – 2011. – №1(22). – С.18-21.
33. **Болотов, Г. П.** Применение плазмы тлеющего разряда для пайки изделий со сквозными каналами / Г. П. Болотов, С. Е. Кислинский //Автоматическая сварка. – 1997. – №12. – С. 14-17.
34. **Болотов, Г. П.** Математическое моделирование теплового состояния зоны соединения разнородных металлов при диффузионной сварке в тлеющем разряде / Г. П. Болотов, Д. И. Котельников, А. Ф. Роговой // Автомат. сварка. – 2000. – №2. – С. 23 - 26.
35. **Болотов, Г. П.** Повышение устойчивости тлеющего разряда в условиях сварки / Г. П. Болотов, А. И. Сатюков // Автоматическая сварка. – 1998. – №1. – С.18 - 20.
36. **Болотов, Г. П.** Баланс энергии на катоде тлеющего разряда / Г. П. Болотов, А. И. Сатюков // Автоматическая сварка. – 1998. – №3. – С. 10 - 12.
37. **Болотов, Г. П.** Расчетная оценка границы устойчивости тлеющего разряда при диффузионной сварке / Г. П. Болотов, А. И. Сатюков // Автоматическая сварка. – 1998. – №4. – С.13 - 15.
38. **Болотов, Г. П.** Управление процессами массопереноса при диффузионной сварке трудносвариваемых металлов / Г. П. Болотов // Збірник наукових праць Національного ун-ту кораблебудування. – 2007. – №2(413). – С. 57-64.
39. **Болотов, Г. П.** Диффузионная сварка узлов колебательных систем технологических ультразвуковых установок / Г. П. Болотов, Р. Н. Рыжов // Збірник наукових праць Національного ун-ту кораблебудування. – 2008. – №6(423). – С. 65-68.
40. **Болотов, Г. П.** Нагрів масивних заготівель при зварюванні в тліючому розряді / Г. П. Болотов // Вісник Черніг. держ. технол. ун-ту. – 2002. – №18. – С. 68-73.
41. **Болотов, Г. П.** Змочування металевих поверхонь припоями при нагріванні і паянні в тліючому розряді / Г. П. Болотов // Вісник Чернігів. держ. технол. ун-ту. – 2005. – №22. – С. 94-100.
42. **Болотов, Г. П.** Влияние состояния поверхности электродов на устойчивость тлеющего разряда при сварке / Г. П. Болотов // Автоматическая сварка. – 2007. – №6. – С. 46-48.

43. **Большова, А. М.** Использование энергии тлеющего разряда в качестве источника тепла для пайки / А. М. Большова [и др.] // Пайка в машиностроении. – М. : МАТИ, 1974. – С. 136 - 138.
44. **Браун, С.** Элементарные процессы в плазме газового разряда / С. Браун. – М. : Атомиздат, 1961. – 382 с.
45. **Бутаков, Г. А.** Моделирование и управление процессами дуговой сварки: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. / Г. А. Бутаков. – Киев : КПИ, 1984. – 16 с.
46. **Бутенко, О. И.** Использование тлеющего разряда для химико - термической обработки / О. И. Бутенко, Ю. Н. Крымский, Ю. М. Лахтин // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1967. – №3. – С. 7.
47. **Бутенко, О. И.** Ионное азотирование / О. И. Бутенко // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1965. – №10. – С. 57.
48. **Быховский, А. И.** Растекание / А. И. Быховский. – К. : Наукова думка, 1983. – 190 с.
49. **Бэдэрэу, Е.** Некоторые вопросы, связанные с явлениями на катоде тлеющего разряда / Е. Бэдэрэу, Н. Попеску // Бюлл. науч. техн. информ. АН РНР. Серия мат. физ., хим. и техн. наук. – 1961. – №1.
50. **Вакуумные дуги** / под ред. Лафферти Дж. – М. : Мир, 1982. – 426 с.
51. **Ванин, В. С.** Сварка и пайка металлов в тлеющем разряде / В. С. Ванин // Автоматическая сварка. – 1962. – №4. – С. 23 – 25.
52. **Ванин, В. С.** Наплавка в тлеющем разряде / В. С. Ванин // Автоматическая сварка. – 1975. – №6. – С. 75-76.
53. **Веденов, А. А.** Физика электроразрядных CO₂ – лазеров / А. А. Веденов. – М. : Энергоиздат, 1982. – 318 с.
54. **Габович, М. Д.** Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей / М. Д. Габович, Н.В. Плешивцев, Н. Н. Семашко. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 249 с.
55. **Газовые лазеры** / под ред. Р. И. Солоухина. – Новосибирск – Москва : СО, Наука. 1947. – 360 с.
56. **Гайсин, Ф. М.** Электрофизические процессы в разрядах с твердыми и жидкими электродами / Ф. М. Гайсин, Э. Е. Сон. – Свердловск : УрПИ, 1989. – 431 с.
57. **Гальчинский, Ф. К.** Получение биметаллических анодов с хромовым зеркалом / Ф. К. Гальчинский, Н. В. Королева // Заводская лаборатория. – 1973. – №1. – С.52.
58. **Гельман, А. С.** Основы сварки давлением / А. С. Гельман. – М. : Машиностроение, 1970. – 376 с.
59. **Генгринович, В. А.** Влияние параметров тлеющего разряда на эффективность бомбардировки и очистки поверхностей / В. А. Генгринович, В. В. Лячинсков, И. Л. Ройх // Физика и химия обработки материалов. – 1968. – №5. – С. 28 - 30.
60. **Герцрикен, Д. С.** Массоперенос в металлах при низких температурах в условиях внешних воздействий / Д. С. Герцрикен, В. Ф. Мазанко, В. М. Тышкевич, В. М. Фальченко. – К. : РИО ИМФ, 1999. – 435 с.
61. **Герцрикен, Д. С.** Исследования миграции атомов поверхностных слоев металлов, стимулированной ионной бомбардировкой / Д. С. Герцрикен, В. М. Тышкевич, В. М. Черников // Вестник Черк. ун – та. – 1999. – Вып. 9. – С. 5 – 15.
62. **Голубовский, Ю. Б.** О роли VV и VT – процессов в механизме нагревания газа в положительном столбе разряда в азоте / Ю. Б. Голубовский, А. В. Флорко // Теплофизика высоких температур. – 1980. – Т. 18, №4. – С. 870 – 873.
63. **Голубовский, Ю. Б.** Атомные температуры в положительном столбе разряда при средних давлениях в инертных газах / Ю. Б. Голубовский, Ю. М. Каган, В. Н. Ржевский // Оптика и спектроскопия. – 1976. – Т. 41, Вып. 3. – С. 385 – 389.
64. **Гордиец, Б. В.** Кинетические процессы в газах / Б. В. Гордиец, А. И. Осипов, Л. А. Шелепин. – М. : Наука, 1980. – 126 с.

65. **Готра, З. Ю.** Технология микрoeлектронных устройств / З. Ю. Готра. – М. : Радио и связь, 1991. – 528 с.
66. **Градштейн, И. С.** Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. – М. : Физматгиз, 1963. – 1094 с.
67. **Грановский, В. Л.** Электрический ток в газе. Установившийся ток / В. Л. Грановский. – М. : Наука, 1971. – 543 с.
68. **Гриншпун, С. И.** К вопросу об оптимальных параметрах тлеющего разряда, применительно для очистки поверхностей, металлизированных в вакууме / С. И. Гриншпун. – Рига : ЛатИНТИ, 1966. – 98 с.
69. **Данилин, Б. С.** Ионное травление микроструктур / Б. С. Данилин, В. Ю. Киреев. – М. : Советское радио, 1979. – 218 с.
70. **Денбновецкий, С. В.** Физические основы генерации плазмы в ионно – плазменных устройствах технологического назначения / С. В. Денбновецкий, В. Т. Барченко, Л. Н. Шмырева. – К. : УМК ВО, 1989. – 151 с.
71. **Деревянко, И. А.** Установка для пайки узлов ЭВП в тлеющем разряде / И. А. Деревянко, Н. С. Кузьминов // Электронная промышленность. – 1974. – №12. – С. 67 – 70.
72. **Диффузионная** сварка материалов : Справочник / под ред. Н. Ф. Казакова. – М. : Машиностроение, 1981. – 271 с.
73. **Диффузионное** соединение в вакууме металлов, сплавов и неметаллических материалов / Сб. научн. трудов V научно-техн. конф. / под ред. Н. Ф. Казакова. – М. : МТИММП, 1970. – 363 с.
74. **Диффузия** в металлах и сплавах : Справочник / под ред. Л. Н. Ларичева, В. И. Исайчева. – К. : Наукова думка, 1987. – 510 с.
75. **Довбищук, М. Н.** Исследования, разработка процессов диффузионного соединения твердых сплавов со сталями с применением нагрева в тлеющем разряде: автореферат дисс... канд. техн. наук / М. Н. Довбищук. – К. : КПИ, 1972. – 16 с.
76. **Дятлов, В. И.** Диффузионная сварка в тлеющем разряде / В. И. Дятлов [и др.] – Л. : ЛДНТП, 1968. – 26 с.
77. **Дятлов, В. И.** Технология сварки в тлеющем разряде / В. И. Дятлов // Диффузионное соединение в вакууме металлов, сплавов и неметаллических материалов. – М. : ПНИЛДСВ, 1970. – С.89 – 91.
78. **Елецкий, А. В.** Неустойчивости в плазме газового разряда / А. В. Елецкий, А. Т. Рахимов // Химия плазмы. – 1974. – Вып. 4. – С. 123.
79. **Жилов, Е. А.** Установка для диффузионной сварки в тлеющем разряде при изготовлении штампов, армированных твердым сплавом / Е. А. Жилов // Информ. листок №73 – 0465. – М. : ВИМИ. – 1976. – С. 2 – 4.
80. **Журбенко, В. Г.** Тепловые процессы на электродах и инициирование вакуумного пробоя / В. Г. Журбенко, В. А. Невровский // Ж.Т.Ф. – 1980. – Т. 50, №12. – С. 2540 – 2545.
81. **Зиновьева В.Ф.** Пайка в тлеющем разряде разнородных материалов и твердых сплавов /В.Ф. Зиновьева, С.М. Гальцева, С.В. Емельянова, В.А. Гилев// Автоматическая сварка. – 1990. –№11. – С. 71 – 73.
82. **Зиновьева, В. Ф.** Высокотемпературная пайка изделий из нержавеющей стали с использованием тлеющего разряда / В. Ф. Зиновьева, С. М. Гальцева, В. А. Гилев // Автоматическая сварка. – 1990. –№6. – С. 60 - 63.
83. **Зуев, И. В.** Об измерении диаметра электронного луча методом вращающегося зонда / И. В. Зуев, А. А. Углов // Физика и химия обработки материалов. – 1967. – №5. – С. 68 – 72.
84. **Ивановский, Г. Ф.** Ионно – плазменная обработка материалов / Г. Ф. Ивановский, В. И. Петров. – М. : Радио и связь, 1986. – 322 с.

85. **Игошин, А. П.** Моделирование сварочных процессов с помощью вычислительных устройств / А. П. Игошин, В. И. Сивцов // Известия вузов. Сер. Электромеханика. – 1967. – №2. – С. 123 – 130.
86. **Каганов, И.Л.** Ионные приборы / И. Л. Каганов. – Энергия, 1972. – 525 с.
87. **Казаков, Н. Ф.** Диффузионная сварка материалов / Н. Ф. Казаков. – М. : Машиностроение, 1976. – 311 с.
88. **Казаков, Н. Ф.** Оборудование диффузионной сварки / Н. Ф. Казаков, В. В. Жуков. – М. : ПНИЛДСВ, 1973. – 236 с.
89. **Каракозов, Э. С.** Соединение металлов в твердой фазе / Э. С. Каракозов. – М. : Metallurgy, 1976. – 263 с.
90. **Карташов, Э. М.** Аналитические методы в теплопроводности твердых тел / Э. М. Карташов. – М. : Высшая школа, 1979. – 414 с.
91. **Кархин, В. А.** Моделирование тепловых процессов при лазерной сварке алюминиевых пластин / В. А. Кархин, В. В. Плошихин // Автомат. сварка. – 2002. – №8. – С. 11-15.
92. **Квасницкий, В. Ф.** Технология диффузионной сварки жаропрочных сплавов / В. Ф. Квасницкий, Б. А. Кох, А. И. Сазонов. – Л. : ЛДНТП, 1969. – 26 с.
93. **Кесаев, И. Г.** Катодные процессы электрической дуги / И. Г. Кесаев. – М. : Наука, 1968. – 246 с.
94. **Киселев, Ю. В.** Искровые разрядники / Ю. В. Киселев, В. Л. Черепанов. – М. : Советское радио, 1976. – 70 с.
95. **Киселевский, Ф. И.** Проблемы разработки математических моделей процессов дуговой сварки для АСУ ТП / Ф. И. Киселевский, А. И. Сергеев, Г. А. Бутаков // Математические методы в сварке. – К. : Наукова думка, 1981. – 275 с.
96. **Коваленко, В. С.** Технология и оборудование электрофизических и электрохимических методов обработки материалов / В. С. Коваленко. – К. : Вища школа, 1983. – 176 с.
97. **Коваленко, В. С.** Металлографические реактивы / В. С. Коваленко. – М. : Metallurgy, 1973. – 112 с.
98. **Костржицкий, А. И.** Многокомпонентные вакуумные покрытия / А. И. Костржицкий, О. В. Лебединский. – М. : Машиностроение, 1987. – 208 с.
99. **Котельников, Д. И.** Тлеющий разряд как источник тепла в сварочных процессах / Д. И. Котельников // Автоматическая сварка. – 1978. – №4. – С. 15 – 21.
100. **Котельников, Д. И.** Сварка давлением в тлеющем разряде / Д. И. Котельников. – М. : Metallurgy, 1981. – 116 с.
101. **Котельников, Д. И.** Технология и оборудование диффузионной сварки в тлеющем разряде / Д. И. Котельников // Диффузионное соединение в вакууме металлов, сплавов и неметаллических материалов. – М. : ПНИЛДСВ, 1970. – С. 298 – 303.
102. **Котельников Д. И.** Исследование соединения стали, полученного диффузионной сваркой / Д. И. Котельников // Автоматическая сварка. – 1970. – №4. – С. 25–27.
103. **Котельников, Д. И.** Сварка твердых сплавов с применением тлеющего разряда / Д. И. Котельников // Твердосплавная штамповая оснастка и ее применение в электротехнической промышленности. – Таллин : НИИ ТЭЗ. – 1975. – С. 153 – 159.
104. **Котельников, Д. И.** Переносная установка для сварки в тлеющем разряде / Д. И. Котельников, В. Н. Левенец, Г. П. Болотов // Автоматическая сварка. – 1982. – №1. – С. 74.
105. **Котельников, Д. И.** Экономия припоев при изготовлении магнотриггеров / Д. И. Котельников, Г. П. Болотов // Экономия материалов в технологических процессах пайки. – К. : ИЭС им. Е. О. Патона, 1983. – С. 97 – 100.
106. **Котельников, Д. И.** Применение оборудования для сварки и пайки в тлеющем разряде / Д. И. Котельников. – Чернигов : ВСНТО, 1981. – 57 с.
107. **Котельников, Д. И.** Установка для диффузионной сварки в тлеющем разряде / Д. И. Котельников, Г. П. Болотов, А. П. Романенков, А. Л. Сиваков // Автоматическая сварка. – 1985. – №7. – С. 71 – 72.

108. **Котельников, Д. И.** Физико – технические и технологические процессы сварки в тлеющем разряде : автореферат дисс. ... докт. техн. наук / Д. И. Котельников. – М. : МВТУ, 1985. – 32 с.
109. **Котельников, Д. И.** Технологические особенности применения тлеющего разряда при сварке / Д. И. Котельников // Технология и организация производства. – 1976. – №7. – С. 57 – 59.
110. **Котельников, Д. И.** Распределение плотности тока в катодном пятне тлеющего разряда / Д. И. Котельников, Ю. Н. Крысанов // Автоматическая сварка. – 1979. – №11. – С. 27 – 29.
111. **Котельников, Д. И.** Нагрев тлеющим разрядом при диффузионной сварке / Д. И. Котельников // Вестник Киев. политехн. ин – та. Сер. «Машиностроение». – 1968. – №5. – С. 56 - 60
112. **Котельников, Д. И.** Определение некоторых параметров столба тлеющего разряда при сварке / Д. И. Котельников, В. С. Гвоздецкий // Автоматическая сварка. – 1980. – №5. – С. 1 - 4.
113. **Котельников, Д. И.** Активация тлеющим разрядом соединяемых поверхностей при диффузионной сварке / Д. И. Котельников, Г. П. Болотов // Высокие технологии в машиностроении. – М. : ЦРДЗ, 1993. – С. 128 – 129
114. **Кочергин, А. К.** Сварка металлов давлением с малой степенью деформации / А. К. Кочергин, А. И. Шестаков. – Л. : ЛДНТП, 1971. – 21 с.
115. **Краткий физико-технический справочник** / под. ред. К. П. Яковлева. – М. : Физматгиз, 1962. – 686 с.
116. **Крымский, Ю. Г.** Особенности сварки в тлеющем разряде / Ю. Г. Крымский // Новые методы сварки и передовая технология в производстве сварных конструкций. – Пермь : НТО Машпром, 1971. – С. 43.
117. **Кужель, А. В.** Технология пайки слоистых конструкций : информ. письмо / А. В. Кужель, В. Ф. Хорунов, Ю. Б. Малевский. – К. : ИЭС им. Е.О. Патона, 1979. – №9.
118. **Лахтин, Ю. М.** Современное состояние и пути развития технологии химико – термической обработки стали / Ю. М. Лахтин // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1965. – №8. – С. 34.
119. **Леб Л.** Основные процессы электрических разрядов в газах /Л. Леб. – М. – Л. : Наука, 1950. – 386с.
120. **Лифшиц, Е. М.** Физическая кинетика / Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский. – М. : Наука, 1979. – 360 с.
121. **Лыков, А. В.** Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 599 с.
122. **Мазур, А. И.** Процессы сварки и пайки в производстве полупроводниковых приборов / А. И. Мазур, В. П. Алехин, М. Х. Шоршоров. – М. : Радио и связь, 1981. – 224 с.
123. **Махненко, В. И.** Тепловые процессы при механизированной наплавке деталей типа круговых цилиндров / В. И. Махненко, Т. Г. Кравцов. – К. : Наукова думка, 1976. – 156 с.
124. **Мик, Д.** Электрический пробой в газах : пер. с англ. / Д. Мик, Д. Крэгс. – М. : ИЛ, 1960. – 598 с.
125. **Морозов, А. И.** Применение ускорителей ионов для плазменной очистки поверхности стальной полосы : IV Всесоюзная конференция по плазменным ускорителям / А. И. Морозов, Ю. М. Левченко, Ю. Г. Зельцер. – М. : ВНИИЦ, 1978. – С. 413 -414.
126. **Москалев, Б. И.** Разряд с полым катодом / Б. И. Москалев. – М. : Энергия, 1969. – 212 с.
127. **Мусин, Р. А.** Диффузионная сварка жаропрочных сплавов / Р. А. Мусин, В. Н. Анциферов, В. Ф. Квасницкий. – М. : Металлургия, 1979. – 208 с.
128. **Мусин, Р. А.** Соединение металлов с керамическими материалами / Р. А. Мусин, Г. В. Конюшков. – М. : Машиностроение, 1991. – 222 с.

129. **Мустафин, К. С.** Исследование положительного столба в инертных газах средних давлений / К. С. Мустафин // Вестник ЛГУ. – 1960. – №22. – С. 130.
130. **Муха, И. М.** Влияние нагрева в тлеющем разряде на свойства твердых сплавов / И. М. Муха, М. Н. Довбишук // Материалы VI межвузовской научн. – техн. конф. по диффузионному соединению в вакууме металлов и неметаллических материалов. – М. : ПНИЛДСВ, 1971. – С. 307.
131. **Назаренко, О. К.** Электроннолучевая сварка / О. К. Назаренко. – М. : Машиностроение, 1981. – 146 с.
132. **Назарова, Р. И.** Исследование окисления металлов в условиях тлеющего разряда в кислороде / Р. И. Назарова // Журнал физической химии. – 1958. – Т. 32, №1. – С. 79 – 85.
133. **Напартович, А. Л.** Механизмы неустойчивости тлеющего разряда повышенного давления / А. Л. Напартович, А. Н. Старостин // Химия плазмы. – М. : Атомиздат. – 1979. – Вып. 6. – С. 153.
134. **Никитинский, А. М.** Пайка алюминия / А. М. Никитинский. – М. : Машиностроение, 1983. – 189 с.
135. **Новомлинец, О. А.** Разработка технологии диффузионной сварки в вакууме хрома с медью : автореферат дисс.... канд. техн. наук / О. А. Новомлинец. – К. : ИЭС им. Е. О. Патона, 2003. – 16 с.
136. **Пат. №374779**, Швейцария, кл. 21h, 16/60 / Berghaus B. – Оpubл. 31.07.1964.
137. **Пат. №343554**, Швейцария, кл. 21h, 16/60 / Harders F., Knuppel H., Brotzman K. – Оpubл. 05.08.1960.
138. **Пат. №1021679**, ФРГ, кл. 486, 15/00 / Harders F., Knuppel H., Brotzman K. – Оpubл. 25.06.1964.
139. **Патон, Б. Е.** Математическое моделирование сварочных процессов для создания системы прогнозирования качества соединений и оптимального управления / Б. Е. Патон, Н. В. Подола // Автоматическая сварка. – 1971. – №7. – С. 1 – 5.
140. **Пехович, А. И.** Расчеты теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких. – Л. : Энергия, 1968. – 303 с.
141. **Пешков, В. В.** Влияние окисных пленок на взаимодействие контактных поверхностей при диффузионной сварке титана / В. В. Пешков, М. Н. Подоприхин, В. Н. Милютин // Сварочное производство. – 1983. – №12. – С. 4–5
142. **Плешивцев, Н. В.** Физические проблемы катодного распыления (обзор) / Н. В. Плешивцев. – М. : ИАЭ им. И. В. Курчатова, 1979. – 88 с.
143. **Прокошкин, Д. А.** Получение покрытий на металлах в тлеющем разряде // Защитные покрытия на металлах / Д. А. Прокошкин. – К. : Наукова думка. – 1970. – Вып. 3. – С. 81 – 86.
144. **Прокошкин, Д. А.** Получение покрытий на металлах в тлеющем разряде / Защитные покрытия на металлах / Д. А. Прокошкин, Б. Н. Арзамасов, Е. В. Рябченко. – К. : Наукова думка. – 1970. – Вып. 3. – С. 7.
145. **Прокошкин, Д. А.** Химико – термическая обработка металлов в тлеющем разряде / Д. А. Прокошкин, Б. Н. Арзамасов, Е. В. Рябченко // Химико – термическая обработка стали и сплавов. – М. : Машиностроение, 1969. – С.7.
146. **Райзер, Ю. П.** Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. – М. : Наука, 1987. – 590 с.
147. **Растрин, Л. А.** Статические методы поиска / Л. А. Растрин. – М. : Наука, 1983. – 383 с.
148. **Ройх, И. Л.** Защитные вакуумные покрытия на стали / И. Л. Ройх, Л. Н. Колтунова. – М. : Машиностроение, 1971. – 279 с.
149. **Россошинский, А. А.** Пайка металлов / А. А. Россошинский. – К. : ИЭС им. Е. О. Патона, 1983. – 42 с.
150. **Рыкалин, Н. Н.** Основы электронно – лучевой обработки материалов / Н. Н. Рыкалин, И. В. Зуев, А. А. Углов. – М. : Машиностроение, 1978. – 238 с.

151. **Рыкалин, Н. Н.** Расчет тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М. : Машгиз, 1951. – 296 с.
152. **Рябов, В. Р.** Диффузионная сварка дисперсноупрочненного алюминиевого сплава / В. Р. Рябов, Т. В. Богданова, Г. П. Болотов // Автоматическая сварка. – 1993. – №3. – С. 34 – 38.
153. **Рябченко, Е. В.** Применение тлеющего разряда для диффузионного насыщения металлов / Структура и свойства жаропрочных сплавов. Труды МАИ / Е. В. Рябченко. – М. : МАИ, 1971. – С. 65-80.
154. **Садовников, Б. В.** Диффузионная сварка в тлеющем разряде твердого сплава со сталью на опытном образце серийной установки ДС / Б. В. Садовников // Электротехническая промышленность. Сер. Электросварка. – 1982. – Вып. 4. – С. 3 – 5.
155. **Самсонов, Г. В.** Диффузионное соединение твердых сплавов / Г. В. Самсонов, И. М. Муха // Электронная обработка материалов. – 1971. – №6. – С. 28 – 30.
156. **Свенчанский, А. Д.** Электротермические процессы и оборудование / А. Д. Свенчанский, М. М. Соколов. – М. : МЭИ, 1985. – 37 с.
157. **Светцов, В. И.** Катодное распыление некоторых материалов в условиях тлеющего разряда в молекулярных газах / В. И. Светцов, А. И. Максимов // Вопросы физики низкотемпературной плазмы. – Минск : ИФ АН БССР, 1970. – С. 604 – 607.
158. **Сиваков, А. Л.** Устройства управления технологическими параметрами процесса диффузионной сварки в плазме тлеющего разряда : автореферат дисс. ... канд. техн. наук / А. Л. Сиваков. – Л. : СЗПИ, 1989. – 16 с.
159. **Соболев, В. Д.** Физические основы электронной техники / В. Д. Соболев. – М. : Высшая школа, 1979. – 447 с.
160. **Справочник по пайке** / под ред. С. Н. Лоцманова, И. Е. Петрунина. – М. : Машиностроение, 1975. – 407 с.
161. **Структура и свойства металлов и сплавов.** Кристаллическая структура металлов и сплавов : справочник / под ред. Д. М. Барабаша, Ю. Н. Ковалья. – К. : Наукова думка, 1986. – 598 с.
162. **Ульянов, К. Н.** Теория нормального тлеющего разряда при среднем давлении / К. Н. Ульянов // Теплофизика высоких температур. – 1972. – Т. 10, №5. – С. 931.
163. **Унежев, Б. Х.** Влияние низкотемпературной плазмы газов на краевой угол смачивания меди оловом / Б. Х. Унежев, М. М. Махова, Х. Б. Хоконов // Адгезия металлов и сплавов. – К. : Наукова думка, 1977. – С. 53 – 56.
164. **Физико-химические свойства элементов** / под ред. Г. В. Самсонова. – К. : Наукова думка, 1965. – 807 с.
165. **Физико-химические свойства окислов** / под ред. Г. В. Самсонова. – М. : Metallургия, 1969. – 456 с.
166. **Фролов, В. В.** Теоретические основы сварки / В. В. Фролов. – М. : Высшая школа, 1970. – 591 с.
167. **Фролов, А. П.** Некоторые особенности распределения температур в цилиндрическом образце при индукционном нагреве в условиях ДСВ / А. П. Фролов, Н. А. Машкова, А. П. Шишкова, В. С. Грошев / Диффузионное соединение в вакууме. – М. : Машиностроение : ПНИЛДСВ, 1973. – 176 с.
168. **Ховатсон, А. М.** Введение в теорию газового разряда / А. М. Ховатсон. – М. : Атомиздат, 1980. – 182 с.
169. **Холлэнд, Л.** Нанесение тонких пленок в вакууме / Л. Холлэнд. – М. – Л. : Госэнергоиздат, 1962. – 608 с.
170. **Черныш, В. П.** Сварочные процессы как объекты управления / В. П. Черныш // Машиностроение : Энциклопедия / ред. совет : Фролов К.В. [и др.]. – М. : Машиностроение. – Т. 1V-6. Оборудование для сварки, 2002. – 495 с.

171. **Черныш, В. П.** Расчетное определение температуры нагрева при диффузионной сварке в тлеющем разряде / В. П. Черныш, Г. П. Болотов, Д. И. Котельников, Ю. Н. Кутепов // Автоматическая сварка. – 1984. – №9. – С. 54 – 56.
172. **Черняев, В. М.** Физико-химические процессы в технологии РЭА / В. М. Черняев. – М. : Высшая школа, 1987. – 375 с.
173. **Шоршоров, М. Х.** О природе физико-химических процессов в сварных и паяных соединениях / М. Х. Шоршоров, Ю. Л. Красулин // Сварочное производство. – 1967. – №12. – С. 1-4.
174. **Энгель, А.** Физика и техника электрического разряда в газах / А. Энгель, М. Штейнбек. – М. – Л. : ОНТИ, 1936. – 324 с.
175. **Юм-Розери, В.** Атомная теория для металлургов : пер с англ. / В. Юм-Розери. – М. : Металлургиздат, 1955. – 356 с.
176. **Ecker, G.** Thermal Instability of the plasma column / G. Ecker, W. Kroll, O. Zoller // Phys. Fluids. – 1964. – V. 7. – №12. – P. 2001.
177. **Ecker, G.** Thermal Inhomogeneous Plasma Column / G. Ecker, O. Zoller // Phys. Fluids. – 1964. – V. 7. – №12. – P. 1996-2000.
178. **Hofert, H. J.** Der Ubergang von der Glimentladung in die Bogenentladung / H. J. Hofert // Ann. d. Phys. – 1939. – V. 35. – P. 574–576.
179. **Plesse, H.** Untersuchungen an Electricitenlichtbogen / H. Plesse // Ann. d. Phys. – 1935. – №22. – P. 473.
180. **Sood D.K.** // Radiation Effects Lett. – 1981. – 67. – P. 13.
181. **Trousil Z.** // Czeschosl. Phys. – 1962. – 3, №12. – P. 227 – 231.
182. **Westberg, R. G.** Nature and Role of Ionizing Potential Space Waves in Glow-to-Arc Transitions / **R. G. Westberg** // Phys. Rev. – 1959. – №1. – P.114.
183. **Wierzschoń T.** Zgrzewanie dyffusyjne z zastosowaniem procesu bombardowanie jonego / **T. Wierzschoń** // Prz. Spaw. – 1975. – №11. – S. 71.

Зміст

Вступ	3
1. Основні характеристики та технологічні застосування тліючого розряду	7
1.1. Електричний розряд в газах.....	7
1.1.1. <i>Форми газового розряду</i>	7
1.1.2. <i>Тліючий розряд</i>	9
1.1.3. <i>Елементарні процеси в тліючому розряді</i>	10
1.1.4. <i>Різновиди тліючого розряду</i>	12
1.2. Застосування тліючого розряду в технологічних процесах.....	14
2. Електричні та енергетичні характеристики тліючого розряду середніх тисків	19
2.1. Характеристика процесу нагріву тліючим розрядом в умовах зварювання як об'єкта керування.....	19
2.2. Енергетичний баланс на катоді тліючого розряду в умовах зварювання та паяння.....	23
2.3. Керування енергетичними характеристиками тліючого розряду.....	27
2.4. Енергетичні нестійкості тліючого розряду при зварюванні.....	32
2.5. Технологічні заходи забезпечення стійкості тліючого розряду.....	35
2.6. Технічні засоби підвищення стабільності потужнострумовеого тліючого розряду.....	44
3. Моделювання теплових процесів при нагріванні та зварюванні у тліючому розряді	51
3.1. Вибір і аналіз методу математичного моделювання процесу іонного нагріву.....	51
3.2. Моделювання теплового стану зони з'єднання різнорідних металів при дифузійному зварюванні в тліючому розряді теплофізично "тонких" тіл.....	56
3.3. Прогнозування теплового стану зони з'єднання різнорідних металів при дифузійному зварюванні з іонним нагрівом теплофізично "масивних" тіл.....	61
3.4. Особливості нагріву виробів обмежених розмірів при дифузійному зварюванні в тліючому розряді.....	68
4. Технологія зварювання та паяння в тліючому розряді	75
4.1. Особливості формування з'єднань при зварюванні тиском у тліючому розряді.....	75
4.2. Зварювання сталей.....	80
4.3. Зварювання різнорідних металів і твердих сплавів.....	85

4.4. Нагрівання та зварювання у тліючому розряді складних конструкцій.....	87
4.5. Активаційна дія тліючого розряду в умовах дифузійного зварювання.....	93
4.6. Керування процесами масопереносу при дифузійному зварюванні важкозварюваних металів.....	104
4.7. Змочування металевих поверхонь припоями при нагріванні та паянні в тліючому розряді.....	111
5. Обладнання для зварювання та паяння в тліючому розряді.....	117
5.1. Установки для дифузійного зварювання та паяння в тліючому розряді.....	117
5.2. Системи електроживлення та управління тліючим розрядом.....	123
Післямова.....	134
Список літератури.....	136

Наукове видання

Болотов Геннадій Павлович

ЗВАРЮВАННЯ ТА ПАДІННЯ В ПЛАЗМІ ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ

Монографія

Технічний редактор	Прізвище Ім'я По батькові
Комп'ютерна верстка	Прізвище Ім'я По батькові
Мовне редагування	Прізвище Ім'я По батькові
Друк	Прізвище Ім'я По батькові

Прийнято до друку 00.00.0000 р. Формат 60x84/16
Папір офс. Гарнітура Times New Roman. Друк - цифровий.
Ум.-друк. арк. 0,0 Обл.-вид. арк. 0,0.
Наклад 0 прим. Зам. № 0000.000.000

Чернігівський національний технологічний університет
14027 м. Чернігів, вул. Шевченка, 95.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до державного реєстру видавців,
виробників і розповсюджувачів видавничої продукції
серія ДК № 4802 від 01.12.2014 р.