

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ І УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему «**Дослідження процесу точкового плазмового зварювання
алюмінієвих сплавів**»

Виконав: студент групи Маш-61

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

Запотічний Микола Федорович

Керівник: к.т.н., доцент Швець Олексій Петрович
(Прізвище та ініціали)

Дубляни 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ І УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

Рівень вищої освіти – другий магістерський
Спеціальність 133 - Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
Машинобудування
(назва кафедри)

(підпис)

професор Віталій ВЛАСОВЕЦЬ
(прізвище та ініціали)

“ _____ ” _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу студенту

Запотічному Миколі Федоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження процесу точкового плазмового зварювання алюмінієвих сплавів»

Керівник роботи к.т.н., доцент Швець Олексій Петрович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЛНУП від 12 вересня 2024 року №616/к-с

2. Строк подання студентом роботи до 11 грудня 2024 року

3. Вихідні дані до работ: довідкова література, інструкції з експлуатації обладнання для плазмового зварювання, каталоги плазмотронів та витратних матеріалів до них, характеристики алюмінієвих сплавів, методики оцінки якості зварних з'єднань, інструкції з охорони праці.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

4.1. Аналіз процесу плазмового зварювання алюмінію; 4.2. Короткий теоретичний аналіз нових можливостей джерел живлення змінного струму; 4.3. Методика та результати досліджень процесу точкового зварювання алюмінію; 4.4. Охорона праці; Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу:

Графічні матеріали до роботи виконати у вигляді презентації в середовищі PowerPoint обсягом 10-12 листів.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		Завдання видав	завдання прийняв	
1, 2, 3, 5	Швець О.П. доц. каф. машинобудування			
4	Городецький І.М. доц. каф. ФІМ та БВ			

7. Дата видачі завдання “ ____ ” _____ 20__ року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	Аналіз процесу плазмового зварювання алюмінію	27.09.24	
2	Короткий теоретичний аналіз нових можливостей джерел живлення змінного струму	18.10.24	
3	Методика та результати досліджень процесу точкового зварювання алюмінію	08.11.24	
4	Охорона праці	18.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки	29.11.24	
6	Оформлення графічної частини	11.12.24	

Студент

_____ (підпис)

Запотічний М.Ф.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Швець О.П.

_____ (прізвище та ініціали)

УДК 621.791

Запотічний М.Ф. «Дослідження процесу точкового плазмового зварювання алюмінієвих сплавів». /Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет природокористування, 2024.

Проведено аналіз способу плазмового зварювання конструктивних матеріалів. Розглянуто конструкцію плазмотронів та особливості роботи прямої і непрямої плазмової дуги. Проаналізовано характеристики алюмінієвих сплавів та визначено особливості виконання процесів їх зварювання. Виконано експериментальні дослідження процесу зварювання листового алюмінієвого сплаву товщиною 2 мм за допомогою стиснутої плазмової дуги. Обґрунтовано значення струму дуги, часу зварювання та балансу змінного струму. Оцінено вплив конструктивних (не електричних) параметрів плазмотрона на якість точкових зварних швів.

56 с.; табл. 11; рис. 33; бібліогр. джерел 25.

ЗМІСТ

	ВСТУП	6
1	АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ПЛАЗМОВОГО ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЮ	8
1.1	Сфера застосування точкового електродугового зварювання алюмінієвих сплавів	8
1.2	Властивості алюмінієвих сплавів	9
1.3	Способи отримання точкових з'єднань	11
1.3.1	Плазмове зварювання на постійному струмі прямої полярності	11
1.3.2	Плазмове зварювання на постійному струмі зворотної полярності	11
1.3.3	Плазмове зварювання на змінному синусоїдальному струмі	12
1.3.4	Зварювання трифазною стиснутою дугою	13
1.3.5	Плазмове зварювання різнополярними імпульсами струму (РПІ)	14
	Висновки за розділом	16
2	КОРОТКИЙ ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ НОВИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ	17
2.1	Вплив форми змінного струму на геометричні розміри шва	17
2.2	Вплив форми струму прямокутної форми на розміри зони очищення від оксидної плівки	18
2.3	Вплив балансу полярностей на ефективну потужність дуги	20
	Висновки за розділом	21
3	МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ТОЧКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЮ	23
3.1	Обладнання для експериментальних досліджень	23
3.2	Особливості конструкції плазмотрону для зварювання стиснутою дугою змінного струму з прямокутними імпульсами	29
3.3	Методика та результати дослідження формування зварної точкового з'єднання алюмінієвих пластин товщиною 2 мм	32

3.4	Вплив параметрів плазмотрону на формування зварної точки	43
	Висновки за розділом	45
4	ОХОРОНА ПРАЦІ	46
4.1	Аналіз чинників і факторів, які можуть призвести до виникнення небезпечних чи аварійних ситуацій під час роботи на установці для плазмового зварювання	46
4.2	Моделювання процесу формування і виникнення травмонебезпечної ситуації під час плазмового зварювання	47
4.3	Заходи щодо запобігання виробничого травматизму під час роботи на плазмових установках	49
	Висновки за розділом	52
	ВИСНОВКИ	53
	БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	54

ВСТУП

На сьогоднішній день зварювання алюмінію та алюмінієвих сплавів знаходить широке застосування у всіх сферах та галузях промисловості. З кожним роком підвищується попит на алюмінієві сплави, які використовуються майже у всіх сферах цивільного життя, починаючи з авто-, авіа-, суднобудування та закінчуючи побутовими електроприладами.

До найпоширеніших способів зварювання алюмінієвих сплавів можна віднести TIG (Tungsten Inert Gas – зварювання неплавким електродом в середовищі інертного захисного газу) та PAW (Plasma Arc Welding – плазмове зварювання). В даний час для зварювання алюмінієвих сплавів широко застосовується TIG зварювання, яке здійснюється від інверторних джерел живлення. Плазмове зварювання, використовується рідше. Причиною такої технологічної відсталості є особливості стабільності протікання процесу [21].

Плазмове зварювання має різні способи отримання точкового з'єднання в залежності від виду форми струму: постійний струм прямої та зворотної полярності, змінний синусоїдальний струм, трифазна стиснута дуга та різнополярні прямокутні імпульси.

Сучасні зварювальні інвертори мають, як правило, прямокутну форму змінного струму, що суттєво підвищує стабільність та продуктивність процесу зварювання алюмінієвих сплавів. Однак сучасні інвертори дозволяють здійснювати процес зварювання з вбудованим високочастотним блоком, який працює при переході струму через нуль безперервно, що призводить до збоїв горіння дуги.

Прямокутна форма змінного струму при правильному підборі балансу полярностей, впливає на зону очищення від оксидної плівки, що впливає на хороше формування зварної точки.

Точкове зварювання стиснутою дугою алюмінію та його сплавів застосовують для різних вузлів, деталей та конструкцій. Висока продуктивність, надійність та автоматизація плазмового зварювання дозволяє застосовувати його

в автомобілебудуванні, в основному це кузовна частина автомобіля, мікроелектроніки, деталі та вузли побутової техніки.

Основною проблемою застосування плазмового зварювання стиснутою дугою є виникнення подвійного дугоутворення під час зварювання, через високочастотні імпульси у момент переходу через нуль. Через це руйнується сопло та деформується зварна точка.

Гіпотеза у тому, що стабільність процесу зварювання залежить не тільки від електричних параметрів зварювання, а й від конструкція плазмотрона, а саме відстань від електрода до початку сопла. Зовнішній верхній діаметр сопла також впливає на виникнення подвійної дуги.

Тому необхідно забезпечити стабільне формування зварної точки при зварюванні з'єднань з алюмінієвих сплавів стиснутою дугою на змінному струмі прямокутної форми сучасними інверторами типу TIG-200P AC.

Мета роботи: підвищити стабільність формування зварної точки стиснутою дугою змінного струму з прямокутною формою імпульсів.

1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ПЛАЗМОВОГО ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЮ

1.1 Сфера застосування точкового електродугового зварювання алюмінієвих сплавів

Точкове зварювання алюмінію та його сплавів застосовують для різних деталей, вузлів, конструкцій. Висока продуктивність, надійність та простота автоматизації точкового плазмового зварювання дозволяє широко застосовувати його в різних сферах і галузях промисловості, наприклад, автомобілебудуванні, а саме кузовній частині автомобіля, мікроелектроніці для з'єднання мікросхем, різних корпусів, деталей, вузлів побутової техніки.

Плазмове зварювання є результатом розвитку та удосконаленням аргонодугового зварювання неплавким електродом.

Зварювання стиснутою дугою на змінному струмі є перспективною технологією зварювання алюмінієвих сплавів.

Відповідно до ГОСТ 2601-84 «Зварювання металів. Терміни та визначення основних понять», плазмове зварювання – це зварювання плавленням, при якому нагрівання проводиться стиснутою дугою. Стиснута дуга – це дуга, стовп якої стиснутий за допомогою сопла плазмового пальника, потоку газу або зовнішнім електромагнітним полем. Перевагами цього процесу є висока концентрація енергії в плямку нагріву та здатність змінної дуги розбивати окисну плівку.

Точкове плазмове зварювання характеризується великою кількістю параметрів, що дозволяє ефективніше керувати процесом зварювання. Отримані зварні точки мають високу міцність, однак у зв'язку з великою усадкою та високою швидкістю затвердіння зварювальної ванни виникають проблеми при формуванні точки, а застосування нового устаткування для живлення дуги додає їх ще більше. Тому розробки технології точкового плазмового зварювання не припиняються.

1.2 Властивості алюмінієвих сплавів

Алюмінієві сплави відносяться до групи алюмінієвих деформівних сплавів, які термічно не зміцнюються. Зі сплавів АМг-3 та АМг-6 виготовляють різні напівфабрикати, наприклад штамповані деталі. Напівфабрикати з цього сплаву мають відносно невисокі характеристики міцності, але високу пластичність. Алюміній – найпоширеніший у земній корі метал, його запаси становлять 8,8%. Алюміній є одноморфним металом із щільноупакованими гранецентрованими кубічними ґратами.

Технічно чистий алюміній має низькі міцності ($\sigma_B = 49 - 68$ МПа, модуль пружності $E = 70000$ МПа) та високі пластичні властивості ($\delta = 28\%$), тому як конструкційний матеріал застосовується в значно менших обсягах, ніж його сплави різного легування. Залежно від вмісту легуючих елементів, характеру пластичної обробки металу всі алюмінієві сплави поділяються на деформовані та ливарні. Деформовані алюмінієві сплави містять легуючі елементи у кількостях до межі їх розчинності в α – розчині алюмінію, наприклад, структура алюмінієво-магнієвих сплавів характеризується зернами α - алюмінію, за межами яких можуть бути виділення бета - фази - Al_3Mg_2 (до 3%) [6].

Для зварних конструкцій головним чином застосовуються алюмінієві деформівні сплави (ГОСТ 4784 –74), які можна поділити на термічно незміцнювані (з низькою та середньою міцністю) та термічно зміцнювані (середньої та високої міцності). До термічно незміцнюваних можна віднести технічний алюміній, сплави системи Al – Mn, алюмінієво - магнієві сплави системи Al - Mg (табл. 1.1). До термічно зміцнюваних сплавів, які мають межу міцності від 350 до 570 МПа, відносяться сплави систем Al - Zn - Mg, Al - Cu - Mn, Al - Zn - Mg - Cu, Al - Mg - Li та ін, підвищення міцності яких забезпечується виділенням дрібнодисперсних фаз у результаті старіння.

Хімічний склад та фізичні властивості алюмінієвого сплаву АМг-3 наведені у таблицях 1.1 та 1.2.

Таблиця 1.1 - Хімічний склад сплаву АМГ-3

Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Cr	Mg	Zn	Домішки
До 0.5	0.5 – 0.8	0.3 - 0.6	До 0.1	93.8 - 96	До 0.1	До 0.05	3.2 - 3.8	До 0.2	Інші, кожна 0.5; всього 0.1

Таблиця 1.2 - Фізичні властивості сплаву АМГ-3

T	E 10 ⁻⁵	A 10 ⁻⁵	λ	ρ	Cp	R 10 ⁻⁵
Град	МПА	1/Град	Вт/(м*град)	Кг/м ³	Дж/(кг*град)	Ом*м
20	0.71	-	-	2660	-	49.6
100	-	23.5	151	-	880	-

Хімічний склад та фізичні властивості алюмінієвого сплаву АМГ-6 наведені у таблицях 1.3 та 1.4.

Таблиця 1.3 - Хімічний склад сплаву АМГ-6

Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Be	Mg	Zn	Домішки
До 0.4	До 0.4	0.5 - 0.8	0,02 - 0.1	91.1 – 93,68	До 0.1	0,0002 - 0.005	5.8 - 6.8	До 0.2	Інші, кожна 0.5; всього 0.1

Таблиця 1.4 - Фізичні властивості сплаву АМГ-6

T	E 10 ⁻⁵	A 10 ⁻⁵	λ	ρ	Cp	R 10 ⁻⁵
Град	МПА	1/Град	Вт/(м*град)	Кг/м ³	Дж/(кг*град)	Ом*м
20	0.71	-	-	2640	-	67.3
100	-	24.7	122	-	922	-

Алюміній взаємодіє з киснем, унаслідок чого утворюється тугоплавкий оксид алюмінію Al_2O_3 . Температура плавлення оксиду алюмінію становить приблизно 2044°C, у той час, коли температура плавлення чистого алюмінію 660°C. Тому перед зварюванням алюмінієвих сплавів необхідно якісно відчищати оксидну плівку.

Видалення оксидної плівки здійснюється декількома способами: механічним способом – зачищення основного металу металевою щіткою; хімічним способом – розчинниками, травленням тощо; технологічний спосіб – видалення оксидної плівки за рахунок застосування зворотної полярності.

1.3 Способи отримання точкових з'єднань

1.3.1 Плазмове зварювання на постійному струмі прямої полярності

При зварюванні стиснутою дугою на прямій полярності (ПП) алюмінієвих сплавів (рис. 1.1), потрібна обов'язкова якісна зачистка основного метал від оксидної плівки безпосередньо перед зварювання.

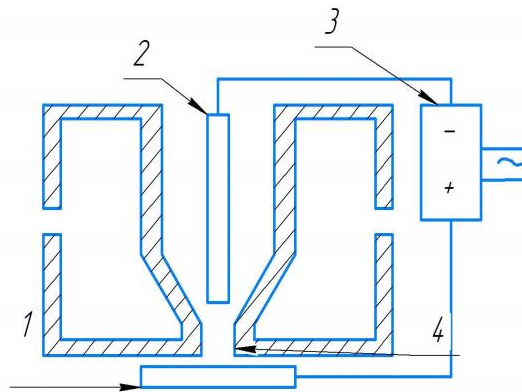


Рисунок 1.1 – Схема зварювання на прямій полярності $W-Al^+$

1 – виріб, 2 – електрод, 3 – джерело живлення, 4 – стискаюче сопло

Головною особливістю зварювання на прямій полярності є менший тепловий вплив на торець електрода, що підвищує його стійкість у процесі зварювання, на відміну зворотної полярності (ЗП). При цьому допустимі значення струму для того ж діаметра електрода при ПП та ЗП можуть відрізнятися від 3 до 7 разів, залежно від діаметра електрода [3]. Так само існує вплив на розмір зварної точки.

1.3.2 Плазмове зварювання на постійному струмі зворотної полярності

При зварюванні на постійному струмі зворотної полярності (рис. 1.2), досягається краща катодна очистка. Але при роботі на зворотній полярності виникає проблема у надмірному накопиченні тепла на електроді, що призводить до зниження терміну його служби. Для того, щоб збільшити ресурс роботи електрода існують два способи: перший це використання інтенсивного

охолодження електрода, а другий за рахунок тепловідведення за допомогою мідної частини електрода. Також для збільшення терміну служби в плазмотроні використовують більш габаритні деталі. Для підвищення стабільності горіння дуги рекомендується зачистити зразок від оксидної плівки, щоб запобігти блуканням дуги [3].

Під час зварювання на зворотній полярності різко падає допустима густина струму на вольфрамовому електроді. У зв'язку з цим і виникають проблеми охолодження неплавкого електрода, що спричинить собою зміни в конструкції плазмотрона для зварювання стиснутою дугою [9].

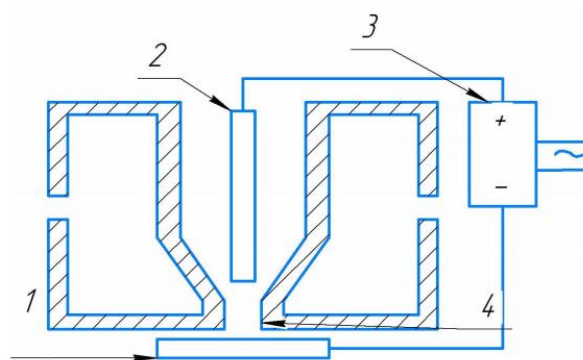


Рисунок 1.2 – Схема зварювання на зворотній полярності W^+-Al
1 - виріб, 2 - електрод, 3 - джерело живлення, 4 – стискаюче сопло

Дослідження властивостей стиснутої дуги показало, що силова дія плазмової дуги на зварювальну ванну вище при прямій полярності, порівняно зі зворотною полярністю [9].

1.3.3 Плазмове зварювання на змінному синусоїдальному струмі

При використанні змінного синусоїдального струму для зварювання стиснутою дугою комбінація прямої та зворотної полярності дозволяє ефективно зварювати алюмінієві сплави (рис. 1.3). Видалення оксидної плівки відбувається в момент напівперіоду зворотної полярності, при цьому на електрод впливає близько 70% тепла [9]. Однак застосування змінного синусоїдального струму створює ряд проблем, пов'язаних з тим, що дуга вкрай нестабільна при переході струму через нуль, тому до джерела живлення підключають стабілізатор дуги.

Осцилятор використовують для початкової іонізації дугового проміжку за рахунок розряду високої напруги та частоти, завдяки чому виникала дуга [3].

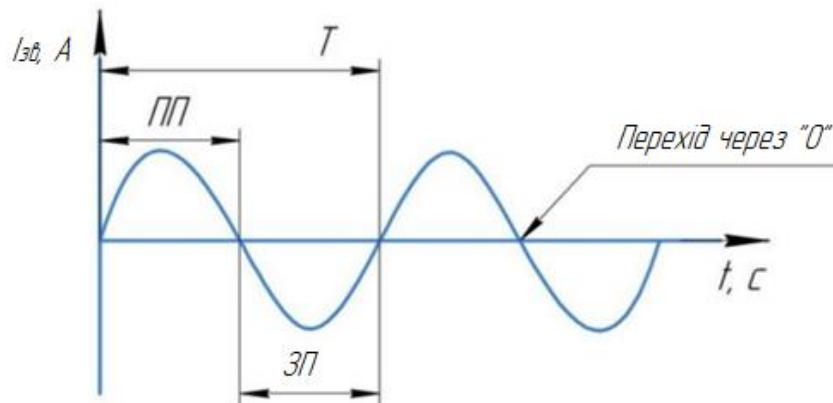


Рисунок 1.3 – Змінний синусоїдальний струм при зварюванні W-Al
 ПП – пряма полярність, ОП – зворотна полярність, Т – період струму

У процесі зварювання може виникнути аварійна ситуація, за якої виникає подвійна дуга. Через це дуга починає горіти в бік сопла, тим самим виводячи його з ладу, при цьому сопло може розплавитися на виріб, призвівши до його повного дефекту.

1.3.4 Зварювання трифазною стиснутою дугою

Зварювання трифазною стиснутою дугою проводиться спеціальним плазмотроном за схемою, наведеною рисунку 1.4.

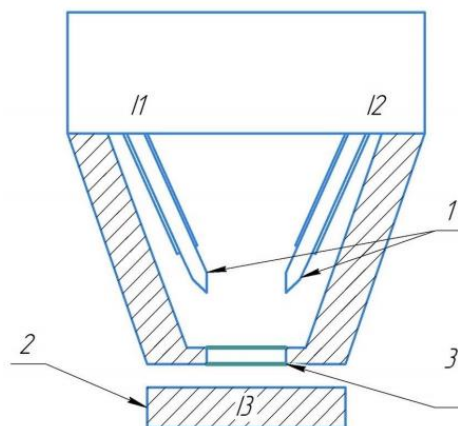


Рисунок 1.4 – Схема зварювання трифазною стиснутою дугою
 1 – електроди, 2 – виріб, 3- стискаюче сопло, 11, 12 - фази підключені до електродів, 13 – фаза підключена до виробу

Два неплавких електроди кріпляться в плазмотроні під кутом, до електродів підводять дві фази, кожна до свого електрода. Третя фаза підключається безпосередньо до виробу. У кожний момент часу горить дві з трьох дуг. Дуги горять по черзі: 1) W-W, W-Al дві з них горять між електродами та виробом, 2) W-Al, W-Al. Дугу, яка горить між електродами, називають черговою [19]. Збудження залежних дуг відбувається за рахунок плазмоутворюючого газу та чергової дуги при наближенні пальника до виробу. Чергова дуга створює малопотужну дугу, яка при зіткненні з виробом запалює основні дуги.

1.3.5 Плазмове зварювання різнополярними імпульсами струму (РПІ)

Цей спосіб можна порівняти зі зварюванням на змінному струмі синусоїдальної форми: обидва способи зварювання працюють на частоті 50 Гц. Однак між ними є низка суттєвих відмінностей.

При зварюванні різнополярними імпульсами струму прямокутної форми не потрібний додатковий блок, який забезпечує стабільність переходу струму через нуль у тому випадку, якщо схема джерела живлення прямокутної форми забезпечує перехід з однієї полярності на іншу зі швидкістю до 600 кА/с. Знижується час переходу через нуль, що підвищує стабільність горіння дуги, отже й ефективність процесу [13].

Стабільне збудження дуги в початковий момент забезпечує високочастотний генератор.

Однак у сучасних схемах інверторів перехід струму через нуль забезпечує робота високочастотного генератора, що призводить на окремих режимах до виникнення подвійної дуги при зварюванні стиснутою дугою [3].

Однією з головних особливостей сучасних інверторів, таких як TIG-200P, є можливість зміни тривалості струму прямої $t_{пр}$ і зворотної полярності $t_{зв}$, зберігаючи при цьому однакову величину амплітудного значення струму $I_{пр} = I_{зв}$ [13].

Можливість регулювання тривалості струму на прямій та зворотній полярності дає широкі можливості зміни технологічних властивостей дуги, впливаючи на якість зварної точки.

Важливу роль в цьому випадку відіграє конструкція плазмотрона. У дослідженнях [22] доведено, що ступінь стиснення дуги зростає зі зменшенням діаметра сопла. На ступінь стиснення дуги впливає величина сили струму, тобто, чим вона вища, тим більший ступінь стиснення дуги, що у свою чергу впливає на тиск дуги на зварювальну ванну.

Попередні дослідження показали, що на діаметр та глибину проплавлення зварної точки впливає баланс полярностей струму. Зміна коефіцієнта наплавлення та глибини проплавлення за зміни полярності відзначається й у роботі [24].

При зварюванні струмом зворотної полярності глибина провару приблизно на 40-50% більша, ніж при зварюванні струмом прямої полярності, і на 15-20% більша, ніж при зварюванні змінним струмом, що пояснювалося різним виділенням кількості теплоти на аноді та катоді.

У роботі [23] рекомендується використовувати частку зворотної полярності в межах 40-50 %.

Питома теплова ефективність дуги зворотної полярності знижується із зменшенням струму дуги, а прямої полярності збільшується. Водночас в діапазоні струмів 100-250 А питома ефективність зворотної дуги зворотної полярності значно вищі.

Успішне застосування РПІ гарантує стабільність дуги, якісне зварне з'єднання, а також більшу ефективність процесу. Переваги дуги змінного струму з прямокутними імпульсами завдяки високій стабільності горіння, можливості впливу на тепловкладання в пряму та зворотну полярність розширюють технологічні властивості процесу при зварюванні сплавів алюмінію точками стиснутою дугою.

Впливом процесу регулювання прямої та зворотної полярності можна виконувати зачистку поверхні металу від катодної плівки, а при правильно

підбраному балансі полярностей повністю видаляється оксидна плівка під час процесу зварювання, тим самим позитивно впливає на формування звареної точки.

Висновки за розділом

Для підвищення стабільності та якості формування зварної точки при точковому зварюванні стиснутою дугою змінного струму з прямокутною формою імпульсів необхідно вирішити такі завдання:

1. Вивчити технологічні можливості TIG-200P, що формує змінний струм із прямокутною формою імпульсів.
2. Дослідити вплив параметрів плазмотрону на формування звареної точки.
3. Розробити методику проведення дослідження.
4. Розробити технологічний процес зварювання стиснутою дугою змінного струму із прямокутними імпульсами.

2. КОРОТКИЙ ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ НОВИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ

2.1 Вплив форми змінного струму на геометричні розміри шва

Досвід експлуатації джерел живлення показав, що зварювання одного і того ж матеріалу за однакових умов складання, на тому самому режимі, але при використанні різних джерел живлення призводить до різного формування шва. Аналогічні за чинним значенням струму джерела різного типу не забезпечують ідентичності теплових показників дуги. Це викликає необхідність коригування параметрів режим при зміні джерел. Отже, щоб отримати одну і ту ж задану геометрію зварного шва при зварюванні різними джерелами живлення, недостатньо за інших рівних умов характеризувати зварювальний струм одним діючим значенням, як це робиться нині [13].

Проведені досліді на джерелах живлення, які відрізняються формою струму показали, що вплив на геометричні параметри шва виявляє коефіцієнт амплітуди $k_a = I_a/I$, тобто, форма струму (рис. 2.1).

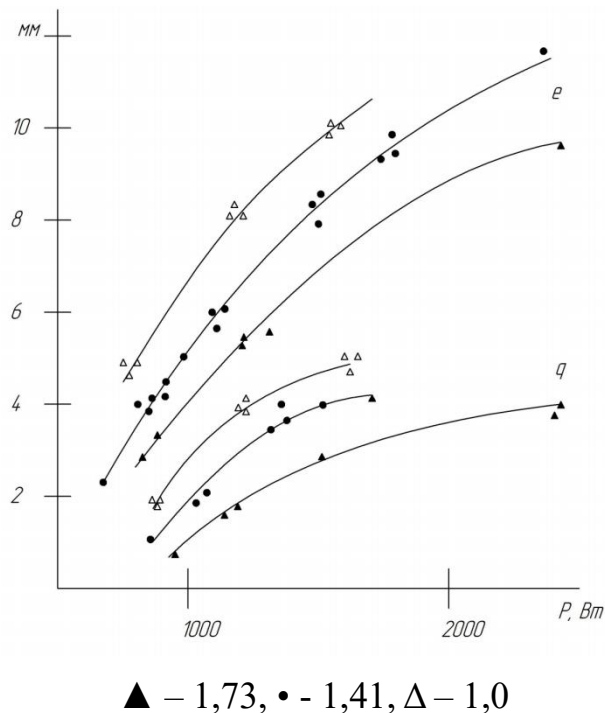


Рисунок 2.1 - Вплив форми струму k_a та потужності дуги на геометричні розміри шва
 e – ширина струму, q – посилення

Таким чином, при використанні для зварювання джерел живлення з різним значенням k_a сталість амплітудного чи діючого значення струму зварювання, також потужності дуги не дозволяє отримати однакові розміри шва. Але якщо коригувати значення струму на джерелах живлення з використанням величини коефіцієнта амплітуди, то можна отримати однакові зварні шви на різних джерелах живлення.

Встановлено, що змінний струм прямокутної форми забезпечує збільшення проплавлювальної здатності дуги при стабільності процесу.

2.2 Вплив форми струму прямокутної форми на розміри зони очищення від оксидної плівки

Вплив форми струму прямокутної створює форми значний вплив на очищення алюмінію від оксидної плівки. У роботі автора [19] стверджується, що найефективніший баланс полярностей для очищення оксидної плівки є 60/40% (ЗП/ПП) (рис. 2.2).

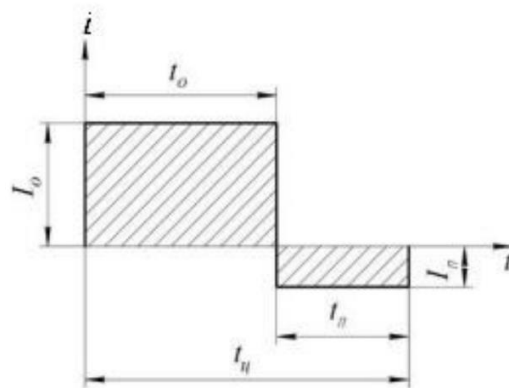


Рисунок 2.2 – Осцилограма $i(t)$ при балансі полярностей 60/40% (ПП/ЗП)

Аналіз результатів експерименту у статті [7] показав, що у період горіння дуги зворотної полярності при величині струму 5 А катодні плями інтенсивно переміщуються по окисленій поверхні металу, безпосередньо прилеглої до розплаву зварювальної ванни. При цьому ширина зони катодного розпилення поверхневої оксидної плівки попереду та по бокам ванни не перевищує 0,3 мм (рис. 2.3).

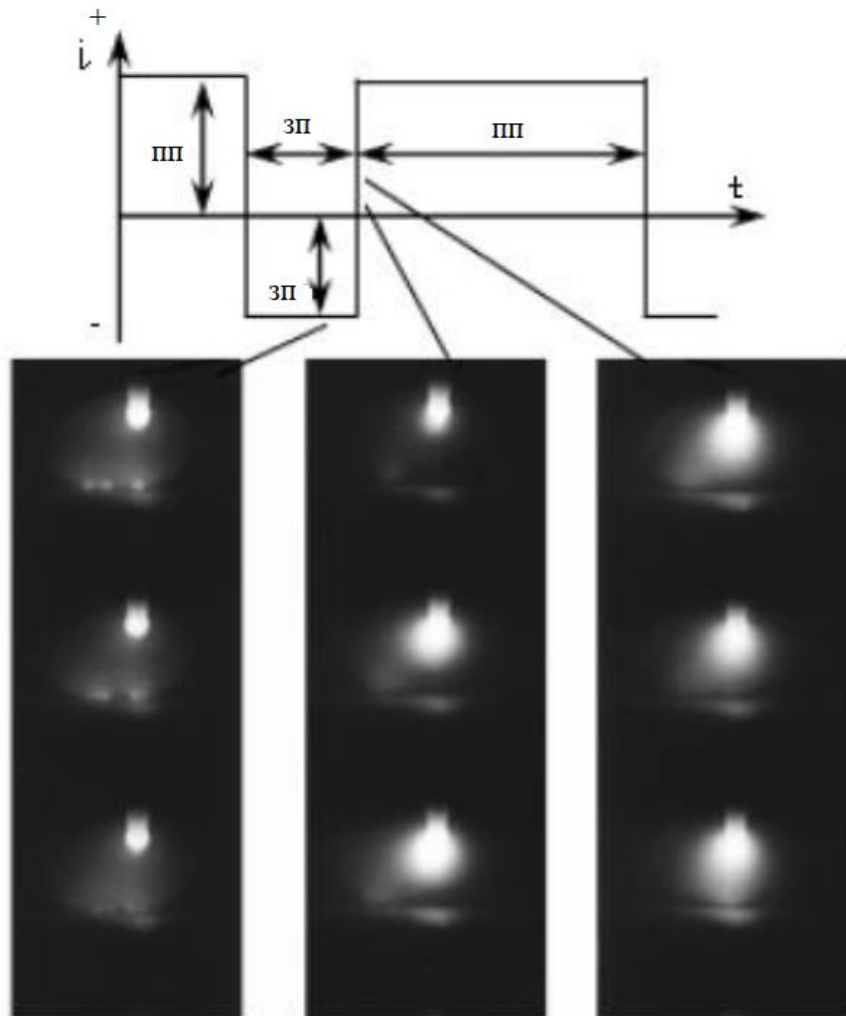


Рисунок 2.3 – Кінозйомка дуги при зміні полярності струму

Збільшення струму дуги зворотної полярності до рівня 32 А як на початку періоду її горіння, так і через деякий час сприяє розширенню зони інтенсивного переміщення катодних плям по окисленій поверхні. В цьому випадку ширина зони катодного розпилення, а отже, максимальне видалення катодних плям від зварювального розплаву ванни становить 16-18 мм. Аналогічний характер зміни ширини зони переміщення катодних плям зі збільшенням струму дуги зворотної полярності спостерігається при плавленні торцевої поверхні пластини з алюмінієвого сплаву. При цьому зі збільшенням струму дуга зворотної полярності переважно відхиляється від осі вольфрамового електрода, оскільки її спрямованість визначається взаємним розташуванням активних плям.

Встановлено факт впливу величини $I_{\text{ЗВ}}$ на зону очищення при зварюванні алюмінієвих сплавів.

2.3 Вплив балансу полярностей на ефективну потужність дуги

Для визначення впливу балансу полярностей на ефективну потужність дуги в роботі [19] запропоновано методику розрахунку ефективної потужності стиснутої дуги в аргоні, що передається від катодної та анодної зон у виріб. Розглядається дуга змінного струму прямокутної форми для $f = 50\text{Гц}$ з регулюванням тривалості прямої та зворотної полярності при зварюванні алюмінієвих сплавів неплавким електродом (рис. 2.4).

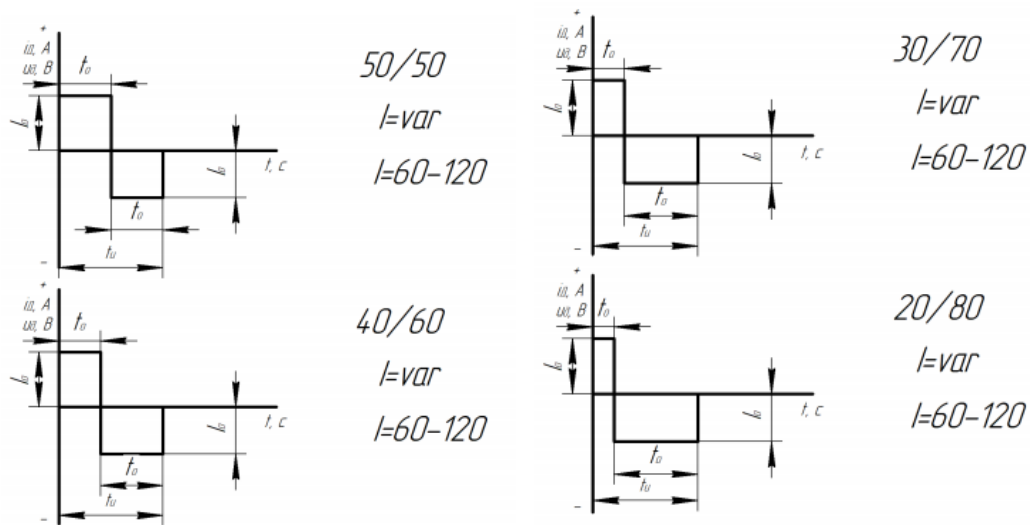


Рисунок 2.4 – Загальний вигляд осцилограми $I(t)$

Розрахунок ефективної потужності представлений у вигляді суми потужностей анодної та катодної області та потужності переданої виробу плазмоутворюючим аргонном:

$$q_i = q_{\text{п}} + q_{\text{з}} + q_{\text{р}}; \quad (2.1)$$

де $q_{\text{п}}$ і $q_{\text{о}}$ – потужності, яка передаються у виріб анодною та катодною зонами стиснутої дуги;

$q_{\text{р}}$ – потужність, яка передається виробу плазмоутворюючим аргонном;

$$q_{\text{п}} = q_{\text{пп}} \cdot I_{\text{п}};$$

$$q_{\text{з}} = q_{\text{зп}} \cdot I_{\text{з}};$$

де $I_{\text{з}}$ та $I_{\text{п}}$ – відповідно струми імпульсів прямої та зворотної полярності;

$q_{\text{пп}}$ і $q_{\text{зп}}$ – питомі ефективні потужності (на 1 А струму) від приелектродних зон у виробі на прямій та зворотній полярностях.

Розрахунок приелектродної потужності показав, що потужність на зворотній полярності у 1,73 рази вища, ніж на прямій.

Встановлено, що зі збільшенням частки зворотної полярності відбувається збільшення ефективної потужності.

Деяке зростання розрахункової ефективної потужності струму зі збільшенням часу горіння дуги пояснюється лінійним наростанням та спадом струму внаслідок електромагнітних процесів у джерелі живлення. Така осцилограма постійного струму мала місце при наплавленні точок вільною дугою на високолеговану сталь. Тому при однаковій установці струмів у дослідах відбувалося невелике збільшення їх середнього значення зі збільшенням часу дії дуги. Трапецеїдальна форма струму еквівалентна зменшенню часу дії дуги на час, що дорівнює напівсумі часу спаду та наростання струму. Це підтверджується тим, що зменшення часу зварювання у кожному з дослідів першої серії на 0,3 секунди призвело до зниження середнього відносного відхилення розрахункової ефективної потужності за абсолютною величиною з 9,1 до 5,8 %.

Так само було здійснено розрахунок приелектродної потужності, за результатами якої потужність на зворотній полярності в 1,73 рази вища, ніж на прямій.

Далі виконувався розрахунок зосередженості теплового потоку для різних балансів напівперіодів (60/40, 72/25, 90/10). В результаті було встановлено, що зі збільшенням частки зворотної полярності відбувається збільшення ефективної потужності.

Висновки за розділом

Аналіз технологічних властивостей зварювальної дуги змінного струму прямокутної форми показав, що форма струму може впливати на такі параметри як:

- 1) проплавлувальну здатність дуги (геометричні розміри шва);

2) розміри зони катодного очищення від оксидної плівки залежно від ефективної потужності прямої та зворотної полярності дуги при зварюванні сплавів Al;

3) величину ефективної потужності прямої та зворотної полярності дуги при регулюванні їх тривалості;

4) встановлено, що заміна синусоїдальної форми струму, яка має швидкість переходу струму через нуль $di/dt = 9,6 \text{ кА/с}$ на змінний струм прямокутної форми підвищує швидкість переходу струму через нуль до $di/dt > 100 \text{ кА/с}$, що забезпечує стабільність горіння дуги змінного струму;

5) доведено можливість регулювання величини зони катодного очищення при зварюванні сплавів Al на змінному струмі прямокутної форми;

6) перевірено можливість регулювати величину ефективної потужності дуги змінного струму прямокутної форми при зварюванні з $f = 50 \text{ Гц}$, регулюючи тривалість прямої та зворотної полярності. Оптимальним співвідношенням (при рівних струмах прямої та зворотної полярності) прийняти тривалість струму зворотної полярності 60-70% від періоду $T = 0,02 \text{ с}$.

3. МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ТОЧКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЮ

3.1 Обладнання для експериментальних досліджень

Відповідно до теми кваліфікаційної роботи передбачалось дослідити вплив неелектричних параметрів плазмотрона на формування зварної точки алюмінієвих сплавів змінним струмом прямокутної форми із використанням інвертора фірми BRIMA. Для цього було розроблено методику досліджень.

Дослідження проводяться на зразках із сплаву АМг-6 розміром 40x150x2 мм.

В якості джерела живлення застосовується інвертор TIG-200P AC/DC (рис. 3.1), технічна характеристика якого наведена в таблиці 3.1, а крутопадаючі вольтамперні характеристики інвертора показані на рисунку 3.2.



Рисунок 3.1 - Зовнішній вигляд інвертора TIG-200P AC/DC

Таблиця 3.1 – Технічні дані інвертора TIG-200P AC/DC

Параметри джерела живлення	Brima TIG-200P AC/DC
Напруга мережі, В	220
Напруга холостого ходу, В	56
Частота мережі, Гц	50/60
Максимальний зварювальний струм, А	200
Діапазон регулювання струму, А	10 – 200
Баланс змінного струму	20 – 80
Споживана потужність, кВт	5,9
ККД, %	85

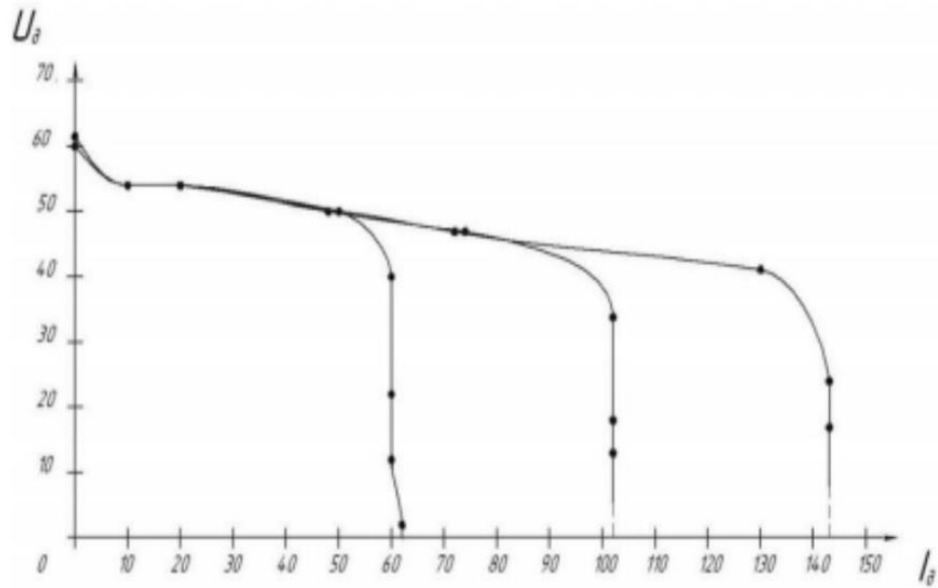
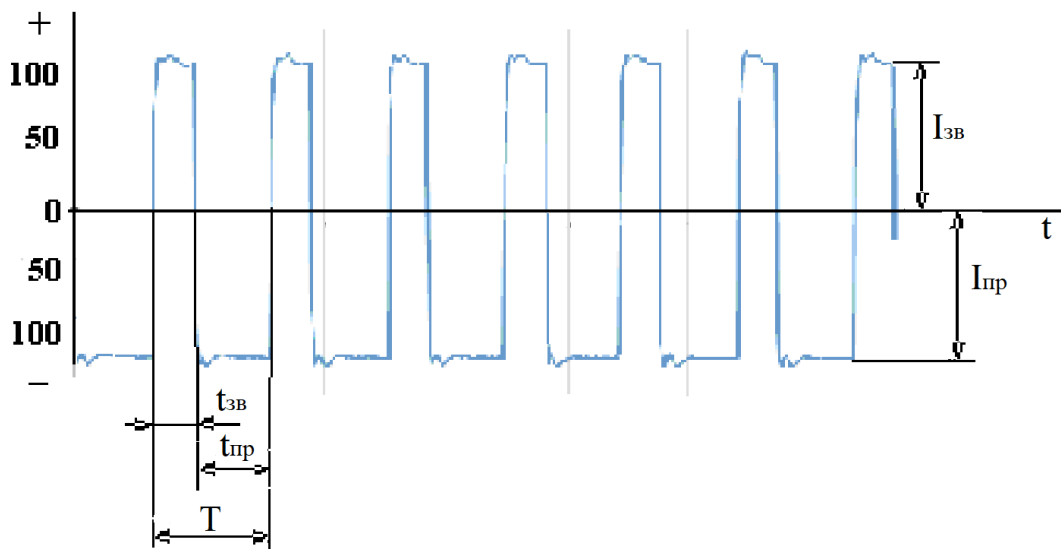
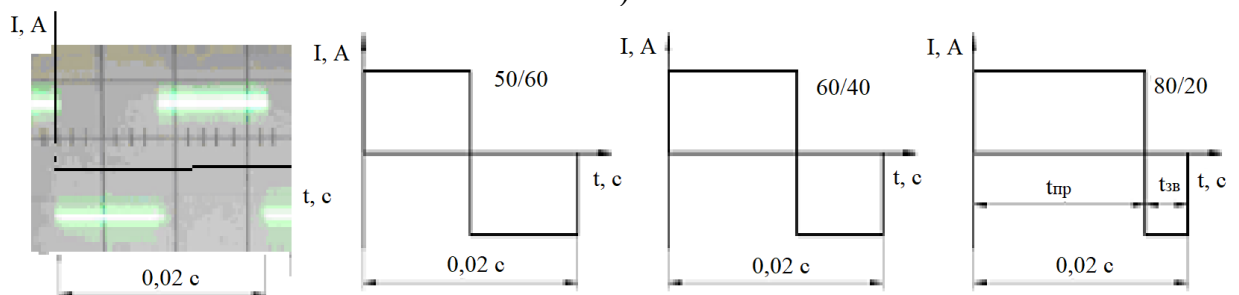


Рисунок 3.2 – Вольтамперні характеристики «Вірма TIG-200P AC/DC»

Рід струму інвертора - змінний прямокутної форми: $I_{\text{пр}} = I_{\text{зв}}$, $t_{\text{зв}}/t_{\text{пр}} = 52/47,8$ (рис. 3.3, а). Схема інвертора передбачає зміну балансу між прямою та зворотною полярністю (рис. 3.3, б).



а)



б)

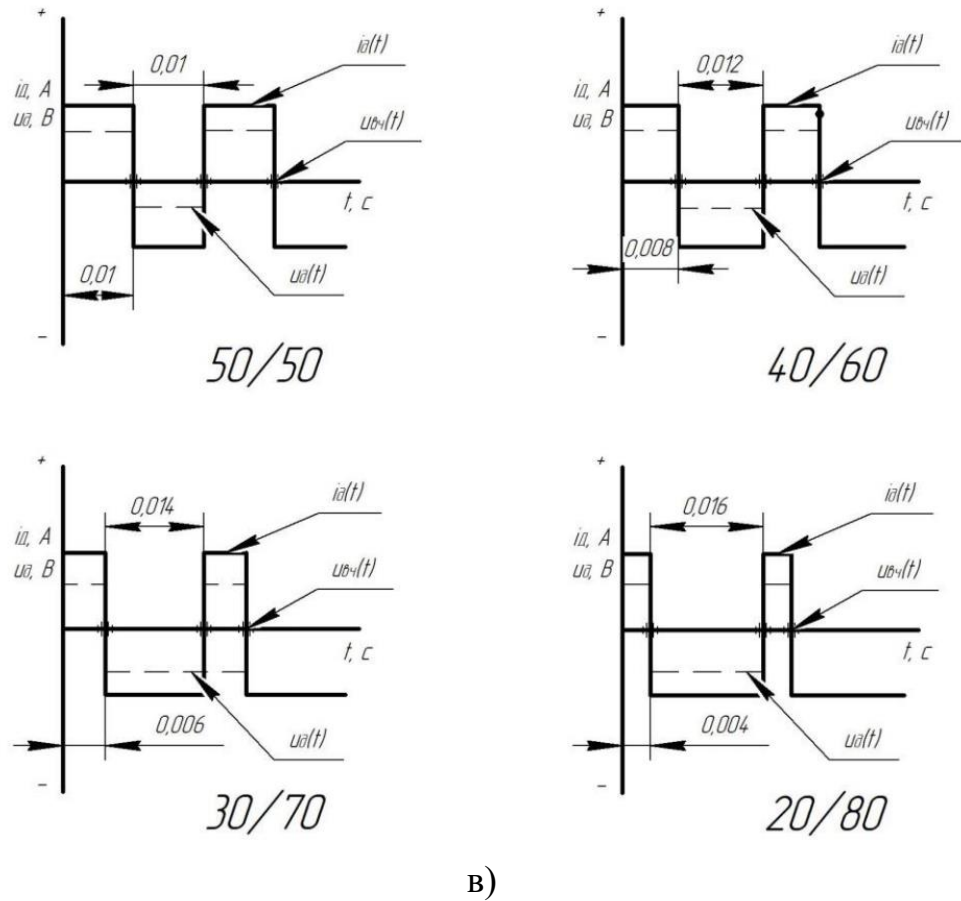


Рисунок 3.3 - Динамічні характеристики $i_d = f(t)$ та $u_{вч} = f(t)$

Перехід струму через нуль здійснюється високочастотними імпульсами (рис. 3.3, в).

Режим роботи інвертора - зварювання точками на змінному струмі (рис. 3.4).

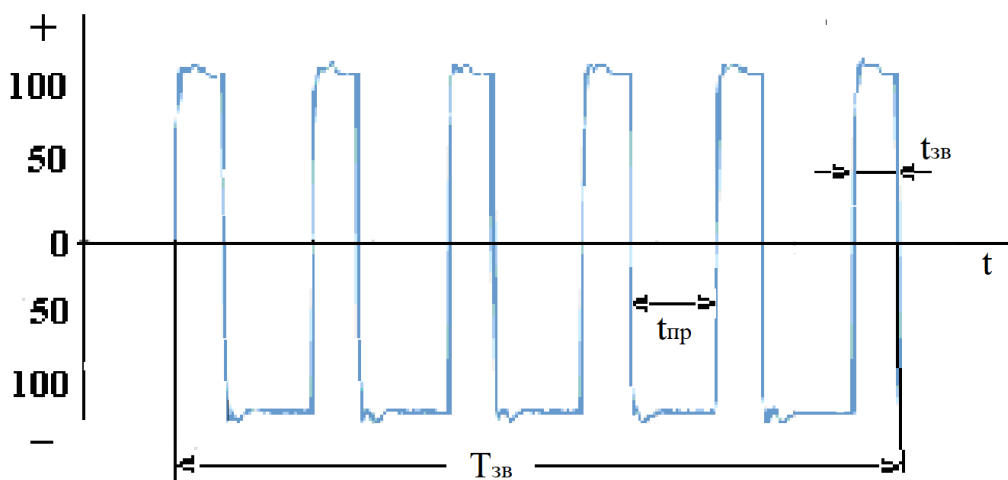


Рисунок 3.4 – Діаграма режиму 4 TIG-200 P

Дослідження проводяться стиснутою дугою з використанням плазмотрону ГВС-1, зовнішній вигляд якого наведено на рисунку 3.5, а технічні характеристики в у таблиці 3.2.

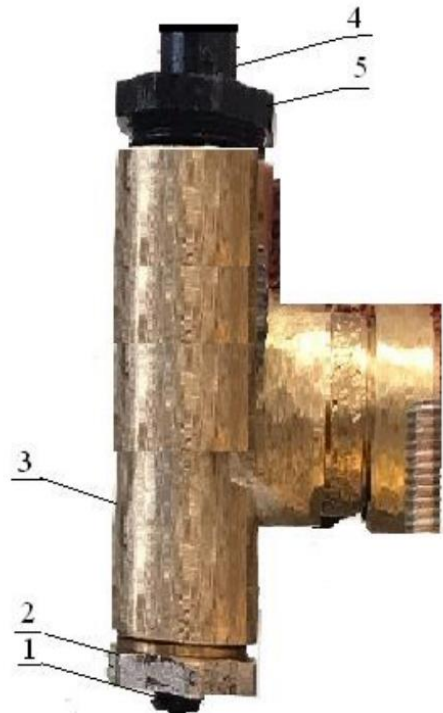


Рисунок 3.5 - Зовнішній вигляд плазмотрону ГВП-1

1 – сопло, 2 – тримач сопла 3 – корпус ГВС-1, 4 – подача газу, 5 – тримач електрода

Таблиця 3.2 – Технічні дані плазмотрона ГВС-1

Назва елемента	L, мм	d, мм	S _{стінки} , мм
Тримач сопла	25	20	10
Корпус	150	20	10
Шайба	45	20	13
Отвір подачі газу	35	10	5

У плазмотроні ГВС-1 застосовується вольфрамовий електрод діаметром 3,0 мм та довжиною не менше 150 мм.

Для проведення експериментів виготовлено 4 типи вставок плазмотрона, геометричні розміри яких наведено на рисунку 26.

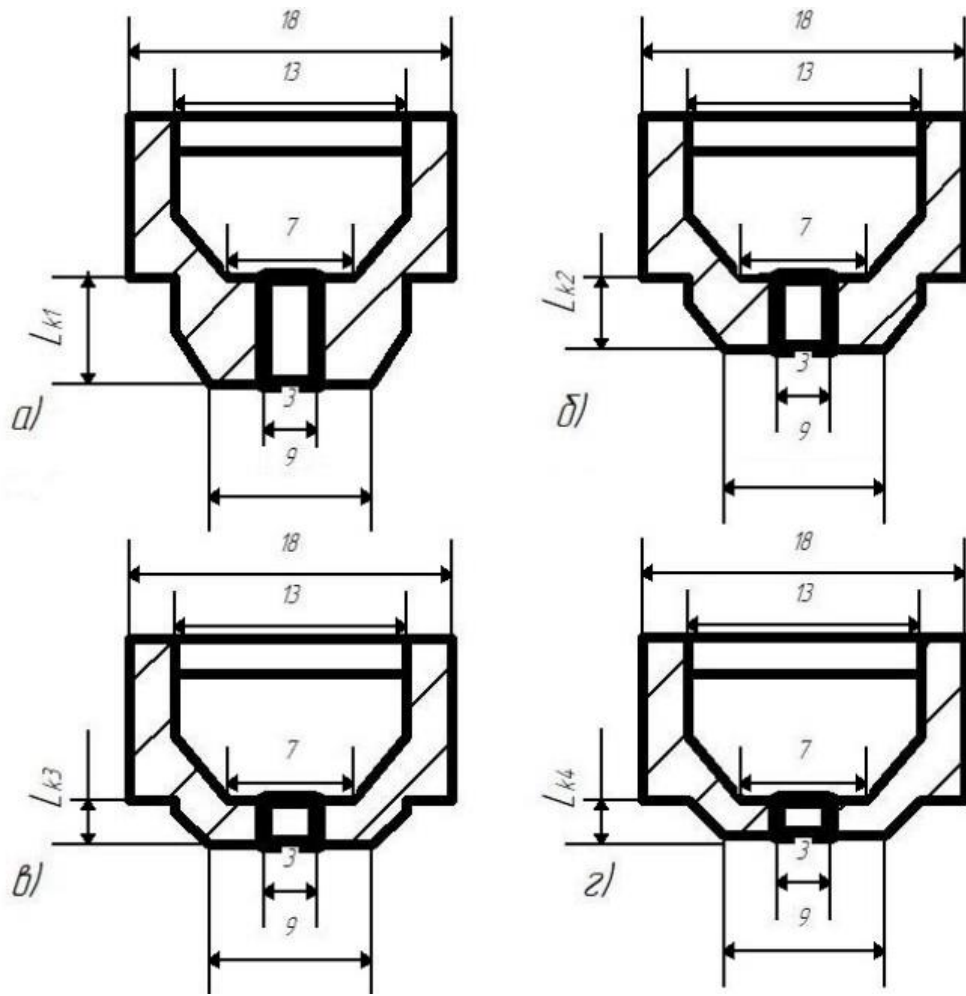


Рисунок 3.6 – Геометричні розміри вставок

а) $L_{k1} = 5,9$ мм; б) $L_{k2} = 4,0$ мм; в) $L_{k3} = 2,5$ мм; г) $L_{k4} = 2,0$ мм.

Довжина l_k , l_w регулюються вставками, а довжина відкритої ділянки дуги $l_{\text{відкр}}$ - лабораторним стендом (рис. 3.7).

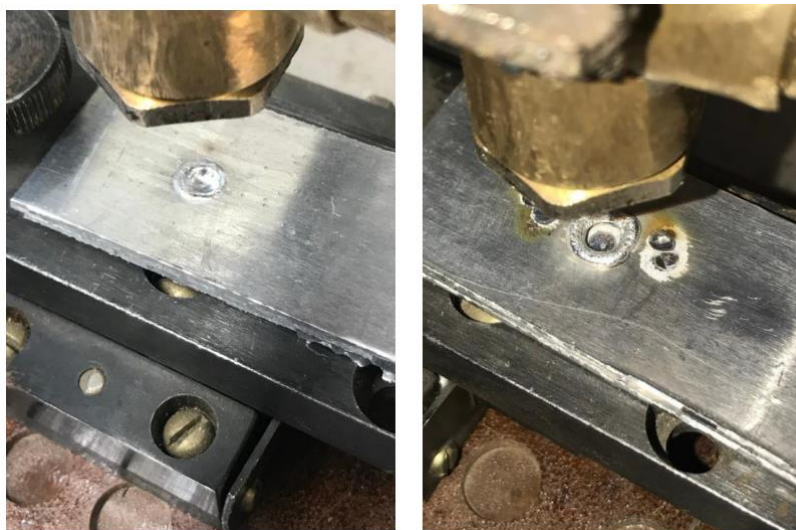


Рисунок 3.7 – Лабораторний стенд

Зразки на стенді притискаються вручну струбцинами із зусиллям 45 кг (рис. 3.8).

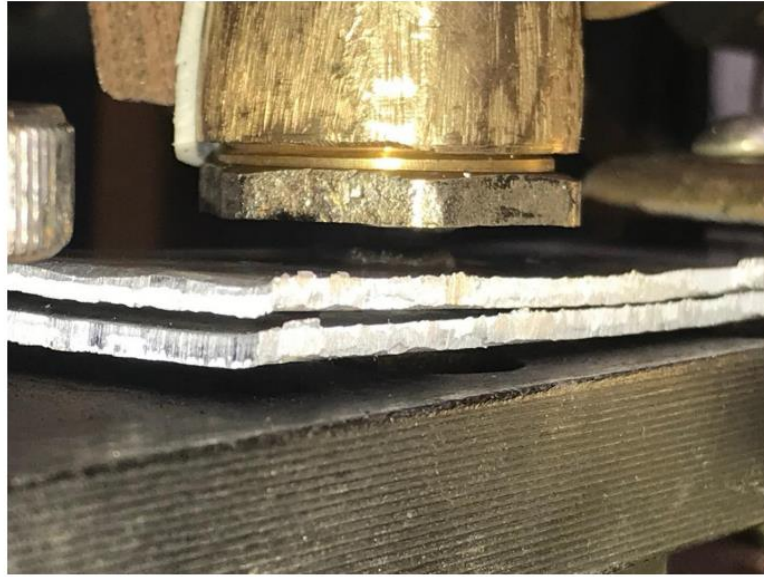


Рисунок 3.8 – Схема притискання зразків

Контроль електричних параметрів струму прямої та зворотної полярності: $I_{пр} = I_{зв}$, напруги, балансу полярностей $t_{зв}$ і $t_{пр}$, тривалості зварювання точки $T_{зв}$ виконувався осцилографом типу С1-55 та комп'ютером.

Контроль геометричних розмірів точки, а саме її зовнішній діаметр d_1 та діаметр проплавлення d_2 (рис. 3.9) проводиться за допомогою лінійки.

Досліджували залежності $U_{ст} = f(l_k)$, $U_{ст} = f(l_{відкр})$, $U_{ст} = f(l_w)$.

Визначаємо вплив окремих ділянок довжини стиснутої дуги на формування точки, для цього знімаємо залежності $U_{ст} = f(l_k)$, $U_{ст} = f(l_{відкр})$, $U_{ст} = f(l_w)$ і формуємо вимоги до оптимальних параметрів конструкції плазмотрона із стійким початковим збудженням стиснутої дуги.

Проводили серію експериментів, змінюючи довжину l_k .



Рисунок 3.9 – Геометричних розмірів точки

Першу серію експериментів проводимли, змінюючи довжину каналу сопла $l_k = 5,9; 4,0; 2,5; 2$ мм. У цьому випадку довжина стиснутої дуги $l_{ст}$ під час експерименту змінюється від 5 до 8,9 мм:

$$l_{ст} = l_{відкр} + l_k + l_w = 2 + 5,9 + 1 = 8,9 \text{ мм};$$

$$l_{ст} = l_{відкр} + l_k + l_w = 2 + 4,0 + 1 = 7,0 \text{ мм};$$

$$l_{ст} = l_{відкр} + l_k + l_w = 2 + 2,5 + 1 = 5,5 \text{ мм};$$

$$l_{ст} = l_{відкр} + l_k + l_w = 2 + 2,0 + 1 = 5,0 \text{ мм}.$$

Експерименти проводились на лабораторному стенді (рис. 3.7).

Використовувався сплав АМГ-6 із товщиною кожної пластини 2 мм, із силою притискання 45 кг.

3.2 Особливості конструкції плазмотрону для зварювання стиснутою дугою змінного струму з прямокутними імпульсами

Для проведення подальших експериментальних досліджень з електродугового точкового зварювання сплавів АМГ-6 та АМГ-3 на змінному струмі прямокутної форми спроектований та виготовлений спеціальний плазмотрон ГВС-1 (рис. 3.10).

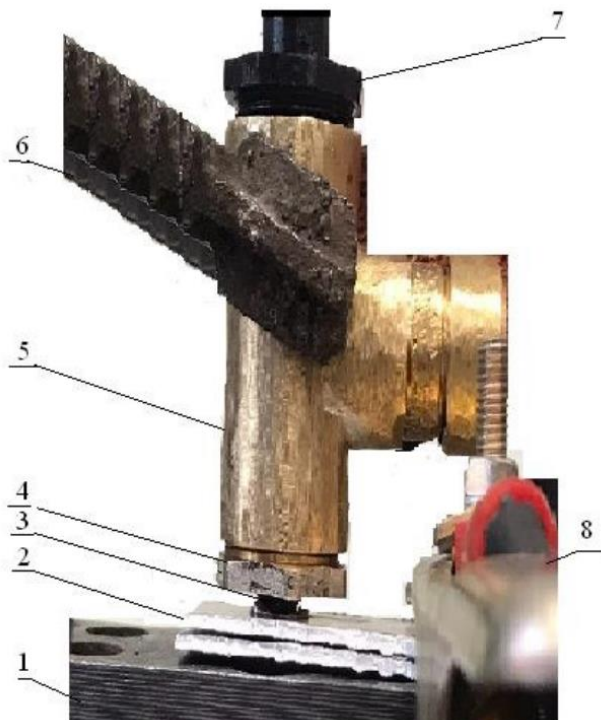


Рисунок 1.10 – Схема конструкції ГВС-1

- 1 - зварювальний стіл;
- 2 - алюмінієві пластини;
- 3 – сопло; 4 – тримач сопла;
- 5 – корпус ГВС-1; 6 - тримач корпусу; 7 - фіксатор електрода та місце подачі газу; 8 – притискач

Плазмотрон ГВС-1 складається з корпусу, який виконаний з трійника. Сам корпус фіксується тримачем. Тримач для сопла вкручується в корпус і фіксує сопло у горизонтальному положенні, зверху вкручується фіксатор для електрода, що не плавиться, та подачі захисного газу. Конструкція сопла була доопрацьована відповідно до роботи [9], тому дана конструкція забезпечує максимальний захист від утворення подвійної дуги.

Конструкція сопла плазмотрону виконана з різною довжиною каналу наведена на рисунку 3.11.

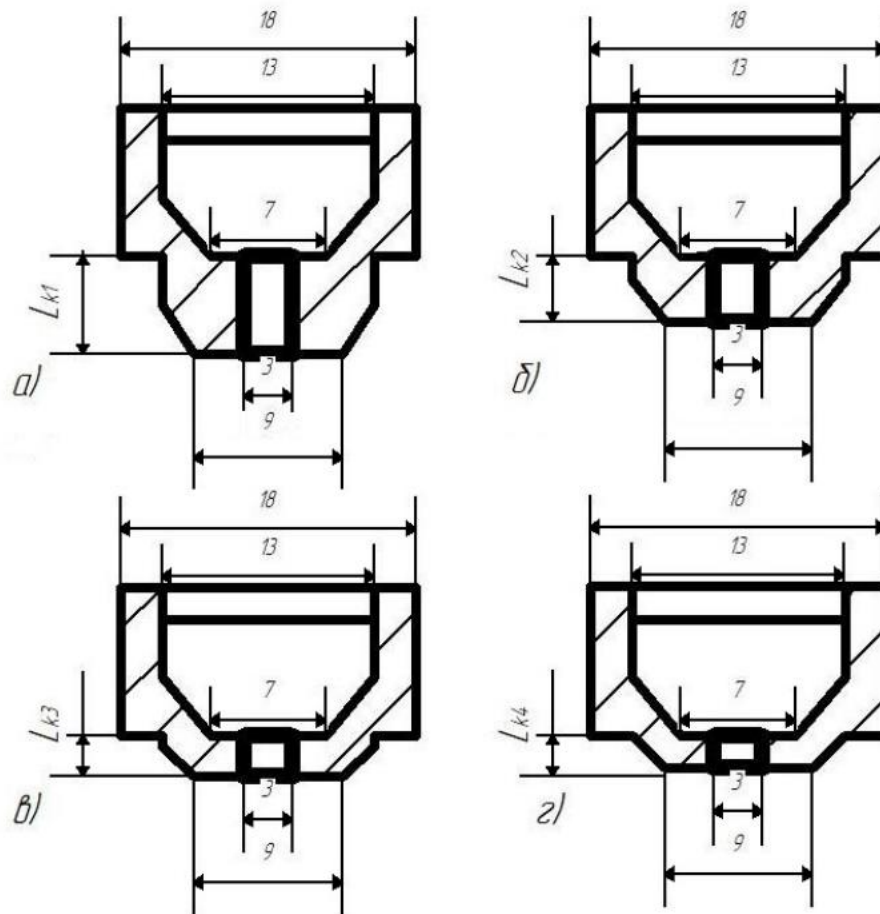


Рисунок 3.11 – Конструкція сопла експериментального плазмотрона

а) $L_{k1} = 5,9$ мм б) $L_{k2} = 4,0$ мм в) $L_{k3} = 2,5$ мм г) $L_{k4} = 2,0$ мм

Довжину каналу L_k змінюємо від 2,0 мм до 5,9 мм до огляду на досвід роботи авторів [20, 29].

З робіт [20, 29] відомо, що $U_{ст}$ залежить від $l_{ст}$, яка визначається, як складова від $l_{ст} = l_{відкр} + l_k + l_w$

де $l_{відкр}$ - довжина відкритої дуги;

l_k - довжина дуги в корпусі сопла;

l_w - довжина дуги від W електрода до сопла.

На рисунку 3.12 наведено схему визначення складових стиснутої дуги.

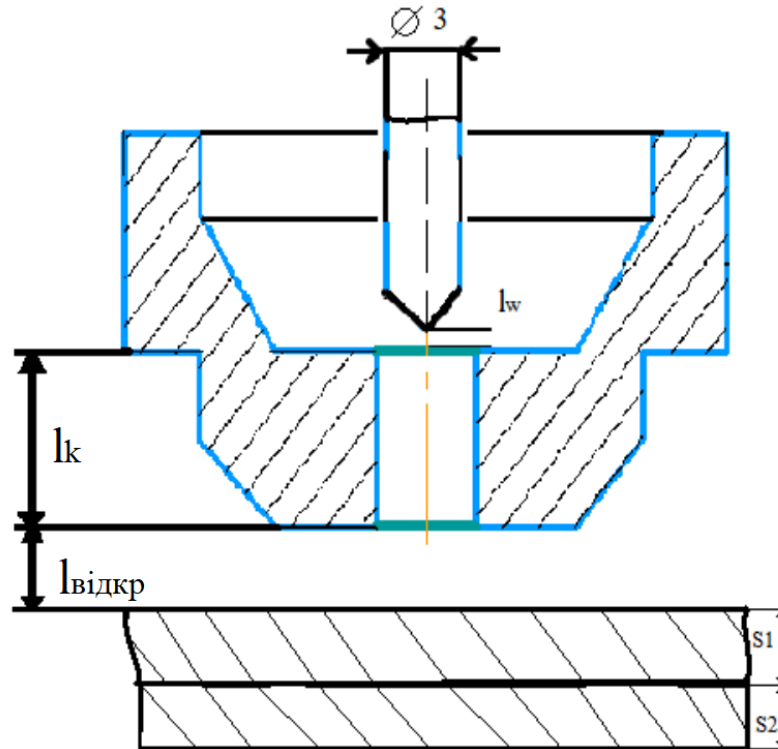


Рисунок 3.12 – Схема визначення складових стиснутої дуги

$l_{\text{відкр}}$ – довжина відкритої дуги; l_k – довжина дуги в корпусі сопла; l_w – довжина дуги від W електрода до сопла; $S1 = S2 = 2\text{мм}$

Попередні випробування плазмотрона ГВС-1 у комплекті з інвертором TIG-200PAC/DC при зварюванні зразків зі сплаву АМГ-6 дозволили визначити оптимальні геометричні параметри: $l_{\text{відкр}}$, l_k , l_w , d_c . Перелічені параметри належать до неелектричних параметрів режиму зварювання.

Плазмотрон ГВС-1 для проведення експериментальних робіт з електродугового точкового зварювання сплаву АМГ-6 змінним струмом прямокутної форми, оснащений комплектом сопел з різною величиною l_k , і d_c , дозволяє провести дослідження, оцінити вплив неелектричних параметрів на формування зварної точки.

3.3 Методика та результати дослідження формування зварної точкового з'єднання алюмінієвих пластин товщиною 2 мм

Аналіз технологічних властивостей зварювальної дуги змінного струму прямокутної форми показав, що сучасне обладнання ефективно при зварюванні точок стиснутою дугою змінного струму алюмінієвих сплавів типу АМг-6 та АМг-3. Тому експериментальним шляхом визначаються параметри режиму зварювання, які забезпечують стабільне формування точки на серійному обладнанні. Для цього проводимо серію експериментів, для чого організували зварювальний пост, до складу якого входить наступне обладнання та прилади:

1. Плазмотрон типу ГСД-1 (випускається серійно);
2. Джерело живлення змінного струму прямокутної форми TIG-200 P AC/DC фірми BRIMA;
3. Експериментальний зварювальний стенд типу СПО-1;
4. Контрольно-вимірювальна апаратура: амперметри, вольтметри, витратоміри Ar , H_2O , осцилограф с1-55, комп'ютер, а також щупи.

Схема зварювального посту з увімкненими приладами наведена на рисунку 3.13.

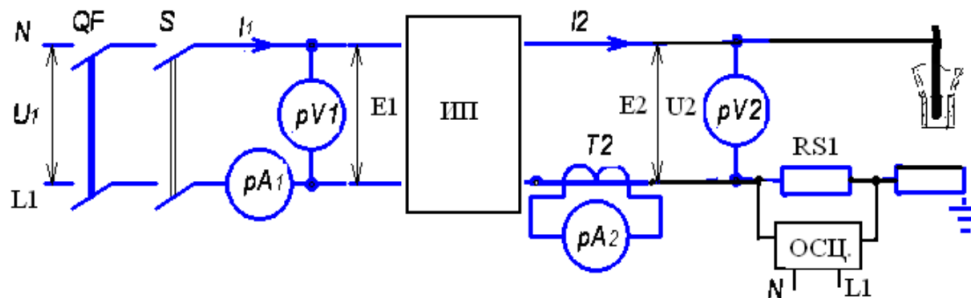


Рисунок 3.13 - Схема зварювального посту з приладами
 I_1 , I_2 , U_1 , U_2 , $i = f(t)$, $u = f(t)$ - електричні параметри

Зварювання здійснювали за допомогою джерела живлення TIG-200 P на змінному струмі прямокутної форми із частотою 50Гц, динамічні характеристики якого наведено на рисунку 3.14. Параметри струму визначаються за динамічними характеристиками осцилографом типу С1 -55 [21].

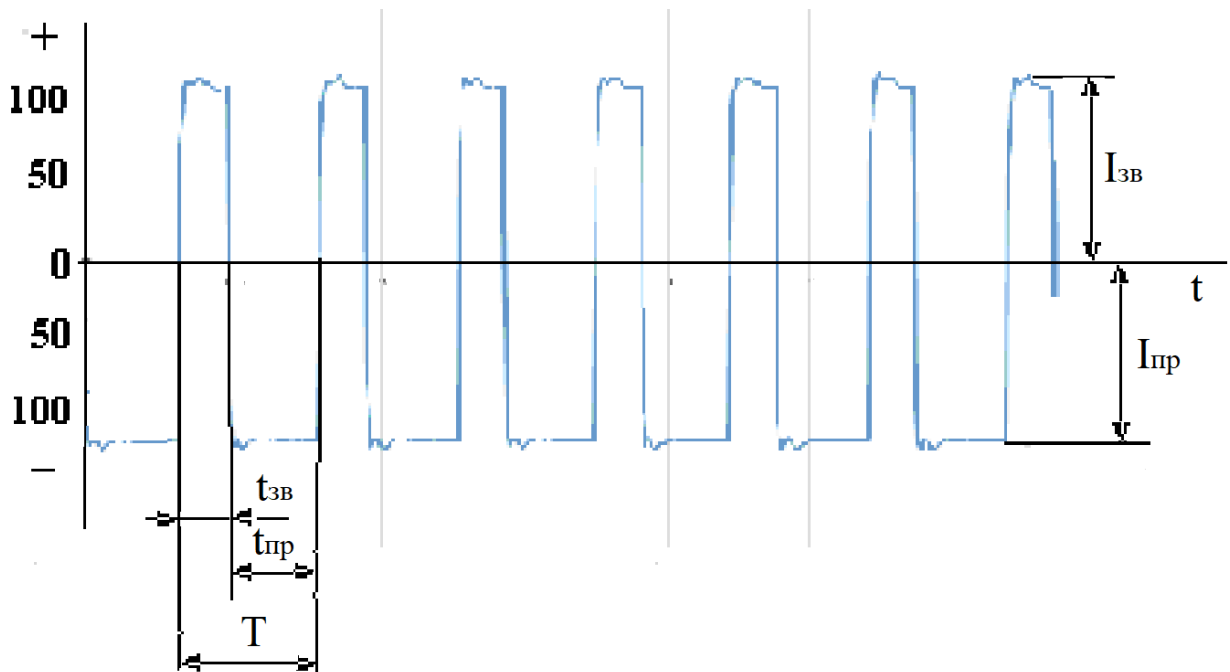


Рисунок 3.14 – Осцилограма зварювального струму $i=f(t)$

$I_{пр}$, $I_{зв}$, $t_{зв}$, $t_{пр}$, $t_{пр}/t_{зв}$, f , $I_{пр} = I_{зв}$ - параметри зварювального струму

Окремо наведено рисунок 3.15 з позначенням неелектричних параметрів стиснутої дуги, контроль яких потрібно вести.

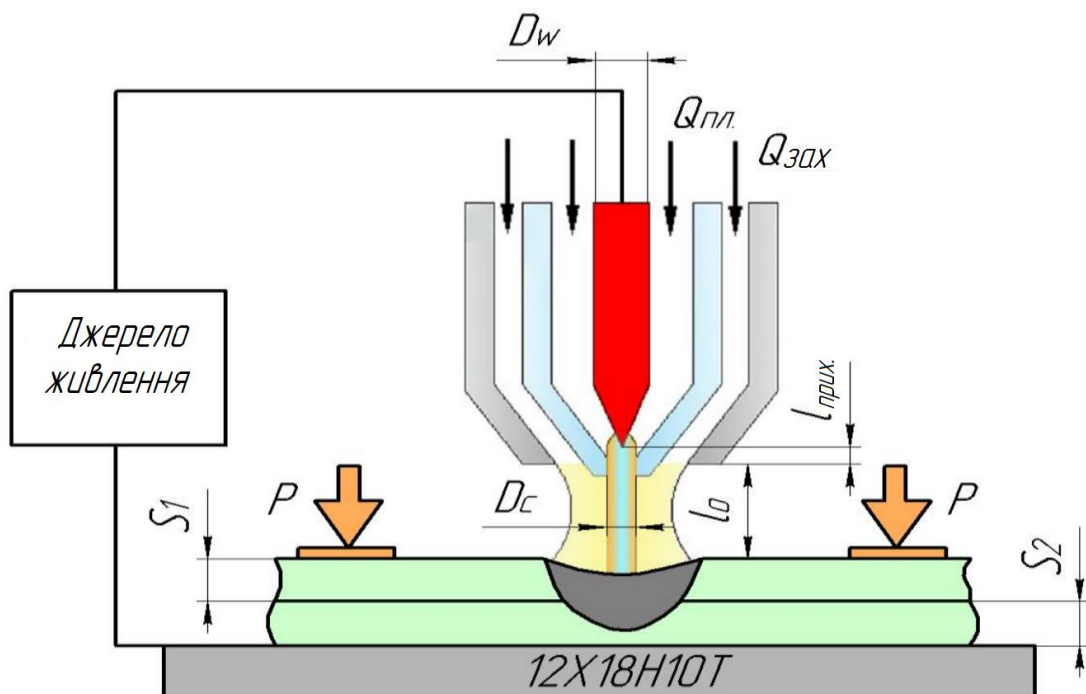


Рисунок 3.15 – Схема плазмотрону типу ГСД-1

D_w , D_c , $Q_{пл}$, $Q_{зах}$, $l_{прих}$, l_d , $S_1 = S_2$, P - неелектричні параметри

Параметри зварної точки визначаємо відповідно до рисунку 3.16.

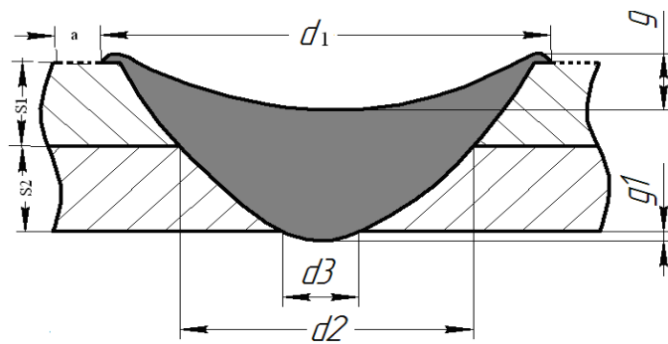
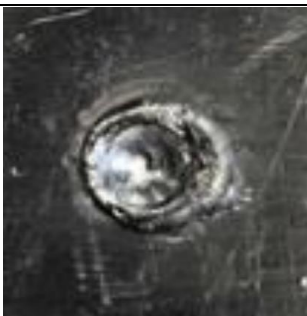





Рисунок 3.16 – Геометричні розміри зварної сполуки

d_1 , d_2 , d_3 , g , g_1 , a – параметри зварної точки та зони очищення

Експериментальні дані зі зварювання стиснутою дугою, виконаного на обладнанні, яке серійно випускається, зводимо в єдину таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 - Результати експериментів зі зварювання (2+2) мм *

№	Зварювальна точка	$t_{зв}$, с	$I_{зв}$, А	d_1 , мм	d_2 , мм	Q_{Ar} , л/хв	Примітка
1		7	100	11,5	-	4	Дуга запалилася, довжина електрода не змінювалася. При розплавленні Al видувало не рівномірно. Проплавилася тільки верхня пластина.
2		8	100	11,5	4,5	4	Дуга залилася, довжина електрода не змінилася. Обидві пластини проплавились і вийшов отвір.
3	-	-	100	-	-	4	Дуга не спалахнула, була іскра. Збільшуємо довжину l_d
4	-	-	100	-	-	4	
5	-	-	100	-	-	4	

6		7	100	12	6	4	Перша пластина проплавилася і почала плавитися друга, але виникла критична ситуація при якій утворилася подвійна дуга
7		7	100	12	7	4	Перша пластина проплавилася. На видутому Al видно чорні цятки. Це ознака того, що знову утворилася подвійна дуга
8	-	-	75	-	-	2,5	Дуга не горить
9	-	-	80	-	-	3	Дуга не запалилась
10		10	85	15	8	3	Перша пластина розплавилася. Видутий алюміній розподілився нерівномірно, а значить подача була нерівномірна
11	-	-	100	-	-	3	Дуга не запалилась
12		5	100	12	7	4	При розплавленні другої пластини на ній залишилася оксидна плівка.
13	-	-	100	-	-	4	Дуга не запалилась
14		5	100	12	6	4	Видно проплавлення першої пластини, але пластина під нею, не почала плавитися. Можливо через погане з'єднання між пластинами
* $f = 50\text{Гц}$, $I_{\text{пр}} = I_{\text{зв}}$, $i = f(t)$ наведено на рис. 3.14							

У цій серії експериментів отримали всі зразки з погано сформованою точкою. Проте зниження витрати захисного газу залишає надію сформувати якісну точку.

У процесі проведення експериментів виявлено виникнення подвійної дуги. У зв'язку з цим проведено розробку вставки з $d_c = 3$ мм та 2 мм для плазмотрону ГСД-1. Конструкція вставки представлена на рисунку 3.17 [1].

Доопрацювавши конструкцію плазмотрону ГСД-1, провели ще другу серію експериментів, зменшивши витрати захисного газу.

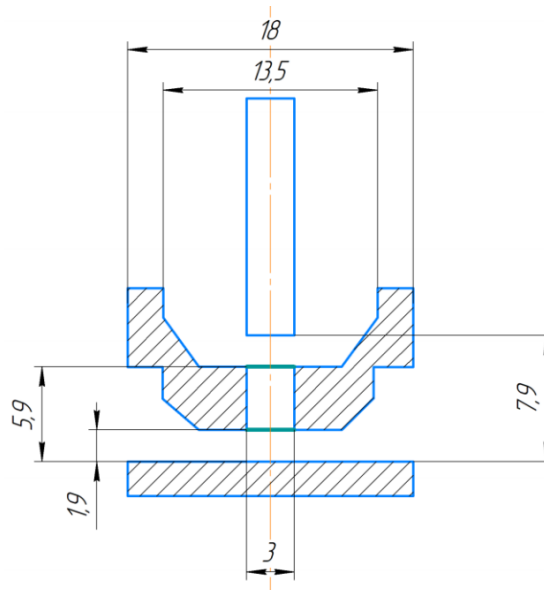


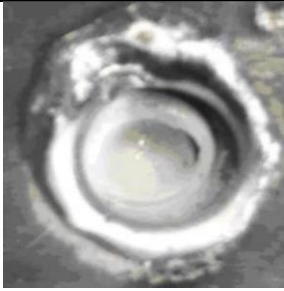

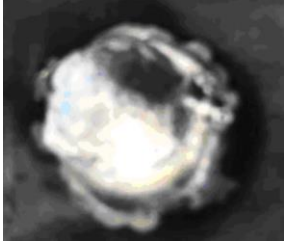
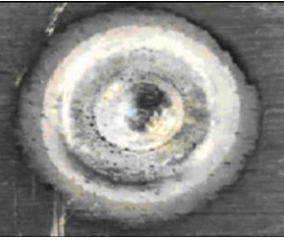
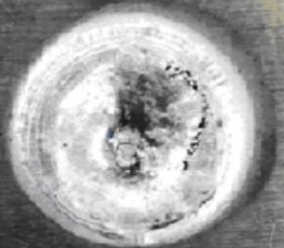
Рисунок 3.17 - Конструкція вставки

На цьому етапі зварювання точок стиснутою дугою змінного струму алюмінієвих сплавів прямокутної форми проводиться з регулюванням таких параметрів, як співвідношення $t_{пр}/t_{зв}$, $Q_{ар}$, $t_{зв}$, I_d , що дозволить визначити роль параметра режиму формування точки.

Враховуючи результати експериментів першого етапу, на якому виявлено вплив витрати захисного та плазмоутворюючого газу проведемо експерименти, змінюючи витрату аргону від 0,6 до 3 л/хв. Зберігаючи величину струму, яка дорівнює 100 А при тривалості зварювання 7 с. Вставка для ГСД-1 взята з $d = 3$ мм.

Результати експерименту зведено в таблицю 3.4.

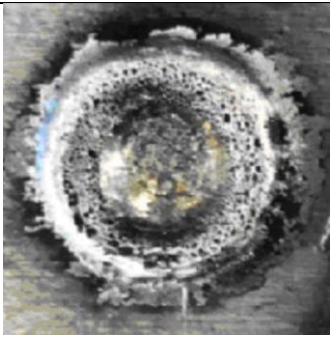

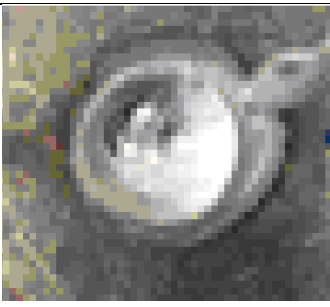
Таблиця 3.4 – Результати експерименту при $Q_{зах} = var$

№ точки	Зварна точка	$I_{амп}, A$	$d_1, мм$	$d_3, мм$	$Q_{захAr}$ л/хв	$t_{зв}, с$
12		100	11,5-13	7	3	7
15		100	10	10	1,0	7
16		100	9	9	0,8	7 брак
17		100	7	7	0,6-0,7	7
18		100	11,5	11	0,6	7
* $d_W = 3 мм, l_d = 1,5 мм, D_c = 3мм, l_{прих} = 2 мм, t_{зв} = 7 с, f = 50 Гц, P = 45 кг,$ $S1=S2 = 2 мм, t_{зв}/t_{пр} = 60/40$						

В результаті експерименту найкращі результати отримані при витраті аргону $Q_{зах} = (0,6-1)$ л/хв.

Результати дослідження при зміні часу зварювання наведено у таблиці 3.5. Осцилограма струму показано на рисунку 3.18.

Таблиця 3.5 – Результати експерименту при $t_{зв} = \text{var}$

№ точки	Зварна точка	$I_{амп}, A$	$d_1, мм$	$d_3, мм$	$Q_{захАг}$ л/хв	$t_{зв}, c$
19		100	16	12-12,5	1,0	10
15		100	10	10	1,0	7
20		10	9,5	9,0	1,0	5
* $d_w = 3 \text{ мм}, l_d = 1,5 \text{ мм}, D_c = 3 \text{ мм}, l_{прих} = 2 \text{ мм}, Q_{захАг} = 1,0 \text{ л/хв}, f = 50 \text{ Гц}, P = 45 \text{ кГ}, S1 = S2 = 2 \text{ мм}, t_{зв}/t_{пр} \sim 60/40$						

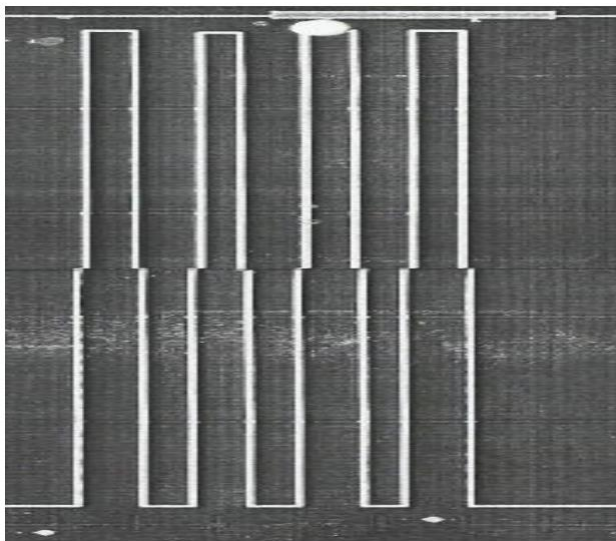


Рисунок 3.18 - Осцилограма

струму

$$i=f(t): I_{пр} = I_{зв} = 100 \text{ А},$$

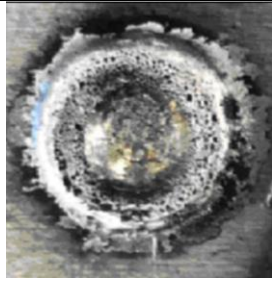

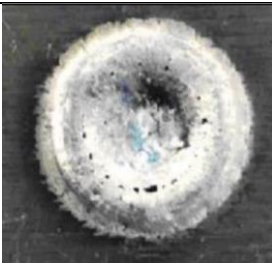
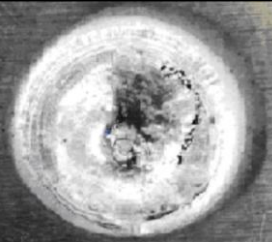
$$t_{зв} / t_{пр} = 60/40$$

Найкращі результати отримані за тривалості зварювання 7 с.

Визначивши витрату захисного газу та тривалість зварювання, визначимо вплив величини струму, враховуючи, що $I_{пр} = I_{зв}$.

Результати експерименту при зміні струму прямої та зворотної полярності показані у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 - Результати експериментів при $I_{пр} = I_{зв} = var$



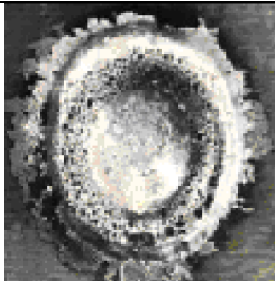

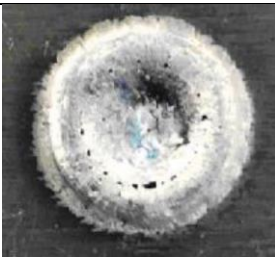
№ точки	Зварна точка	$I_{амп}, A$	$d_1, мм$	$d_3, мм$	$Q_{захAr}$ л/хв	$t_{зв}, с$
21		85	7	6,5	1,0	7
22		90	6,5	6	1,0	7
15		100	10	10	1,0	7
18		120	11,5	11	1,0	7
* $d_w = 3 мм, l_d = 1,5 мм, D_c = 3мм, l_{прих} = 2 мм, Q_{захAr} = 1,0 л/хв, f = 50 Гц, P = 45 кГ, S1 = S2 = 2 мм, t_{зв}/t_{пр} \sim 60/40$						

Змінюючи струм в діапазоні від 100 до 120 А, вдається сформувати точку з необхідними параметрами d_1 та d_3 при зварюванні з'єднання 2+2 мм на сплаві АМГ-6.



Інвертор TIG-200P AC/DC має 4 режими балансу тривалостей прямої та зворотної полярності, тобто має широку можливість регулювати тепловкладення у ванну, тому проведемо серію експериментів, регулюючи баланс тривалостей.

Результати експерименту при зміні полярностей подано в таблиці 3.7, а його осцилограма показана на рисунку 3.19.

Таблиця 3.7 - Результати експерименту при $t_{пр}/t_{зв} = var$

№ точки	Зварна точка	$I_{амп},$ А	$d_1,$ мм	$d_3,$ мм	$Q_{захAr}$ л/хв	$t_{зв},$ с	$t_{пр}/t_{зв}$
23		100	8	7,5	1	7	33,3/66,6
24		100	7,5	6	1	7	36,4/63,6
25 (B)		90- 100	7	6,5	1	7	40/60
26		100	6	5,5	1	7	52/47,8
27 (15B)		100- 120	11,5	11	1	7	60/40

Продовження таблиці 3.7

28 (15M)		100- 120	7	6	1	7	60/40
29 (16M)		100- 120	7,5	6,5	1	7	50/50

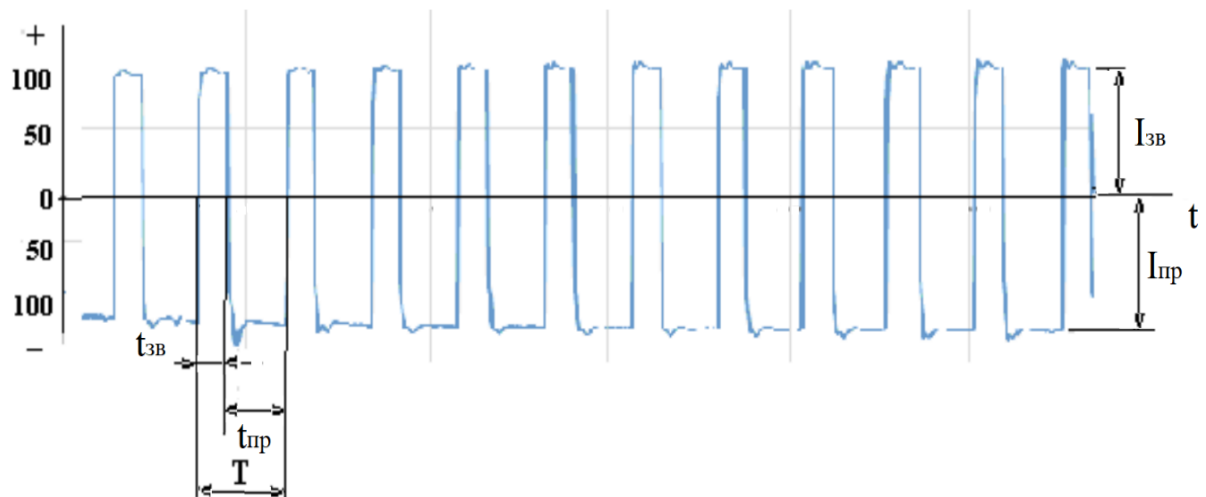


Рисунок 3.19 - Осцилограма струму

$$i = f(t): I_{пр} = I_{зв} = 100\text{A}, t_{зв}/t_{пр} = 36,4 / 63,6$$

У процесі проведення експериментів виявлено режими, які супроводжуються виникненням подвійної дуги. При цьому порушується стабільність процесу.

Схема утворення подвійної дуги наведена на рисунку 3.20, а результаті її впливу на сопло плазмотрона – на рисунку 3.21.

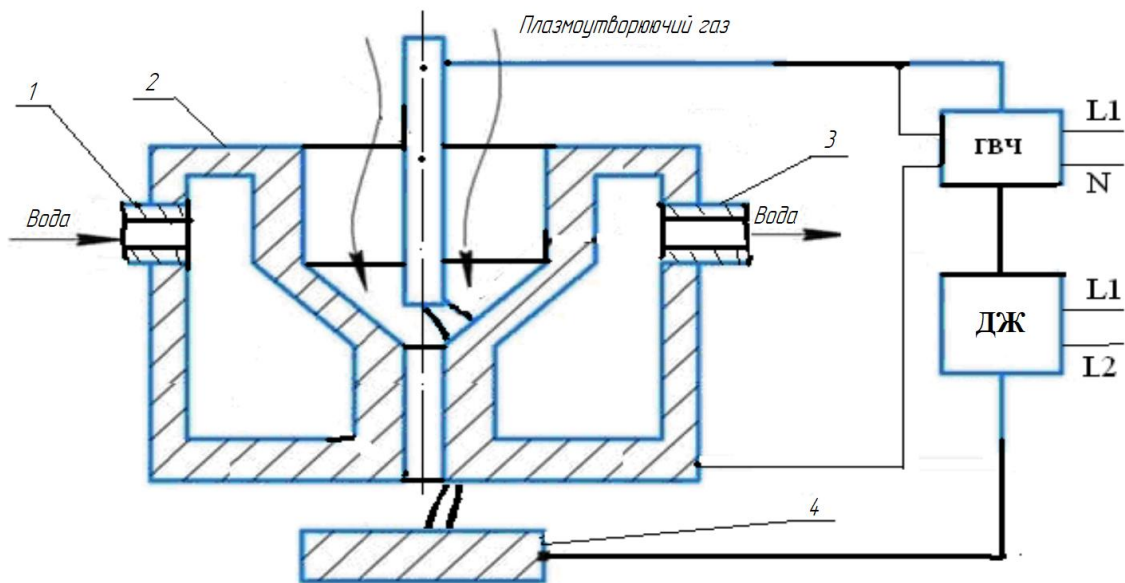


Рисунок 3.20 - Схема утворення подвійної дуги

1,3 – штуцера; 2 – сопло; 4- виріб; ГВЧ-осцилятор ОСПЗ-300; ДЖ - TIG-200P
AC/DC

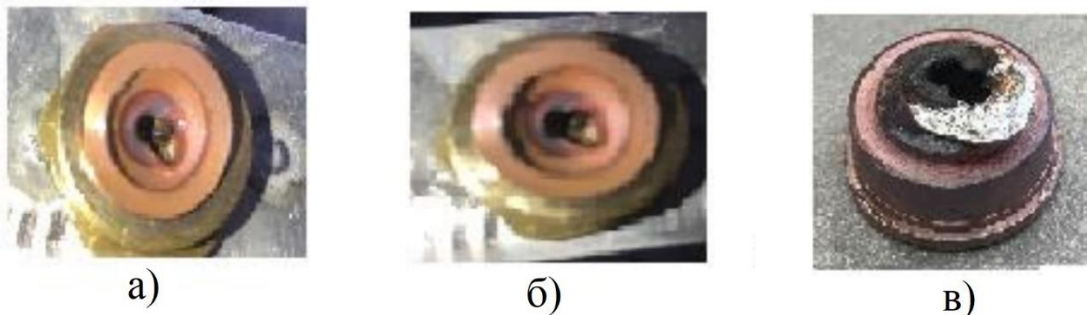


Рисунок 3.21 – Результат впливу подвійної дуги на сопло

Виникнення подвійної дуги добре вивчене при зварюванні сталей стиснутою дугою на постійному струмі. На змінному струмі синусоїдальної форми подвійна дуга відома, але вивчена мало. Застосування для зварювання стиснутою дугою інверторів змінного струму з прямокутною формою - явище мало вивчене. В інверторі TIG-200P схема передбачає наявність блоку імпульсів високої частоти, який працює з частотою 50 Гц при переході струму через нуль. Є припущення, що ці імпульси провокують появу подвійний дуги.

Результати експерименту при $t_{пр}/t_{зв} = var$ показали, що існують режими, коли точка формується добре, особливо при відношенні 60/40 %.

Таким чином, найбільший вплив на геометричні характеристики точки надає сила зварювального струму та час зварювання, на зону очищення від катодної плівки впливає баланс полярностей. Основною проблемою в даному випадку є проблема виникнення подвійний дуги.

3.4 Вплив параметрів плазмотрону на формування зварної точки

Змінюючи довжину каналу сопла, визначимо залежність $U_{ст} = f(l_k)$ (рис. 3.22). При цьому максимальна довжина стиснутої дуги визначається за формулою

$$l_{ст} = l_{відкр} + l_k + l_w \quad (3.1)$$

Режим зварювання: витрата аргону 1 л/хв, струм 100 А (4 режим TIG-200P AC/DC). Визначаємо залежність $U_{ст} = f(l_k)$ при встановленні $l_{відкр} = 1,9$ мм, $l_w = 1,0$ мм (рис. 3.23). Довжину дуги від електрода W до сопла l_w пов'язують із подвійним дугоутворенням, що призводить до руйнування сопла. Тому рекомендують $l_w \leq 1$ мм.

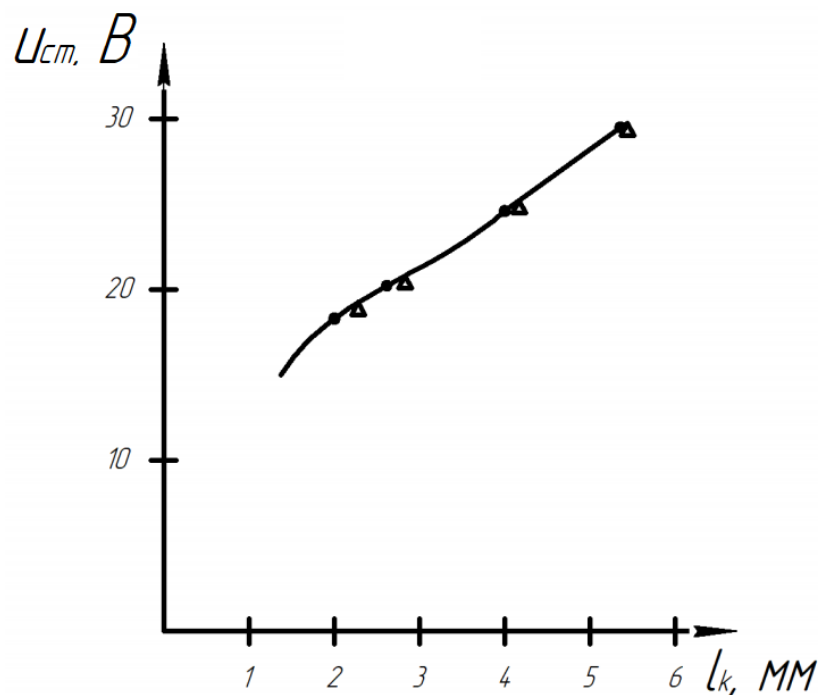


Рисунок 3.22 – Залежність $U_{ст} = f(l_k)$

Експеримент проводимо змінюючи довжину каналу: $L_{k1} = 59$ мм; $L_{k2} = 4,0$ мм; $L_{k3} = 2,5$ мм; $L_{k4} = 2,0$ мм. За результатами експерименту будували залежність $U_{ст} = f(l_k)$ (рис. 3.22). Конструкція плазмотрону забезпечує $U_{ст} = 30$ В за довжини каналу 5,9 мм. Це добрий результат для плазмотрона ГВС-1.

Рекомендуємо $L_{k2} = 4,0$ мм.

Довжину стиснутої дуги можна змінювати і за рахунок відкритої довжини складової стиснутої дуги $l_{відкр}$ в діапазоні від 1,0 до 5,0 мм, тоді $l_{ст}$ буде змінюватися від 6 до 10 мм, як показано в (3.2):

$$l_{ст} = l_{відкр} + l_k + l_w = 1 + 4 + 1 = 6 \text{ мм}; \quad (3.2)$$

$$l_{ст} = l_{відкр} + l_k + l_w = 2 + 4 + 1 = 7 \text{ мм};$$

$$l_{ст} = l_{відкр} + l_k + l_w = 3 + 4 + 1 = 8 \text{ мм};$$

$$l_{ст} = l_{відкр} + l_k + l_w = 4 + 4 + 1 = 9 \text{ мм};$$

$$l_{ст} = l_{відкр} + l_k + l_w = 5 + 4 + 1 = 10 \text{ мм}.$$

За результатами експерименту будемо залежність $U_{ст} = f(l_{ст})$ (рис. 3.23).

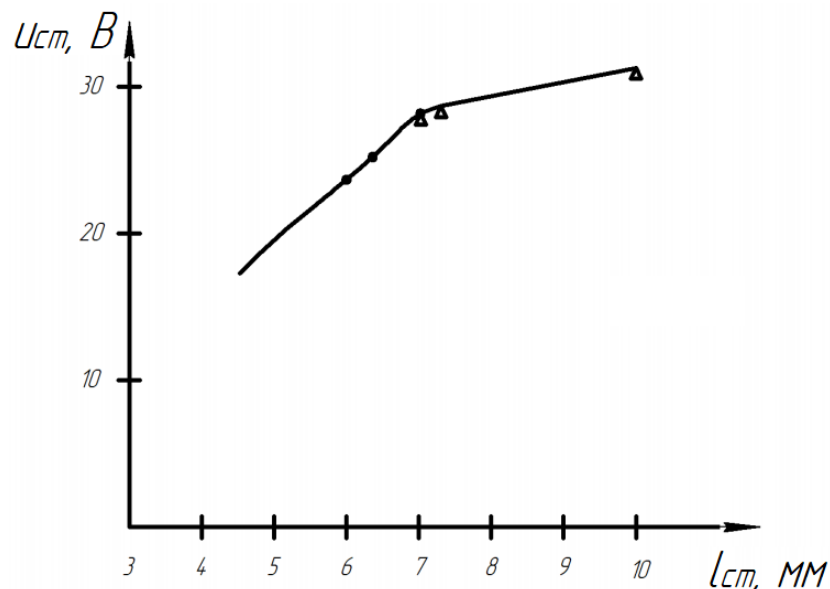


Рисунок 3.23 - Залежність $U_{ст} = f(l_{ст})$

За результатами експериментів, проведених на різній довжині відкритої складової дуги $l_{відкр}$ якісне формування точок отримано при $l_{відкр} = 1 \dots 3$ мм. Для цього плазмотрону рекомендуємо вказаний діапазон.

Отримані залежності $U_{ст} = f(I_k)$, $U_{ст} = f(l_{відкр})$, $U_{ст} = f(l_w)$ дозволяють встановити оптимальні неелектричні параметри: $l_k = 4$ мм, $l_{відкр} = 1 \dots 3$ мм, $l_w = 1$ мм при діаметрі сопла $d_c = 3$ мм.

В результаті з усієї серії експериментів хороше формування точки отримали при оптимальних неелектричних параметрах: $l_k = 4$ мм, $l_{відкр} = 1 \dots 3$ мм, $l_w = 1$ мм при діаметрі сопла $d_c = 3$ мм, $I_d = 100$ А, $Q_{Ar} = 1,0$ л/хв, балансі тривалостей 60/40%, $t_{зв} = 7$ с (рис. 3.24).

Зварна точка вийшла (рис. 3.24), але включення до зварної точки приборати не вдалося через погану підготовку зразка.

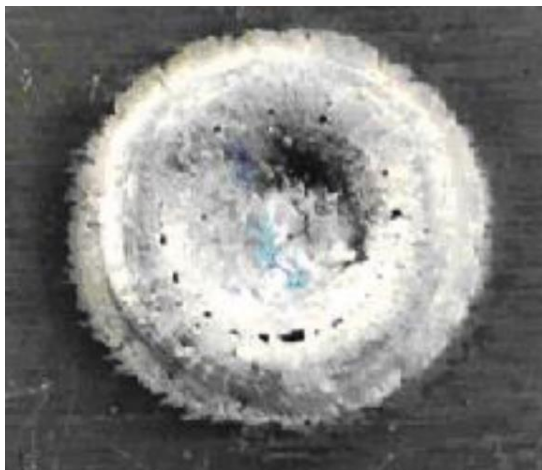


Рисунок 3.24 - Зовнішній вигляд зварного з'єднання

Плазмотрон ГВС-1 під час роботи з сучасним обладнанням забезпечує стабільне горіння стиснутої дуги у 4 режимі роботи інвертора TIG-200 P AC/DC (зварювання кточками).

Висновки за розділом

Встановлено, що плазмотрон ГВС-1 під час роботи з сучасним обладнанням забезпечує стабільне горіння стиснутої дуги. Найвищої якості точкового зварювання алюмінієвих сплавів плазмовою дугою досягається при діаметрі сопла плазмотрона $d_c = 3$ мм, струмі дуги $I_d = 100$ А, витраті плазмоутворюючого газу $Q_{Ar} = 1,0$ л/хв, балансі струму 60/40 % та тривалості зварювання $t_{зв} = 7$ с.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз чинників і факторів, які можуть призвести до виникнення небезпечних чи аварійних ситуацій під час роботи на установці для плазмового зварювання

Під час виконання робіт на плазмових установках оператор повинен дотримуватись інструкції з охорони праці та виконувати тільки ту роботу, яка йому доручена.

Оператор плазмових установок повинен знати:

- загальну будову та призначення окремих частин установки для плазмового зварювання;
- порядок пуску і зупинки устаткування, на якому він працює;
- режими зварювання, принцип роботи обладнання і правила налагодження;
- технологічні особливості різання сталей і кольорових металів;
- прийоми надання першої допомоги постраждалим.

Експлуатація плазмової установки в режимі зварювання супроводжується шумом, що перевищує допустимі рівні, тому при організації робочого місця слід вживати заходів щодо зниження рівня шуму.

При експлуатації плазмової установки необхідно обладнати на робочому місці утворюється значна кількість шкідливих газів, які необхідно видаляти за допомогою штучної вентиляції.

В процесі роботи на оператора плазмових установок можливий вплив наступних небезпечних і шкідливих виробничих факторів:

- рухомі частини виробничого обладнання;
- пересувні вироби, заготовки, матеріали;
- підвищена температура поверхонь, обладнання, матеріалів;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;

- підвищене значення напруги в електричній мережі, замикання якої може статися через тіло людини;
- підвищений рівень статичної електрики;
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищена яскравість світла;
- гострі кромки, задирки і шорсткість на поверхні заготовок;
- підвищена загазованість повітря робочої зони;
- статичні і динамічні фізичні перевантаження.

4.2 Моделювання процесу формування і виникнення травмонебезпечної ситуації під час плазмового зварювання

Одним із основних способів моделювання небезпечних ситуацій є метод графічно окресленого логічного моделювання потенційних аварій, травм і катастроф. Цей метод базується на побудові схем, відмов і помилок працівників (операторів) різних систем. Потрібно вести математичну обробку даних, з метою одержання ймовірності виникнення травматичних випадкових подій. Розрахунки спрямовані на зниження нещасних випадків на виробництві.

Вивчаючи модель процесів формування та можливого виникнення травмонебезпечних та аварійних ситуацій, з якої починається небезпечний процес і до виникнення небезпечних наслідків. Якщо провести дослідження то обов'язково можна знайти подію (явище), що є причиною травмонебезпечних та аварійних ситуацій.

Розглянемо випадок виробничого травматизму під час плазмового зварювання алюмінію. У даному випадку відбувається травма працівника, внаслідок ураження електричним струмом чи отримання опіку. Головну подію розміщують у верхній частині аркуша паперу і зверху донизу розміщують інші події. У побудованій моделі базові події мають форму круга. Нерозкриті базові події зображують у вигляді ромба, прямокутник подія, що виникає як результат дії фактора.

Математичну обробку побудованої моделі починають з крайньої лівої гілки, події якої пронумеровані знизу у вгору починаючи з базових подій і закінчуючи головною. Значення подій вказуємо безпосередньо на символи зображення події. Ймовірності виробничих подій визначаємо за даними виробництва. Наприклад, базова подія “охорона праці”. Для визначення ймовірності ми повинні встановити наскільки (%) від ідеального рівня здійснюється відповідний контроль на об’єкт. Якщо буде встановлено, що такий рівень контролю становить 20 або 30 %, то ймовірність відповідно становить 0,2 і 0,3. При відсутності контролю ймовірність “не здійснення контролю” становитиме 1, якщо контроль ідеальний, то відповідна ймовірність дорівнює 0. Для виконання математичних обчислень ймовірностей випадкових подій логіко-імітаційної моделі застосовують складені формули відповідно до положень [4].

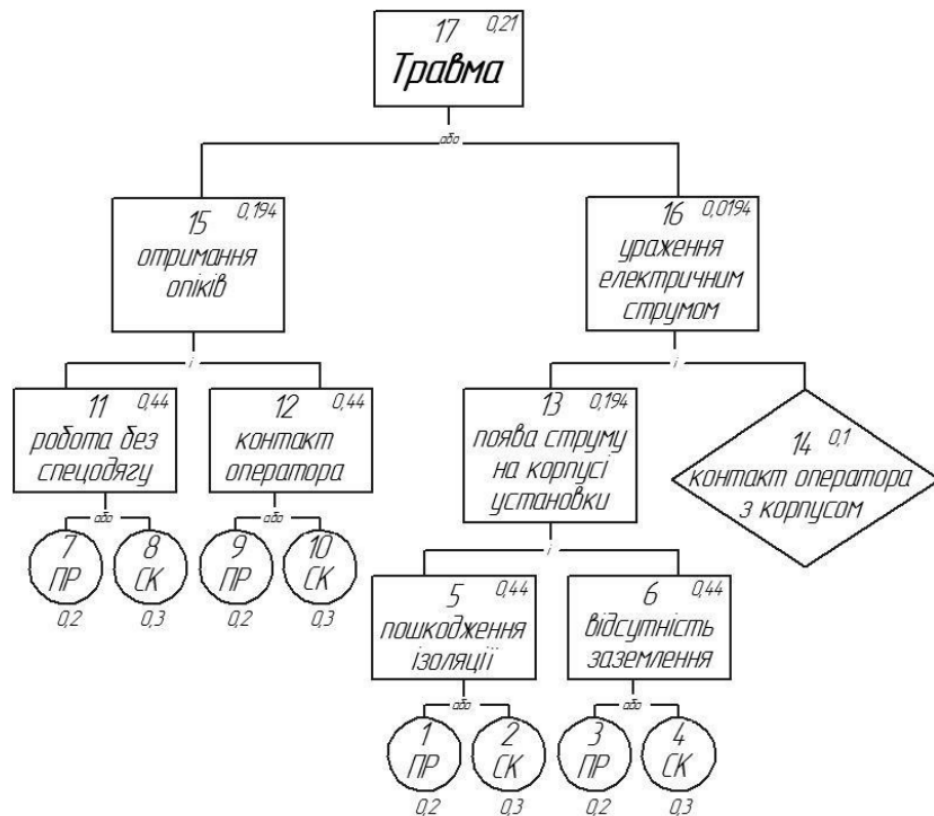


Рисунок 4.1. Модель процесу формування та виникнення травми

На даній схемі графічно відображено математичну обробку даних на виробництві про нещасні випадки.

Ймовірність події P_5 визначаємо наступним чином

$$P_5 = P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2 = 0,2 + 0,3 - 0,2 \cdot 0,3 = 0,44 \quad (4.1)$$

Ймовірність подій P_6 , P_{11} , P_{12} буде рівною події P_5 , оскільки базові події для них є однаковими.

Ймовірність події P_{13}

$$P_{13} = P_5 \cdot P_6 = 0,44 \cdot 0,44 = 0,194 \quad (4.2)$$

Ймовірність події P_{16}

$$P_{16} = P_{13} \cdot P_{14} = 0,194 \cdot 0,1 = 0,0194 \quad (4.3)$$

Ймовірності подій P_{15} буде рівною події P_{13} , оскільки події P_5 , P_6 , P_{11} , P_{12} рівні між собою.

Ймовірність події P_{24}

$$P_{24} = P_{15} + P_{16} - P_{15} \cdot P_{16} \quad (4.4)$$

$$P_{24} = 0,194 + 0,0194 - 0,194 \cdot 0,0194 = 0,21$$

Таким чином, на робочому місті під час плазмового зварювання за наявності і можливості виникнення існуючих небезпек та небезпечних діяч на 100 робочих місць ймовірність виникнення травмонебезпечної ситуації становить 0,21 (21 %).

Такий високий показник пояснюється великою кількістю небезпечних факторів та високими вимогами щодо кваліфікації працівників, якості виконання технологічного процесу та умов безпеки праці.

4.3 Заходи щодо запобігання виробничого травматизму під час роботи на плазмових установках

До роботи оператором плазмових установок допускати осіб, які досягли 18-річного віку, навчені і атестовані на II кваліфікаційну групу з електробезпеки, пройшли медичний огляд, вступний і первинний на робочому місці інструктажі з охорони праці, які вже оволоділи безпечними методами виконання робіт і пройшли перевірку знань вимог охорони праці.

Оператор плазмових установок повинен бути забезпечений необхідними засобами індивідуального захисту відповідно до типових норм.

Перебуваючи в цеху, необхідно:

- звертати увагу на сигнали, що подаються з вантажопідіймальних кранів і транспорту, що рухається;

- не стояти і не проходити під вантажем, піднятим краном, а також між верстатами, колонами, огорожами, стінами будівлі і ін., близько розташованими до пересувного вантажу;

- при русі по цеху користуватися тільки встановленими проходами, що не перелазити через конвеєри, рольганги тощо.

Перед початком роботи обов'язково слід одягти спецодяг, перевірити справність обладнання, електропроводки, наявність і справність заземлення.

Витяжна вентиляція повинна бути встановлена над столом для різання і зі зворотного боку розрізаного листа.

Про всі помічені недоліки, несправності в обладнанні і про виниклі небезпеки повідомити майстру. До роботи можна приступати тільки після усунення всіх несправностей і дозволу майстра.

Не слід дивитися на дугу, що утворюється при різанні, незахищеними очима. Необхідно користуватися захисною маскою зі світлофільтром.

Забороняється під час роботи на установці залишати відкритими шафу електроживлення і пульт управління.

Забороняється залишати без нагляду установку з підключеними стисненим повітрям, водою і включеним напругою.

Під час роботи забороняється тримати шланги під пахвою, на плечах або затискати ногами. Забороняється допускати зіткнення шлангів з струмопровідними проводами.

При перегрів плазмотрона робота повинна бути зупинена до повного його охолодження.

Не допускати попадання на шланги іскор, вогню або важких предметів, а також впливу високих температур.

Забороняється приєднання до шлангів вилок, трійників для живлення декількох споживачів.

Не допускати проведення ремонту апаратури, плазмотрона тощо. У разі несправності негайно припинити роботу і повідомити майстру.

При щоденному обслуговуванні необхідно перевіряти справність підвідних проводів; справність контактних затискачів і роз'ємів на панелі з зажимами; заземлення джерела живлення; заземлення розрізаного виробу або столу для зварювання.

Справність захисних засобів слід перевіряти перед кожним застосуванням. Захисні засоби, у яких закінчився термін чергового випробування, застосовувати забороняється.

Для запобігання виникненню пожеж необхідно дотримуватися таких вимог:

- не захарашувати доступи і проходи до протипожежного інвентарю, вогнегасників, гідрантів;
- зберігати горючі та легкозаймисті речовини в спеціально відведених місцях з дотриманням заходів пожежної безпеки;
- палити тільки в спеціально відведених місцях, забезпечених протипожежним інвентарем і урнами;
- використаний обтиральний матеріал зберігати в металевому ящику з щільно закривається кришкою;
- не проходити з відкритим вогнем для шлангів;
- не чистити і не прати робочий одяг бензином і іншими легкозаймистими рідинами.

При виникненні ситуацій, які можуть привести до аварій і нещасних випадків (наприклад, при пробі ізоляції в ланцюзі, течі шлангів, несправному водоохолодженні або припинення подачі води), необхідно припинити роботу, відключити подачу електроенергії, вивести з небезпечної зони людей і повідомити про виниклу ситуацію керівнику робіт.

При виникненні аварії негайно вжити заходів з надання потерпілим першої допомоги, викликати машину швидкої допомоги.

При виявленні пожежі негайно повідомити в пожежну охорону по телефону 101, сповістити керівництво і до прибуття пожежних приступити до ліквідації вогнища пожежі наявними засобами в залежності від загорівся матеріалу.

При нещасному випадку надати потерпілому першу долікарську допомогу, повідомити про подію керівництву. По можливості зупинити обстановку, якщо це не призведе до аварії або травмування інших людей. При необхідності викликати бригаду швидкої допомоги по телефону 103 або допомогти доставити потерпілого в медичний заклад.

Висновки за розділом

Аналіз чинників і факторів, які можуть призвести до виникнення небезпечних чи аварійних ситуацій під час роботи на установці для плазмового зварювання металу дозволив отримати вихідні дані для моделювання можливості виникнення небезпечної ситуації, ймовірність якої становить 21 %. Виконання заходів щодо запобігання виробничого травматизму під час роботи на плазмових установках дозволить суттєво знизити цей показник та покращити безпеку праці.

ВИСНОВКИ

Вивчивши технологічні можливості джерела TIG 200P AC/DC, яке здатне формувати змінний струм із прямокутною формою імпульсів, було виявлено, що така форма струму може впливати на проплавлювальну здатність дуги, розміри зони катодного очищення від оксидної плівки залежно від балансу полярностей, величину ефективної потужності прямої та зворотної полярності, стабільність горіння дуги за рахунок швидкості переходу через нуль в порівнянні з синусоїдальною формою струму.

Виявлено оптимальне значення тривалості прямої та зворотної полярності для зварювання алюмінієвих сплавів АМг-3 та АМг-6 в з'єднанні 2+2 мм.

Досліджено вплив параметрів серійного плазмотрону ГСД-1 для зварювання стиснутою дугою на формування звареної точки. Встановлено, що найбільший вплив на геометричні характеристики точки надає сила зварювального струму та час зварювання, але основною проблемою на стаціонарному устаткуванні стало виникнення подвійної дуги, тому використовувався плазмотрон з різним комплектом сопел із різними характеристиками для виявлення впливу неелектричних параметрів на формування зварної точки та стабілізації процесу зварювання.

Розроблено методику проведення дослідження на новому плазмотроні ГВС-1 та проведено серію експериментів на різній довжині відкритої складової дуги та довжини каналу сопла. Визначено діапазон параметрів для даного плазмотрону та встановлені оптимальні неелектричні параметри формування якісної зварної точки. Встановлено, що плазмотрон ГВС-1 під час роботи з сучасним обладнанням забезпечує стабільне горіння стиснутої дуги.

Найвищої якості точкового зварювання алюмінієвих сплавів плазмозовою дугою досягається при діаметрі сопла плазмотрона $d_c = 3$ мм, струмі дуги $I_d = 100$ А, витраті плазмоутворюючого газу $Q_{Ar} = 1,0$ л/хв, балансі струму 60/40 % та тривалості зварювання $t_{зв} = 7$ с.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Биковський О.Г. Зварювання та різання кольорових металів: підручник. Київ: Основа, 2011. 392 с.
2. Биковський О. Г., Пінковський І. В. Довідник зварника. Київ: Техніка, 2002. 336 с.
3. Види і особливості плазмового зварювання. https://zvarka.info/vidi-i-osoblivosti-plazmovogo-zvaryuvannya/#google_vignette.
4. Городецький І. В, О. Тимочко. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях: методичні рекомендації до виконання розділу у роботах ОКР "Магістр" студентами факультету механіки та енергетики. Львів: Львівський НАУ, 2011. 16 с.
5. Гуменюк І.В. Технологія електродугового зварювання. Київ: Грамота, 2006. 512с.
6. Добровольський О.Г. Матеріалознавство та матеріали у машинобудуванні. Навчальний посібник. Київ, КНБУА, 2014. 168 с.
7. ДСТУ EN 1090-2:201X (EN 1090-2:2018, IDT). Виконання сталевих і алюмінієвих конструкцій. Частина 2. Технічні вимоги до сталевих конструкцій. Київ: УкрНДІ.
8. Зварювальний інвертор BRIMA TIG-200P AC-DC. <https://sterbrust.com/catalog/argonnaya-svarka-brima/brima-tig-200p-ac-dc/>
9. Квасницький В. В. Спеціальні способи зварювання. Навчальний посібник. Миколаїв: УДМТУ, 2003. 437 с.
10. Косенко В.А., Добровольський О.Г., Красовський А.П., Білінський Л.С. Малишев В.В. Зварювання в автомобілебудуванні: матеріалознавство та технології: навчальний посібник. Київ: Університет «Україна№, 2018. 239 с.
11. Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві: Навчальний посібник. Київ: Основа, 2010. 240 с

12. Пипенко Р.Ю., Маршуба В.П. Особливості і технологія зварювання алюмінієвих сплавів напівавтоматом. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. 2020. Ч. I. с. 293.
13. Плазмове зварювання. <https://www.fronius.com/uk-ua/ukraine/zvaryvalni-tekhnologiyi/produkty>
14. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [Електронний ресурс]: ДСН 3.3.6.042-99. – Чинний від 1999-12-01. Київ: МОЗ України, 1999. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99>.
15. Стеклов О.І. Основи зварювального виробництва. Київ: Вища школа, 1990. 222 с.
16. Хільчевський В.В. Металознавство і технологія конструкційних матеріалів: Навчальний посібник. Київ: Либідь, 2002. 328 с.
17. A. Sahoo, S. Tripathy, Development in plasma arc welding process: A review, Materials Today: Proceedings, Volume 41, Part 2, 2021, Pages 363-368, ISSN 2214-7853.
18. Huang J. et al. Process of welding-brazing and interface analysis of lap joint Ti-6Al-4V and aluminum by plasma arc welding //Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – Т. 61. – С. 396-407.
19. Grezev A.N. Plasma formation in laser welding. Welding International, 2005. 813 с.
20. Klett J. et al. Plasma welding of aluminum in an oxygen-free argon atmosphere //Advances in Materials Science. – 2023. – Т. 23. – №. 1. – С. 5-18.
21. Lathi K., Jenström P. Plasma Welding Aluminium // Svetsaren. – 1999. – № 3. – P. 26–28.
22. Shchitsyn, Y. D., Shchitsyn, V. Y., Herold, H., & Weinhart, W. (2003). Plasma welding of aluminium alloys. Welding International, 17(10), 825–832.
23. Xiaoqing Jiang, Shujun Chen & Jinlong Gong. (2018) Effect of nonaxisymmetric arc on microstructure, texture and properties of variable polarity plasma arc welded 5A06 Al alloy. Materials Characterization 139, pages 70-80.

24. Yang T., Xiong J., Chen H. Effect of process parameters on tensile strength in plasma-MIG hybrid welding for 2219 aluminum alloy //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – T. 84. – C. 2413-2421.

25. Zhaoyang Yan, Shujun Chen, Fan Jiang, Wang Zhang & Ning Huang. (2019) Study and optimization against the gravity effect on mechanical property of VPPA horizontal welding of aluminum alloys. Journal of Manufacturing Processes 46, pages 109-117.