

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання імені Є. О. Патона
Кафедра зварювального виробництва**

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО

Завідувач кафедри

_____ Віктор КВАСНИЦЬКИЙ

(підпис)

« ____ » _____ 2025 р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою
«Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій»
спеціальності 131 «Прикладна механіка»**

на тему: Плазмово-дугове зварювання алюмінієвого сплаву 1570

Виконав:

студент IV курсу, групи ЗС-11

Кім Артур Олександрович

Керівник:

Зав. каф., д.т.н., професор

Квасницький Віктор Вячеславович

Консультант з економічної частини:

Доцент, к.е.н., Глущенко Ярослава Іванівна

Консультант з охорони праці

Зав. каф., д.т.н., професор

Левченко Олег Григорович

Рецензент:

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2025 рік

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально – науковий інститут матеріалознавства та зварювання імені
Є. О. Патона
Кафедра зварювального виробництва

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо–професійна програма – «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Віктор КВАСНИЦЬКИЙ

«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Кіму Артуру Олександровичу

1. Тема проєкту «Плазмово-дугове зварювання алюмінієвого сплаву 1570», керівник проєкту Квасницький Віктор Вячеславович, зав каф. ЗВ, д.т.н., професор, затверджені наказом по університету від «26» травня 2025 р. № 1733–с
2. Термін подання студентом проєкту: 9 червня 2025 р.
3. Вихідні дані до проєкту: Матеріал виробу – сплави на основі алюмінію АМгб та 1570, установка для плазмово-дугового зварювання, плазмові пальники, зварні з'єднання стикові, умови виготовлення – цехові.
4. Зміст пояснювальної записки:
 1. Виконати аналіз літератури щодо застосування та способів зварювання сплавів на основі алюмінію. Визначити характерні дефекти, що виникають при зварюванні

алюмінієвих сплавів та способи запобігання їх утворенню. Виконати аналіз можливості застосування плазмово-дугового зварювання для отримання стикового з'єднання пластин зі сплавом 1570. 2. Обґрунтувати вибір обладнання для дослідження формування з'єднань зі сплавів алюмінію плазмово-дуговим зварюванням. Навести технічні характеристики ключових елементів зварювального обладнання. 3. Визначити застосовні методики проведення експериментальних досліджень та надати їх опис. 4. На основі аналізу хімічного складу та властивостей сплаву 1570 обґрунтувати вибір присадного дроту. 5. Визначити рекомендовані параметри режимів плазмово-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом сплаву алюмінію та заходи щодо підготовки зварювальних матеріалів та зварних з'єднань до зварювання. 6. Провести експериментальні дослідження щодо формування зварних з'єднань в різних просторових положеннях та вплив частоти різнополярного струму, тривалості фаз прямої та зворотної полярності, витрат плазмоутворювального газу та форми канавки підкладки на формування шва. 7. Виконати аналіз результатів контролю якості зварних з'єднань. 8. Розробити стартап-проект. 9. Розробити заходи з охорони праці та безпеки.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	завдання прийняв
Розроблення стартап проекту	Глущенко Я. І., доц.		
Охорона праці	Левченко О. Г., зав. каф.		

7. Дата видачі завдання 20 квітня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Прим.
1	Аналіз літератури за темою проекту	до 30 квітня	
2	Детальна розробка і обґрунтування проєктних рішень технологічної частини проекту	до 15 травня	
3	Розробка стартап проекту	до 20 травня	
4	Розробка інженерних рішень з охорони праці	до 20 травня	
5	Оформлення графічного матеріалу	до 25 травня	
6	Оформлення пояснювальної записки і підготовка доповіді на захист	до 9 червня	

Студент _____
(підпис)

Артур КІМ

Керівник _____
(підпис)

Віктор КВАСНИЦЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Структура дипломної роботи: дипломна робота викладена на 110 сторінках друкованого тексту і складається з 7 розділів, містить 40 рисунків, 14 таблиць, 34 посилань на джерела літератури.

АЛЮМІНІЄВИЙ СПЛАВ 1570, ПЛАЗМОВО-ДУГОВЕ ЗВАРЮВАННЯ, РІЗНОПОЛЯРНИЙ АСИМЕТРИЧНИЙ СТРУМ, МІКРОСТРУКТУРА, ЗОНА ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ, ПРИСАДНИЙ ДРІТ, ЯКІСТЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ, КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ.

Мета дослідження – встановлення раціональних режимів плазово-дугового зварювання алюмінієвого сплаву 1570 із використанням різнополярного асиметричного струму та оцінка впливу технологічних параметрів на формування зварного з'єднання.

Завдання дослідження:

- здійснити аналіз застосовних способів зварювання сплавів алюмінію, схильності до утворення дефектів та методів запобігання їх утворенню;
- проаналізувати хімічний склад та властивості сплаву 1570 й обґрунтувати вибір присадного дроту для його зварювання;
- вивчити вплив частоти різнополярного струму та тривалості фаз прямої і зворотної полярності на формування зварного шва;
- дослідити формування шва у нижньому та вертикальному положеннях;
- виконати аналіз результатів контролю якості зварних з'єднань методами радіографії та ультразвукової дефектоскопії;
- розробити рекомендації щодо забезпечення стабільної якості зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 1570.

Об'єкт дослідження – процес плазово-дугового зварювання алюмінієвого сплаву 1570.

Предмет дослідження – вплив параметрів зварювального режиму на формування та характеристики якості зварних з'єднань.

Отримані результати можуть бути використані при розробці технологій зварювання конструкцій із сплаву 1570 у промислових умовах.

ABSTRACT

Thesis structure: the thesis is presented on 110 pages of printed text and consists of 7 sections, contains 40 figures, 14 tables, 34 references to literature sources.

ALUMINUM ALLOY 1570, PLASMA ARC WELDING, HETEROPOLAR ASYMMETRIC CURRENT, MICROSTRUCTURE, HEAT AFFECTED ZONE, FILLER WIRE, QUALITY OF WELDED JOINTS, QUALITY CONTROL.

The purpose of the study is to establish rational modes of plasma arc welding of aluminum alloy 1570 using heteropolar asymmetric current and assess the influence of technological parameters on the formation of a welded joint.

Research objectives:

- to analyze applicable methods of welding aluminum alloys, the tendency to the formation of defects and methods for preventing their formation;
- to analyze the chemical composition and properties of alloy 1570 and justify the choice of filler wire for its welding;
- to study the influence of the frequency of the different-polarity current and the duration of the phases of direct and reverse polarity on the formation of the weld;
- to investigate the formation of the weld in the lower and vertical positions;
- to analyze the results of quality control of welded joints by radiography and ultrasonic flaw detection methods;
- to develop recommendations for ensuring stable quality of welded joints of aluminum alloy 1570.

The object of the study is the process of plasma-arc welding of aluminum alloy 1570.

The subject of the study is the influence of welding mode parameters on the formation and quality characteristics of welded joints.

The results obtained can be used in the development of welding technologies for structures made of alloy 1570 in industrial conditions.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ	10
ВСТУП	11
1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗВАРЮВАННЯ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ	13
1.1 Основні фізико-механічні властивості алюмінію	13
1.2 Застосування алюмінієвих сплавів	15
1.2.1 Алюмінієвий сплави в суднобудуванні	15
1.2.2 Сплави алюмінію в харчовій промисловості.....	18
1.3 Характерні дефекти при зварюванні сплавів алюмінію	19
1.3.1 Гарячі тріщини	20
1.3.2 Підрізи	20
1.3.3 Пори	20
1.3.4 Незадовільне формування зварного шва.....	21
1.3.5 Дефекти у корені зварного шва	21
1.3.6 Неметалеві включення	21
1.3.7 Включення оксидних плівок	22
1.4 Способи зварювання сплавів алюмінію	22
1.4.1 Імпульсно-дугове зварювання	23
1.4.2 Плазмове зварювання	24
1.4.3 Плазмо-дугове зварювання різнополярним асиметричним струмом з прямокутною формою імпульсу струму	26
1.5 Технологічне спорядження та особливості технології зварювання алюмінієвих сплавів	27
1.5.1 Спорядження для стабілізації та фіксації компонентів	27
1.5.2 Підготовка алюмінієвих сплавів до зварювання	28
1.6 Аналіз рекомендацій по зварюванню сплаву 1570, визначення мети та завдань досліджень	29
Висновки по розділу 1	31

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ			
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Кім А. О.						
Перевір.		Квасницький В.В.						
Н. контр.		Лисак В.В.						
Затверд.		Квасницький В.В.						
						Літ.	Арк.	Архувів
							7	111
						КПІ ім. Ігоря Сікорського НН ІМЗ ім. Є.О. Патона		

2	ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ	32
2.1	Джерело зварювального струму MW 450.....	32
2.2	Плазмовий модуль FPM	36
2.3	Блок подачі присадного дроту KD 4000	38
2.4	Система керування зварювальним процесом FPA 2003-Plasma.....	39
2.5	Механізм просторового позиціонування.....	43
2.6	Плазмотрон PMW 350-2.....	45
2.7	Плазмотрон Robacta PTW 3500 F+.....	47
	Висновок по розділу 2	49
3	МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	50
3.1	Хімічний склад та властивості сплаву АМг6.....	50
3.2	Хімічний склад та властивості сплаву 1570.....	51
3.3	Обґрунтування вибору хімічного складу присадного дроту	53
3.4	Підготовка матеріалів до зварювання.....	54
3.4.1	Хімічне травлення.....	54
3.4.2	Підготовка зварювального дроту та механічна обробка	55
3.5	Методика дослідження макро- та мікроструктури зварних з'єднань	55
	Висновок по розділу 3	57
4	ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ СПЛАВУ 1570	58
4.1	Дослідження формування зварного шва у нижньому положенні.....	58
4.1.1	Частота різнополярного асиметричного струму	58
4.1.2	Обґрунтування вибору тривалості фаз прямої та зворотної полярності	61
4.1.3.	Вибір витрати плазмоутворювального газу	65
4.1.4.	Вибір форми канавки у знімній сталевій підкладці.....	66
4.2	Дослідження формування зварного шва у вертикальному положенні...	72
4.2.1	Аналіз специфіки формування зварного шва при зварюванні у вертикальному положенні	72
4.2.2.	Підхід до формування зворотної частини шва при зварюванні на вертикальній площині	74
	Висновок по розділу 4	78

5 КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ	80
5.1 Радіографічний контроль якості зварних з'єднань.....	80
5.2 Ультразвуковий контроль зварних з'єднань.....	83
Висновок по розділу 5	85
6 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ.....	86
6.1 Опис ідеї стартап-проекту	86
6.2 Технічний аудит ідеї проекту.....	88
6.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	89
Висновок по розділу 6	95
7.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів (ШНВФ).....	96
7.1.1 Фізичні фактори.....	96
7.1.2 Хімічні фактори.....	97
7.1.3 Психофізіологічні фактори.....	97
7.1.4 Механічні фактори	97
7.2 Нормативні вимоги безпеки та гігієни праці	99
7.2.1 Вимоги до приміщення.....	99
7.2.2 Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)	100
7.3 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці	100
7.3.1 Технологічні процеси.....	100
7.3.2 Захист від шкідливих речовин	101
7.3.3 Вимоги до вентиляції.....	102
7.3.4 Організації робочого місця.....	104
7.4 Пожежна безпека	104
7.4.1 Аналіз пожежовибухонебезпечних матеріалів	105
7.4.2 Причини виникнення пожеж та профілактичні заходи	105
Висновок по розділу 7	106
ВИСНОВКИ.....	107
ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ПОСИЛАНЬ	108

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

ПДЗ – плазмово-дугове зварювання (Plasma Arc Welding);

РЗМ – рідкісноземельні метали;

ШНВФ – шкідливі та небезпечні виробничі фактори;

УЗК – ультразвуковий контроль;

ДСТУ – Державний стандарт України;

ДБН – Державні будівельні норми;

ПВ – період включення (робочий цикл);

ЗІЗ – засоби індивідуального захисту.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Плазмово-дугове зварювання (ПДЗ) алюмінієвих сплавів є важливим технологічним процесом, що використовується у різних галузях промисловості. Вибір оптимальних режимів зварювання впливає на якість зварного шва, його механічні характеристики та довговічність конструкцій вцілому.

Робота виконувалася в рамках індивідуального завдання за темою «Плазмово-дугове зварювання алюмінієвого сплаву 1570» з використанням матеріалів, зібраних під час практики в Інституті електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України.

У даній роботі досліджуються технологічні особливості зварювання алюмінієвого сплаву 1570, однак через його обмежену доступність в Україні, експериментальні випробування проводилися переважно на сплаві АМг6, який є аналогом. Проаналізовано вплив різнополярного асиметричного струму на процес формування шва, стабільність дуги та якість зварного з'єднання.

У роботі досліджено особливості зварювання алюмінієвого сплаву 1570. Розглянуто хімічний склад, фізико-механічні властивості сплаву, роль легуючих елементів (скандію та цирконію) у покращенні структури та зварюваності матеріалу.

Особливу увагу приділено вивченню дефектів зварних швів, характерних для алюмінієвих сплавів: тріщин, пор, неметалевих включень та оксидних плівок.

Проведено аналіз впливу частоти та співвідношення фаз полярності різнополярного асиметричного струму на формування шва та глибину проплавлення. Виконано порівняльні експерименти по зварюванню зразків пластин у нижньому і вертикальному положеннях.

Представлено методики металографічних досліджень зварних з'єднань.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Також у роботі проведено контроль якості зварних з'єднань, розроблено практичні рекомендації щодо зниження дефектності швів та підвищення їх експлуатаційної надійності.

Дане дослідження дозволяє повною мірою використовувати потенціал алюмінієвого сплаву 1570 системи Al-Mg-Mn.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗВАРЮВАННЯ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ

1.1 Основні фізико-механічні властивості алюмінію

Алюміній належить до легких кольорових металів (густина $2698 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$) із невисокою температурою плавлення (660°C), має кубічну гранецентровану ґратку й стійкість до поліморфних перетворень. Питома теплоємність і прихована теплота плавлення алюмінію значно вищі порівняно з іншими металами. З огляду на це для виплавки алюмінію і його сплавів потрібна велика кількість теплоти. Метал має високу теплопровідність і електричну провідність, що складає 60 % в порівнянні з міддю. Чистий алюміній – м'який метал із невисокою міцністю, у литому стані має такі механічні властивості: $\sigma_B \approx 90 \text{ МПа}$; $\sigma_T \approx 35 \text{ МПа}$; $\delta \approx 45 \%$; $\text{HB} \approx 25$; $E \approx 71 \text{ ГПа}$.

Алюміній – хімічно активний метал. В атмосфері він легко покривається тонкою й щільною оксидною плівкою, яка захищає поверхню від подальшого окиснення. Питомі об'єми оксиду і металу відрізняються незначно. Тому оксидна плівка має добре зчеплення з металом і малопроникна для інших газів. Завдяки захисній дії оксидної плівки алюміній має високу корозійну стійкість в атмосферних умовах і в середовищі багатьох органічних кислот, у лугах швидко розчиняється. Велика поширеність у земній корі (8,8 % мас.), наявність зручних для розробки родовищ руд і створення надійної технології одержання металу з руди поставили алюміній на перше місце серед кольорових металів за значущістю та обсягом застосування в сучасному машинобудуванні та виробництві.

Первинний алюміній випускають у вигляді зливків і маркують залежно від чистоти. Виділяють 3 групи алюмінію: особливої чистоти (вміст домішок менший 0,001 % мас.); високої чистоти (вміст домішок 0,005 % мас. – 0,05 % мас.); технічної чистоти (вміст домішок від 0,15 % мас. до 1,0 % мас.). Метал маркують буквою А та числом, що вказує на вміст алюмінію. Так, технічні марки алюмінію А85, А7, А0 містять відповідно 99,85 % мас., 99,70 % мас. та

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

99,00 % мас. чистого алюмінію, а решту становлять домішки в межах 0,15 % мас., 0,30 % мас. та 1,00 % мас.

Основні домішки в алюмінії – залізо й кремній. Найбільш небезпечно залізо, що практично нерозчинне в алюмінії і навіть за дуже малого вмісту (меншого 0,005 % мас.) спричиняє виділення інтерметаліду Fe_3Al , що має голчасту форму й тому знижує пластичність алюмінію і його сплавів. Гранично допустимий вміст заліза в ливарних сплавах залежить від способу литва. У випадку литва в піщані форми допускають від 0,5 % мас. до 1,0 % мас. Fe. У разі лиття в кокіль, у зв'язку з більш високою швидкістю охолодження, забезпечується деяке подрібнення включень Fe_3Al , тому гранично допустимий вміст заліза може бути підвищений від 0,8 % мас. до 1,4 % мас. Кремній у ливарних сплавах, як правило, не має шкідливого впливу. Звичайно його використовують як основний або допоміжний легуючий елемент.

На рис. 1.1 наведено залежність впливу легуючих елементів, зокрема Mn, V, Cr на електричний опір чистого алюмінію. Алюміній – парамагнітний матеріал. Модуль Юнга алюмінію 70000 МПа, що значно менше, ніж у сталей.

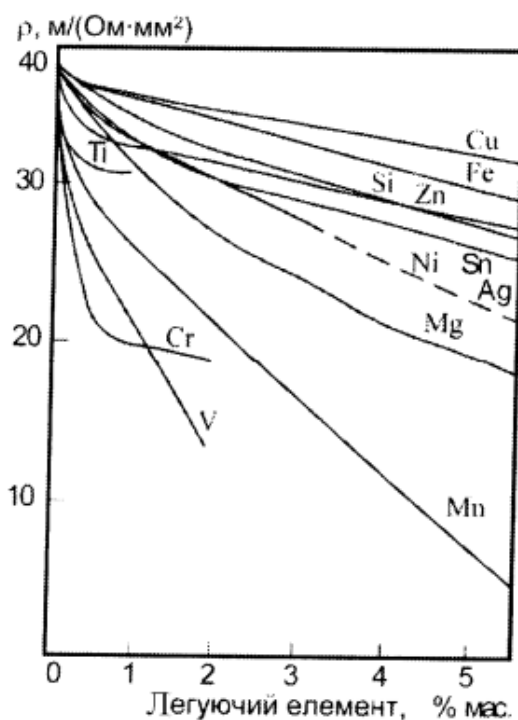


Рисунок 1.1 – Графік впливу домішок і легуючих елементів на електроопір алюмінію [1]

Розчинність водню в алюмінії збільшується з підвищенням температури та складає 0,002 см³ на 100 г за температури 350 °С. Під час плавлення алюмінію розчинність водню в ньому різко підвищується до 0,6 см³ на 100 г за температури 1000 °С. З азотом розплавлений алюміній взаємодіє за температур, вищих 800 °С [1].

1.2 Застосування алюмінієвих сплавів

1.2.1 Алюмінієвий сплави в суднобудуванні

Тенденції суднобудування стали схожими на ті, що були в автомобільній промисловості в останні роки, і зростаючий попит на автомобілі, великовантажні транспортні засоби, літаки, поїзди і кораблі також призвів до збільшення попиту на алюмінієвий плоский прокат і екструдовану продукцію.

Традиційним та найбільш часто застосовним сплавам алюмінію, що використовується в суднобудуванні є сплав типу 5083 Al-Mg. Він застосовується для виготовлення профілів, труб та листового прокату [2]. Хімічний склад алюмінієвих труб зі сплаву типу 5083 наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад алюмінієвої труби 5083 [3]

Хімічний елемент	Mn	Si	Fe	Cu	Zn	Ti	Mg	Cr
Склад (% мас.)	0,4...1	≤0,4	≤0,4	≤0,1	≤0,25	0,15	4...4,9	0,25

Цей сплав був визнаний надійним при застосуванні в умовах дії агресивного морського середовища. Щодо корозійної стійкості, то алюмінієві сплави відповідають вимогам або перевищують їх.

Алюмінієві судна мають явну перевагу перед сталевими плавучими засобами щодо загальних витрат на утримання. Це пов'язано з тим, що алюмінієві судна легші і використовують менше палива, ніж сталеві.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ			Арк..
								15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				

Алюмінієві судна також не мають витрати на фарбування і оскільки вони, частіше за все менші, мають спрощене комплектування. Після завершення експлуатації алюмінієві судна продовжують давати значні переваги внаслідок високої цінності переробки металу.

З урахуванням усіх існуючих технологій та методів суднобудування з алюмінієвих сплавів, алюміній може потенційно замінити сталь в майбутньому як основний будівельний матеріал для суден [2].

Алюмінієвий сплав 1561 є матеріалом, який деформується і належить до системи Al–Mg–Mn. Хімічний склад сплаву 1561 наведено в таблиці 1.2. Він характеризується високою корозійною стійкістю в морському середовищі, високими механічними властивостями за умови низької густини, а також задовільною технологічною здатністю до зварювання. Саме ці властивості обумовлюють широке використання цього сплаву в суднобудівній галузі.

Таблиця 1.2 – Хімічний склад сплаву 1561 [4]

Хімічний елемент	Mn	Si	Fe	Cu	Zn	Zr	Mg	Be
Склад (% мас.)	0,8...1,1	≤0,4	≤0,4	≤0,05	≤0,2	до 0,02 до 0,12	5,5...6,5	0,0001...0,0003

Особливу увагу в суднобудуванні приділяють технологічній здатності матеріалів до зварювання. Сплав 1561 добре зварюється методами аргонно-дугового зварювання плавким електродом (MIG) і автоматизованого зварювання під флюсом. Завдяки низькій схильності до утворення гарячих тріщин у зоні термічного впливу, його можна з'єднувати як з однотипними, так і з близькими за складом сплавами без застосування спеціальних компенсуючих добавок.

Ще однією перевагою є стійкість сплаву до міжкристалітної та піттингової корозії, що особливо важливо для тривалої експлуатації в умовах солоної води. Сплав демонструє високу працездатність в умовах змінних

навантаженнях і циклічному зволоженні-висиханні, що робить його придатним для зовнішніх елементів палуб і обшивок.

Таким чином, сплав 1561 забезпечує сприятливий баланс між масою конструкції, довговічністю, антикорозійною стійкістю та технологічною ефективністю, що визначає його цінність у сучасному суднобудуванні.

Сплав 5086 застосовується для виготовлення злитків і слябів, а також напівфабрикатів – листів, стрічок, смуг, плит, профілів, панелей, труб, дроту, зварювального дроту, штамповок і поковок – шляхом гарячого або холодного деформування. Хімічний склад сплаву наведений в таблиці 1.3. Матеріал використовується для виробництва кільцевих заготовок, отриманих методом вільного кування або машинного прокатування, а також деталей внутрішнього силового набору літаків, зварних резервуарів і паливних баків. Зі сплаву також виготовляють екструдовані профілі з площею поперечного перерізу до 200 см² і габаритним діаметром описаної окружності до 350 мм. Сплав 5086 рекомендований для застосування в авіаційній промисловості, а також у спеціалізованих сферах машинобудування, де висуваються підвищені вимоги до зварюваності, корозійної стійкості та надійності. З цього сплаву виготовляють пресовані панелі постійного перерізу з поздовжніми ребрами для літакобудування, пресовані труби з ребром у площині полотна шириною до 2100 мм, великогабаритні екструдовані труби, безшовні холоднодеформовані труби, біметалічні листи в комбінації з нержавіючою сталлю марки Х6CrNiTi18-10, а також плоскі перехідні елементи загальнопромислового призначення.

Таблиця 1.3 – Хімічний склад сплаву 5086 [5]

Хімічний елемент	Mn	Si	Fe	Cu	Zn	Mg	Cr	Ti
Склад (% мас.)	0,2...0,7	≤0,4	≤0,5	≤0,1	≤0,25	3,5...4,5	0,05...0,25	≤0,15

Сплав 1570, легований скандієм і цирконієм, відзначається високою міцністю, стійкістю до корозії та доброю зварюваністю. Згідно з

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ			Арк..
								17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				

нормативними документами та даними досліджень [6], легування системи Al-Mg-Sc дозволяє стабілізувати мікроструктуру зварного з'єднання, зменшити розмір зерна, підвищити механічні властивості. Дослідження [7], [8] підтверджують позитивний вплив скандію і цирконію на утворення фаз, що зміцнюють, вони зменшують схильність до утворення гарячих тріщин при зварюванні.

1.2.2 Сплави алюмінію в харчовій промисловості

Для виробів харчового призначення застосовують сплави 1050А, 1200, 3003, 3105. Застосування інших сплавів для виробів та технічного оснащення, що працює в контакті з харчовими продуктами та агресивними середовищами має бути у кожному окремому випадку дозволене органами охорони здоров'я. Частка свинцю в алюмінієвих сплавах для виробів харчового призначення не має перевищувати – 0,15 % мас., миш'яку – 0,015 % мас., цинку – 0,3 % мас., берилію – 0,05 % мас..

Чушки для виготовлення виробів та технічного оснащення, що контактують із харчовими продуктами, маркуються за відсутності кольорового маркування додатковою літерою «П» після позначення марки сплаву.

Стандарти регламентують виготовлення господарського посуду з листового алюмінію. Посуд має виготовлятися з листів та стрічок алюмінію марок 1050А або 1350, із хімічним складом згідно з вимогами стандарту 573-3. Також допускається використання технічно чистого алюмінію марок 1070, 1060, 1050, 1080 відповідно до стандарту ISO 209-1.

Допускається застосування біметалевих стрічок на основі алюмінію марок 1050А або 1350, у комбінації з нержавіючою сталлю марок X6CrNiTi18-10 та X5CrNi18-10, відповідно до стандарту EN 10088-1.

За наявності внутрішнього захисного покриття виготовлення посуду допускається також із застосуванням листів і стрічок деформованого

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

алюмінієвого сплаву марки EN AW-3003, який характеризується доброю пластичністю та корозійною стійкістю [9].

1.3 Характерні дефекти при зварюванні сплавів алюмінію

Будь-який зварювальний процес повинен здійснюватися строго за правилами і нормативами. Виникають тріщини великого розміру, які видно неозброєним оком, або мікротріщини, які помітні тільки при п'ятидесятиразовому збільшенні. Тріщини наведені на рис. 1.2 та 1.3. Незважаючи на маленький розмір мікротріщин, вони не менш небезпечні, ніж великі.

Тріщини підрозділяються на гарячі і холодні залежно від температури виникнення [10].

І холодні, і гарячі тріщини є дефектами. При виявленні тріщин в зварному шві, зварювальні роботи необхідно зупинити. Здійснити дефектоскопічний контроль для визначення характеру та причини утворення тріщини. Після цього дефектна ділянка видаляється механічним або термічним способом, виконується підготовка крайок і повторне зварювання з урахуванням необхідності коригування технологічних параметрів режимів та умов зварювання.



Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд макротріщини [10]

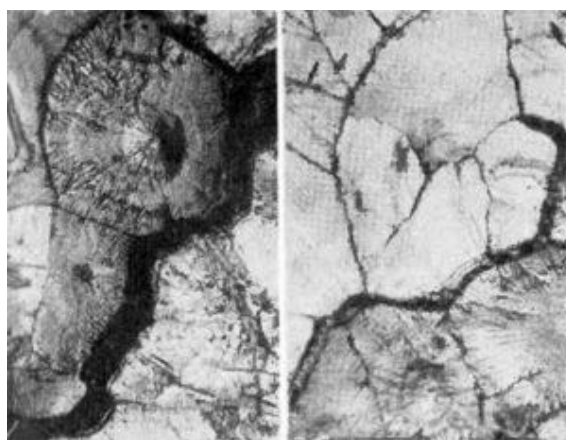


Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд мікротріщини [10]

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3.1 Гарячі тріщини

Гарячі тріщини – це зварювальні дефекти, що виникають у металі шва або в зоні термічного впливу під час його кристалізації за високих температур. Їх поява зумовлена внутрішніми термічними напруженнями, низькою пластичністю металу в гарячому стані та наявністю домішок (сірки, фосфору тощо), які знижують границю текучості. Гарячі тріщини, як правило, мають міжкристалітний характер і виникають у процесі зварювання або одразу після його завершення.

1.3.2 Підрізи

Підрізи – це зварювальні дефекти, що виникають через неправильний режим зварювання або занадто велику довжину дуги. Вони можуть викликати послаблення міцності зварного шва і сприяти накопиченню напружень. Щоб ліквідувати їх, необхідно оптимально налаштовувати напругу дуги, корегувати швидкість зварювання та правильно розташовувати електрод забезпечуючи рівномірний розподіл тепла.

1.3.3 Пори

Пори – це зварювальні дефекти, що виникають внаслідок присутності або утворення в розплавленому металі газів, що може бути результатом забруднення поверхні або неналежного захисту газом. Водень може проникати в метал з вологи, мастила чи інших забруднювачів. Для мінімізації цього дефекту потрібно ретельно очищати поверхню, використовувати сухий травлений зварювальний дріт і гарантувати якісний газовий захист, наприклад, застосовуючи аргон чи гелій.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3.4 Незадовільне формування зварного шва

Незадовільне формування шва – це зварювальний дефект, що часто обумовлений неправильним вибором параметрів зварювання чи незадовільною підготовкою поверхні. Воно здатне призвести до нерівномірного розподілу металу і зменшення механічних властивостей зварного з'єднання. Усунути цей дефект можливо, правильно налаштовуючи параметри зварювання, забезпечуючи рівномірне переміщення електрода та застосовуючи оптимальну кількість присадного металу.

1.3.5 Дефекти у корені зварного шва

Дефекти у корені шва – це зварювальні дефекти, що виникають з причин неповного провару або хибної позиції електрода. Це призводить до ослаблення міцності звареної ділянки та виникненню тріщин. Виправити ці дефекти можливо суворо контролюючи параметри зварювання, забезпечуючи достатній провар металу, а також використовуючи правильну техніку зварювання, зокрема регулюючи кут нахилу електрода.

1.3.6 Неметалеві включення

Неметалеві включення – це зварювальні дефекти, що виникають в наслідок забруднення матеріалу або незадовільну підготовку поверхні до зварювання. Вони здатні впливати на механічні характеристики шва та спричинити його крихкість. Для їх уникнення необхідно ретельно очищувати основний метал, застосовувати якісно підготовлені присадні матеріали та оптимальну техніку зварювання.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3.7 Включення оксидних плівок

Включення оксидних плівок – це зварювальний дефект, що трапляється через неналежне усунення шару оксиду перед зварюванням. Оксидні плівки мають високу температуру плавлення і можуть ускладнювати формування якісного металу зварного шва. Щоб уникнути цієї проблеми, слід вдатися до механічної або хімічної обробки поверхні. Доцільно використовувати інертний газ для захисту ділянки зварювання, а також ретельно налаштовувати параметри процесу зварювання, щоб запобігти повторному утворенню оксидів.

1.4 Способи зварювання сплавів алюмінію

Інтенсивний розвиток наземного, повітряного і морського швидкісного транспорту обумовлює необхідність застосування інноваційних високопродуктивних технологій отримання зварних з'єднань складнолегованих алюмінієвих сплавів. Це пов'язано з низкою недоліків, характерних для традиційних зварювальних процесів. Так, у разі застосування зварювання дугою плавкого електрода (MIG спосіб) відбувається значний перегрів електродного металу, що призводить до часткового вигорання легуючих елементів алюмінієвих сплавів. Це сприяє зниженню міцності отриманих з'єднань. Крім того, у процесі MIG зварювання формуються досить широкі шви і мають місце значні залишкові деформації. У разі застосування зварювання дугою неплавкого електрода (TIG спосіб) знижується продуктивність. Залишкові деформації теж значні. Ускладнює отримання зварних з'єднань і те, що процеси MIG і TIG зварювання вимагають попередньої розробки крайок заготовок, що зварюються [11].

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.4.1 Імпульсно-дугове зварювання

Імпульсно-дугове зварювання (ІДЗ) якісно відрізняється від традиційного зварювання в захисних газах, а також від ручного дугового зварювання модульованим струмом. Цей процес знаходить все більш широке використання при виготовленні зварних конструкцій з алюмінієвих сплавів, титану та конструкційних сталей міцністю до 500 МПа.

Пояснюється це тим, що в умовах імпульсно-дугового зварювання розширюються можливості керування процесами плавлення і переносу електродного металу в різних просторових положеннях, поліпшується формування швів, зменшуються об'єми перемішування електродного металу з основним металом та розміри зони термічного впливу (ЗТВ). Саме з цим пов'язано те, що такі відомі фірми, як Fronius (Австрія), Bohler (Німеччина), ESAB (Швеція), EWM (Німеччина) та інші, значну увагу в своїй діяльності приділяють розробці та виготовленню обладнання для реалізації і розширення можливостей імпульсно-дугового процесу зварювання в захисних газах. Значно слабше в технічній літературі висвітлені питання щодо впливу параметрів ІДЗ на термічні процеси, які відбуваються в металі ЗТВ зварних з'єднань, оскільки вони позначаються на структурі та механічних властивостях металів та сплавів, на їх опірність утворенню холодних тріщин і крихкому руйнуванню, тощо.

Окрім того існують відмінності у керуванні режимами імпульсно-дугового зварювання у різних виробників. На даному етапі в роботі проведені дослідження, які показані на рис. 1.4, щодо впливу режимів імпульсно-дугового зварювання з використанням джерела живлення EWM Phoenix Pulse 501 на формування шва, термічні цикли зварювання та механічні властивості зварних з'єднань низьколегованих сталей [10].

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

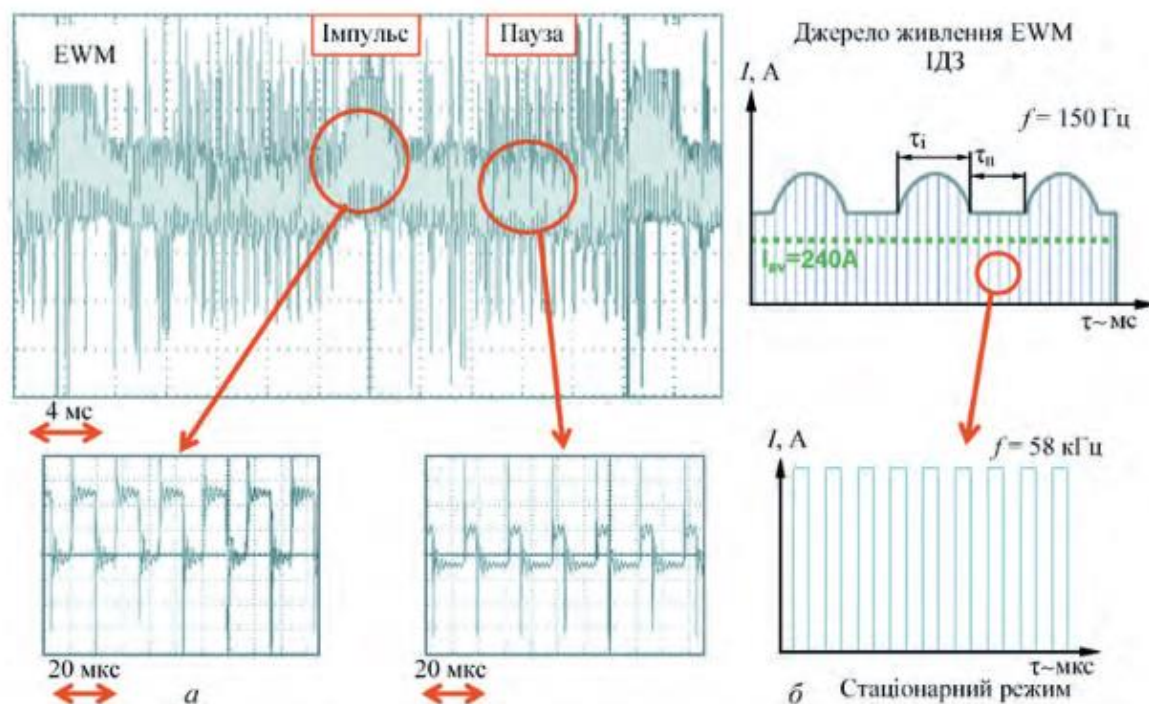


Рисунок 1.4 – Осцилограма зварювального струму для імпульсного режиму:
а – осцилограма у реальному часі; б – схематичне зображення [10]

Переваги такого способу зварювання полягають в зменшенні перегріву металу, що надає змогу зварювати тонкі матеріали та економити газ, але це призводить до складності налаштування, високої вартості зварювального комплексу та високої чутливості до складу електродів і захисних газів.

1.4.2 Плазмове зварювання

Плазмове зварювання (ПЗ) – це різновид дугового зварювання, при якому джерелом тепла є плазмова дуга, утворена між неплавким вольфрамовим електродом і виробом або між електродом і спеціальним соплом. Під час ПЗ деталі, що з'єднують, нагрівають плазмою електричної дуги, що стиснута потоком газу в каналі сопла плазмотрона (плазмового пальника). Діаметр плазмоутворюючого каналу менший за діаметр стовпа дуги, що вільно горить за такого самого значення струму зварювання. При ПЗ дугою прямої дії об'єкт зварювання належить до зварювального ланцюга. При

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЗ дугою непрямої дії дуговий розряд горить між електродом і соплом або між двома електродами в плазмотроні, а об'єкт зварювання нагрівається теплом плазмового струменя. У дугових плазмотронах плазмоутворюючий газ, що подають аксіально або з завихренням, перетворюється на плазмовий потік з температурою понад 10^4 К.

Для використання інертних газів (аргон, гелій тощо), як плазмоутворюючого середовища, у плазмотронах встановлюють електрод з вольфраму, сопла виготовляють з міді. Іноді вставки виготовляють з вольфраму, молібдену та інших тугоплавких металів. У дугових плазмотронах, в яких використовують активні гази (повітря, вуглекислий газ тощо), основний електрод - мідний з цирконієвими або гафнієвими вставками. Для запобігання розплавлення теплом дуги елементи плазмотрона інтенсивно охолоджують. Зварювальні плазмотрони мають зовнішнє сопло, через яке подають захисний газ. Джерела електроживлення дугових плазмотронів розраховані на підвищену напругу стисненої дуги, містять додаткові пристрої для її збудження та забезпечення стабільності процесу. Плазмові пальники можуть бути змонтовані на будь-яких зварювальних маніпуляторах або роботах, зокрема з можливістю додавання присадного дроту.

Процес ПЗ відрізняється від зварювання дугою, що вільно горить, підвищеним коефіцієнтом корисної дії, більшою концентрацією енергії та значним газодинамічним тиском на поверхню зварювальної ванни. Завдяки цьому з металу шва видаляються оксидні та шлакові домішки, зменшується зона термічного впливу, знижуються деформації зварного з'єднання. Крім того, ПЗ забезпечує значну глибину проплавлення при порівняно малому тепловкладенні.

За високого газодинамічного тиску плазмового потоку можливе наскрізне проплавлення зварюваного металу, що дозволяє реалізувати процес плазмового різання матеріалів.

Мікроплазмове зварювання постійним струмом прямої полярності дозволяє зварювати всі метали товщиною від 0,1 мм до 1,5 мм, за винятком

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

алюмінію. Для мікроплазмового зварювання алюмінію та його сплавів було розроблено спосіб, що ґрунтується на використанні різнополярних імпульсів струму дуги [12].

Переваги такого способу полягає у високій температурі, що дозволяє зварювати алюміній, який має високу теплопровідність. Формуються чисті та якісні шви завдяки стабільності процесу зварювання, мінімальна за розміром зона термічного впливу, що зменшує ризик деформації матеріалу. Але температуру досить складно контролювати, адже алюміній вже за температури близько 650 °С починає плавитись. Необхідно використовувати гази (аргон, суміш з воднем) для захисту шва.

1.4.3 Плазмо-дугове зварювання різнополярним асиметричним струмом з прямокутною формою імпульсу струму

Процес плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом (англійською мовою Variable Polarity Plasma Arc Welding або аббревіатурою VPPAW) з прямокутною формою імпульсу струму характеризується можливістю ефективного керування амплітудами струму на прямій та оберненій полярностях, а також надає можливість регулювати частоту різнополярного струму та тривалість горіння дуги на прямій полярності (а відповідно і тривалість горіння дуги на оберненій полярності). За рахунок максимально наближеної до прямокутника форми імпульсів зварювального струму відбувається швидкий перехід від оберненої полярності до прямої. При цьому дуга не потребує додаткового «підживлення» високовольтним імпульсом, що характерно для аргонодугового та плазмо-дугового зварювання змінним синусоїдальним струмом. При VPPAW тривалість горіння дуги на оберненій полярності обирається таким чином, щоб забезпечити мінімально можливий час ефективного руйнування оксидної плівки на поверхні алюмінієвих сплавів. При цьому амплітуда струму в

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оберненій полярності може бути більшою за амплітуду в прямій полярності на 35-50 А залежно від хімічного складу алюмінієвих сплавів.

Процес VPPAW, в першу чергу, спрямований на виконання зварювання алюміній-мідного сплаву 2219 (Al-Cu-Mn) як заміна зварюванню на постійному струмі прямої полярності в гелії. Плазмо-дугове зварювання вимагає високої точності збирання заготовок під зварювання.

Такий спосіб забезпечує ефективне очищення від оксидів. Оскільки в позитивний напівперіод змінного струму (електрод +) реалізується катодне очищення, видаляючи стійку оксидну плівку Al_2O_3 , яка має дуже високу температуру плавлення. Негативна полярність нагріває електрод менше – це дозволяє використовувати тонкіші вольфрамові електроди і збільшує їх ресурс.

Основні проблеми – це підтримання стабільності формування наскрізного каналу в процесі плазмо-дугового зварювання на вертикальній площині, зменшення пористості металу шва, в першу чергу за рахунок підвищення вимог до якості плазмоутворюючого та захисного газів [13].

1.5 Технологічне спорядження та особливості технології зварювання алюмінієвих сплавів

1.5.1 Спорядження для стабілізації та фіксації компонентів

Для стабілізації та фіксації компонентів використовують зварювальні стенди, що дозволяють утримувати зразки у необхідному положенні. Застосовуються механічні чи пневматичні затискачі, які перешкоджають зміщенню деталей під час зварювання. При зварюванні сплавів алюмінію можуть бути корисні пристрої регулювання подачі газу, що сприяють забезпеченню рівномірного захисту від окиснення.

Для підвищення якості з'єднання використовуються сталеві або мідні підкладки, які допомагають рівномірно сформувати зворотний бік шва (корінь шва) та уникнути перегріву металу. Використання керамічних підкладок теж можливе, адже вони добре витримують високі температури

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та не деформуються. При зварюванні труб або великих конструкцій часто використовують спеціальні фіксуючі кільця або розсунні пристрої, що забезпечують точне позиціонування з'єднання.

Велике значення мають установки для підігріву деталей, що використовуються перед зварюванням для зменшення ризику утворення гарячих тріщин. Також застосовуються системи подачі газу, які регулюють подачу аргону або гелію для створення стабільного середовища зварювання. При використанні джерела живлення, обов'язкове заземлення, що забезпечує безпеку при виконанні роботи. Необхідно забезпечити охолодження блоку пальника під час масштабних робіт, змінні сопла пальника. Також необхідні арматура та шланги, балони для газу, редуктор для зниження тиску газу, маски «Хамелеон».

1.5.2 Підготовка алюмінієвих сплавів до зварювання

Перед початком зварювання алюмінієвих сплавів необхідно виконати ретельну підготовку тих поверхонь, що мають бути з'єднані. Спочатку виконують механічне очищення, що передбачає видалення забруднень, оксидної плівки та інших недоліків. Для цього використовують щітки з нержавіючої сталі, абразивні матеріали чи обробку шліфуванням. Для більш глибокого очищення вдаються до хімічної обробки – деталі занурюють у лужні або кислотні розчини з подальшим їхнім промиванням водою та висушуванням поверхні повітрям.

Паралельно з очищенням здійснюють добір відповідного присадного металу. Його склад має відповідати різновиду алюмінієвого сплаву та умовам експлуатації майбутнього зварного з'єднання. Найчастіше для зварювання сплавів алюмінію використовують методи TIG (зварювання неплавким електродом в аргоні) та MIG (зварювання плавким електродом у середовищі інертного газу), які забезпечують високу якість швів. Ще одним важливим моментом підготовки є дотримання температурного режиму – для запобігання

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перегріву та деформацій зварюваних деталей часто використовують попередній підігрів та контроль швидкості зварювання.

1.6 Аналіз рекомендацій по зварюванню сплаву 1570, визначення мети та завдань досліджень

Однією з основних технологічних проблем зварювання алюмінію є наявність оксидної плівки Al_2O_3 , яка має високу температуру плавлення і негативно впливає на якість зварного шва [14], [15]. Для її руйнування у процесі зварювання застосовують режими зі змінним або асиметричним різнополярним струмом. Практичні рекомендації щодо попередньої обробки поверхонь та підготовки матеріалу містяться у [16].

Крім того, у [14], [15] зазначено, що присутність пор і неметалевих включень може бути зумовлена недостатньою якістю підготовки дроту та основного металу. Саме тому подається детальний опис процесів знежирення, хімічного травлення та контрольованого сушіння деталей перед зварюванням, що дає змогу знизити ймовірність виникнення критичних дефектів.

Особливу увагу приділено аналізу можливих дефектів зварних з'єднань. Типові дефекти алюмінієвих сплавів – це пори, неметалеві включення, мікро- та макротріщини, непровари [14], [15]. Методи попередньої підготовки, контроль параметрів процесу та оптимізація режимів подачі тепла дозволяють знизити ризик їх утворення.

Контроль якості зварних з'єднань є важливим етапом забезпечення надійності конструкцій. Для цього застосовуються методи ультразвукового та радіографічного неруйнівного контролю [17], [18]. Відповідно до ДСТУ EN 1714:2015 [18] рекомендовано використовувати ультразвуковий контроль для виявлення внутрішніх дефектів, а також візуально-оптичний контроль для зовнішнього огляду зварних швів.

Особливі вимоги до організації безпечних умов праці при зварюванні алюмінієвих сплавів визначено у відповідних санітарних нормах і державних

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

будівельних нормах [19-22]. Зокрема, при зварюванні з використанням плазових джерел тепла необхідно враховувати рівні шуму, вібрації та допустимі концентрації аерозолів металів у повітрі робочої зони.

Окремо варто відзначити роль скандію як елемента, що не лише покращує структуру зварного шва, але й зменшує ймовірність утворення гарячих тріщин у зоні термічного впливу. Це підтверджується даними [6], [7], де вказано, що саме утворення дисперсних частинок Al_3Sc забезпечує стабільність структури навіть за інтенсивного термічного навантаження. Цирконій, у свою чергу, запобігає укрупненню зерна при охолодженні, що дозволяє досягти рівномірної мікроструктури.

На основі проведеного аналізу можна визначити мету та завдання досліджень.

Мета дослідження – встановлення раціональних режимів плазово-дугового зварювання алюмінієвого сплаву 1570 із використанням різнополярного асиметричного струму та оцінка впливу технологічних параметрів на формування зварного з'єднання.

Завдання дослідження:

- здійснити аналіз застосовних способів зварювання сплавів алюмінію, схильності до утворення дефектів та методів запобігання їх утворенню;
- проаналізувати хімічний склад та властивості сплаву 1570 й обґрунтувати вибір присадного дроту для його зварювання та рекомендовані технологічні параметри;
- вивчити вплив частоти різнополярного струму та тривалості фаз прямої і зворотної полярності на формування зварного шва;
- дослідити особливості формування шва у нижньому та вертикальному положеннях;
- виконати аналіз результатів контролю якості зварних з'єднань методами радіографії та ультразвукової дефектоскопії;

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- розробити рекомендації щодо забезпечення стабільної якості зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 1570.

Об'єкт дослідження – процес плазово-дугового зварювання алюмінієвого сплаву 1570.

Предмет дослідження – вплив параметрів зварювального режиму на формування та характеристики якості зварних з'єднань.

Висновки по розділу 1

У першому розділі проаналізовані фізико-хімічні властивості алюмінію та особливості його зварювання. Встановлено, що алюмінієві сплави мають високу теплопровідність, низьку температуру плавлення та формують оксидну плівку Al_2O_3 , яка ускладнює зварювальний процес.

Показано, що наявність водню та інших газів у розплаві сприяє утворенню пор і зниженню якості шва.

Розглянуті типові дефекти, що виникають при зварюванні, та умови їх утворення.

Надана характеристика основних способів зварювання алюмінію, зокрема ІДЗ, TIG, MIG та плазово-дугового зварювання, із наведенням їх переваг і обмежень.

Також узагальнені вимоги до підготовки з'єднуваних поверхонь та обладнання. Особливу увагу приділено сплаву 1570, легованому скандієм і цирконієм, який має задовільну технологічну здатність до зварювання і стійкість до утворення гарячих тріщин.

Сформульовані мета, об'єкт, предмет та основні завдання дослідження.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

ПДЗ із застосуванням різнополярного асиметричного струму виконували із використанням промислового зварювального обладнання виробництва компанії Fronius (Австрія). Комплекс для зварювання у своєму складі має наступні основні технічні елементи: джерело живлення MW 450, адаптоване для аргонодугового зварювання (рис. 2.1); модуль плазмовий FPM (рис. 2.2); пристрій подачі зварювального дроту KD 4000 (рис. 2.3); система цифрового керування процесом зварювання FPA 2003-Plasma (рис. 2.4, 2.5).

Переміщення джерела тепла, стиснутої дуги, здійснювалося за допомогою спеціального механізму переміщення, змонтованого на основі установки типу АСТЭ-7 (рис. 2.6, 2.7).

Формування дуги асиметричного змінного струму забезпечувалося плазмотронами моделей PMW 350-2 (Plasmatechnik, рис. 2.8) та Robacta PTW 3500 F+ (Fronius), рис. 2.9, які гарантують стабільне згоряння дуги за складних режимів.

2.1 Джерело зварювального струму MW 450

Зварювальний агрегат MW 450 призначений для аргонодугового зварювання з використанням неплавкого вольфрамового електрода на постійному струмі прямої полярності, а також у режимі різнополярного асиметричного струму, наведений на рис. 2.1.

У режимі змінного струму з його асиметрією зварювальне джерело електричного струму MW 450 дозволяє здійснювати зварювання в діапазоні частот від 40 Гц до 240 Гц. Частота зварювального струму регулюється безступінчасто як через потенціометр на фронтальній панелі, так і через зовнішню систему автоматизованого керування зварювальним процесом (FPA 2003-Plasma).

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Джерело живлення забезпечує стабільне горіння електричної дуги при зварювальному струмі від 10 А до 450 А. Для точного контролю параметрів режиму зварювання реалізовано систему стабілізації струму з похибкою не більше ± 1 А.

З метою зменшення зносу вольфрамового електрода у фазі запалювання передбачено функцію контрольованого збільшення електричного струму – від стартового до робочого значення. Регулювання часу збільшення електричного струму змінюється в діапазоні значень від 0,1 с до 7,0 с.

Також реалізовано плавне зменшення величини електричного струму після завершення процесу зварювання для заварювання кратера – із регульованим часом згасання електричної дуги в межах від 0,1 с до 7,0 с. Величина електричного струму для цієї фази задається потенціометром або через цифрову систему керування процесом зварювання.



Рисунок 2.1 – Модифіковане джерело живлення зварювального електричного струму MW 450 призначене для аргонодугового зварювання на різнополярному асиметричному струмі

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Окрім того, для роботи з тонкостінними деталями та заготовками які мають специфічні вимоги щодо геометричної форми зварного шва передбачено режим модульованого зварювального електричного струму, що дозволяє впливати на глибину проплавлення металу та стабільність існування зварювальної ванни.

Зварювальне джерело живлення електричного струму MW 450 реалізує функцію імпульсної модуляції зварювального струму в діапазоні частот від 0,25 Гц до 10 Гц, технічні характеристики джерела живлення зварювального електричного струму наведено в таблиці 2.1.

Тривалість фази імпульсу електричного струму та фази його паузи може задаватися як з використанням зовнішнього пульта керування FR 50-1, так і через цифрову систему керування зварювальним процесом.

Для забезпечення ефективного катодного очищення поверхні деталей зі сплавів на основі алюмінію та підвищення ресурсу вольфрамового електрода в режимі плазово-дугового зварювання передбачено регулювання співвідношення тривалостей протікання електричного струму при прямій та зворотній полярностях. Ця функція дозволяє змінювати тривалість дії струму прямої полярності в межах від 15 % до 85 % від загального періоду часу дії, при цьому задане співвідношення зберігається незалежно від обраної частоти різнополярного асиметричного зварювального електричного струму.

Для інтеграції зварювального електричного джерела живлення струму MW 450 до складу автоматизованих або роботизованих зварювальних систем, на задній панелі пристрою встановлений універсальний інтерфейсний роз'єм, що забезпечує підключення до систем зовнішнього керування процесом зварювання. При роботі джерела живлення у складі зварювального комплексу всі функції контролю та налаштування виконуються виключно через центральну систему керування процесом зварювання.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З метою забезпечення стабільного запалення та горіння стисненої електричної дуги, в конструкції джерела було підвищено верхню межу робочої напруги з 34 В до 53 В.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики джерела зварювального електричного струму MW 450.

Параметр	Величина
Напруга трифазної мережі змінного електричного струму, 50 Гц, В	380
Максимальна споживана потужність, кВА	24
Максимальний струм споживання, А	35
Робочі режими джерела живлення електричного струму	Plasma AC/DC
Діапазон регулювання електричного струму в режимі Plasma AC, А	10...450
Діапазон регулювання електричного струму в режимі Plasma DC, А	5... 450
Номінальний зварювальний електричний струм при ПВ 100 %, А	360
Номінальний зварювальний електричний струм при ПВ 60 %, А	450
Регулювання тривалості електричного струму при прямій полярності, % від періоду	15...85
Частота зварювального електричного струму, Гц	40...250
Тривалість дії електричного струму заварювання кратера, с	0...8
Робоча напруга в режимі Plasma AC, В	0...53
Напруга холостого ходу джерела живлення, В	70
Частота зварювального електричного струму, Гц	40...250
Час нарощування електричного струму від стартового до робочого значень, с	0...7
Час спаду електричного струму до значення заварювання кратера, с	0...7
Регулювання початкового електричного струму, % від робочого	0...100
Регулювання електричного струму заварювання кратера, % від робочого	0...100
Витрата плазмоутворювального газу, л·хв ⁻¹	0,1...10
Час передзварювальної продувки плазмоутворювальним газом, с	0...3
Час передзварювальної продувки захисним газом, с	0...99
Час післязварювальної продувки плазмоутворювальним газом, с	0...15
Час післязварювальної продувки захисним газом, с	0...99
Діапазон регулювання електричного струму під час режиму імпульсного зварювання, Гц	0,25...10
Діапазон регулювання електричного струму підтримувальної дуги, А	5...50

Джерело живлення зварювального електричного струму MW 450 вже знято з серійного виробництва компанією Fronius. Йому на заміну розроблені сучасні моделі MW 4000 та MW 5000, які повністю зберігають функціональні

можливості попередньої версії, а також мають розширені можливості у частині сервісного обслуговування. Оновлені джерела живлення зварювального електричного струму краще інтегруються до складу автоматизованих та роботизованих зварювальних систем, зокрема завдяки підтримці сучасних інтерфейсів керування та завдяки новим системам та алгоритмам діагностики.

2.2 Плазмовий модуль FPM

Плазмовий модуль типу FPM, наведений на рис. 2.2, виконує функцію формування стабільної фонової дуги постійного струму з прямою полярністю, яка необхідна для попередньої іонізації газового середовища перед збудженням основної зварювальної електричної дуги. Модуль забезпечує надійне підпалювання та стале горіння електричної дуги у технологічному діапазоні регульованого електричного струму від 5 А до 50 А.



Рисунок 2.2 – Плазмовий модуль FPM

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Параметри електричного струму встановлюються залежно від типу плазмотрона, який застосовується та умов конкретного зварювального процесу. Для роботи з плазмотронами PMW 350-2 (виробництво Plasmatechnik) та Robacta PTW 3500 F+ (виробництво Fronius) рекомендоване номінальне значення електричного струму чергової дуги становить 20 А, що забезпечує оптимальну термоелектричну стійкість дуги та стабільний запуск основного дугового розряду.

Завдяки точному регулюванню електричного струму фонового розряду модуль FPM забезпечує високу повторюваність процесу запалювання плазмової дуги, що є критично важливим для застосування в автоматизованих системах зварювання.

Модуль FPM виконує не лише функцію генерації чергової дуги, він також забезпечує контрольовану подачу плазмоутворювального газу до зони формування плазмової дуги. Робочий діапазон витрат плазмоутворювального газу становить від $0,1 \text{ л} \cdot \text{хв}^{-1}$ до $10 \text{ л} \cdot \text{хв}^{-1}$, із дискретністю налаштування $0,1 \text{ л} \cdot \text{хв}^{-1}$. За рахунок застосування електрично керованого пневматичного клапана забезпечується висока точність регулювання подачі газу. Регулювання витрати газу здійснюється: локально – через потенціометр на передній панелі модуля; дистанційно – з пульта централізованого керування процесом зварювання. Конструкція модуля передбачає його сумісність із джерелами живлення постійного або змінного (різнополярного) електричного струму серій TT, TS та MW виробництва Fronius. Пристрій може застосовуватись як у ручному, так і в автоматизованому режимах при плазмово-дуговому зварюванні, зокрема при обробці алюмінієвих сплавів.

Станом на сьогодні модуль FPM виведено з виробничої лінії. На основі досвіду його промислової експлуатації було здійснено оновлення конструкції, в результаті чого розроблено нову модель – плазмовий модуль PM 10, з розширеним функціоналом і покращеними характеристиками для сучасних зварювальних систем.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3 Блок подачі присадного дроту KD 4000

Блок подачі присадного дроту типу KD 4000, представлений на рис. 2.3, призначений для подачі присадного дроту круглого перерізу до зони зварювання в складі автоматизованих систем зварювання. Конструкцією блоку подачі присадного дроту передбачено можливість використання змінних притискних роликів: із трапецієподібною геометричною формою канавки – для подавання сталевого дроту; з напівкруглою геометричною формою канавки – для подавання алюмінієвого дроту.

Підтримується подача дроту діаметрами: 0,8 мм; 1,2 мм; 1,6 мм; 2,0 мм. Максимальне значення швидкості подавання дроту складає до 750 см·хв⁻¹. Подача може здійснюватися в безперервному або пульсуючому (циклічному) режимах залежно від вимог до формування шва.



Рисунок 2.3 – Блок подачі присадного дроту KD 4000

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Механізм розрахований на роботу виключно в складі автоматизованих або роботизованих зварювальних систем, з передбаченим інтерфейсом для підключення до централізованої системи керування процесом зварювання.

2.4 Система керування зварювальним процесом FPA 2003-Plasma

Система автоматизованого керування зварювальним процесом FPA 2003-Plasma реалізована на основі системного контролера FPA 2003 та виносного пульта керування FPA-RC, обладнаного рідкокристалічним дисплеєм.

Контролер орієнтований на забезпечення повного циклу управління процесом плазово-дугового зварювання із використанням неплавкого електрода при подачі постійного або асиметричного різнополярного зварювального електричного струму. Система представлена на рис. 2.4.

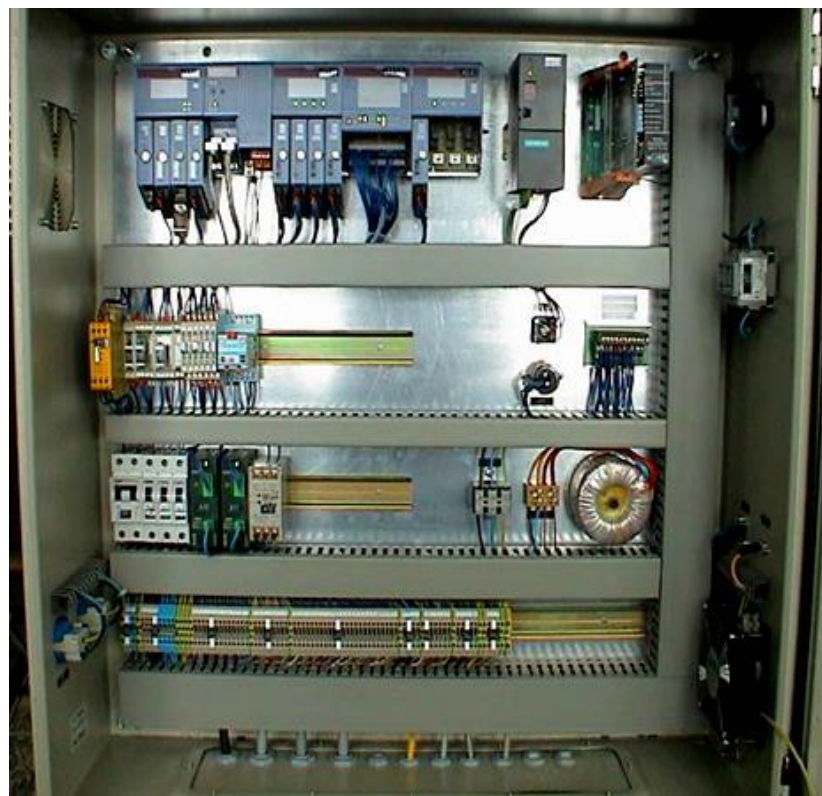


Рисунок 2.4 – Система керування зварювальним процесом FPA 2003-Plasma

Завдяки встановленому вдосконаленому програмному забезпеченню TIG/Plasma process, система дозволяє здійснювати гнучке налаштування всіх ключових параметрів процесу зварювання безпосередньо з пульта керування.

Основні функціональні можливості системи керування процесом зварювання: вибір режиму полярності джерела живлення електричного зварювального струму MW 450 (постійний струм прямої полярності або асиметричний змінний електричний зварювальний струм); встановлення величини зварювального електричного струму в діапазоні від 10 А до 450 А; оперативне коригування зварювального електричного струму під час роботи; налаштування часу попередньої подачі плазмоутворювального газу (від 0 с до 3 с) і захисного газу (від 0 с до 99 с) до початку запалення електричної дуги; встановлення початкового електричного струму в межах від 10 А до 450 А; керування плавним збільшенням зварювального електричного струму від початкового до робочого значення протягом від 0 с до 7 с; налаштування плавного зменшення зварювального електричного струму в кінці зварювання (з метою уникнення кратерів) до струму заварювання кратера протягом від 0 с до 7 с; встановлення величини електричного струму заварювання кратера та тривалості його підтримання (від 0 с до 99 с); регулювання часу продувки плазмоутворювальним газом після закінчення процесу зварювання (від 0 с до 15 с) і захисним газом (від 0 с до 99 с); налаштування частоти асиметричного різнополярного зварювального електричного струму в діапазоні від 40 Гц до 250 Гц; встановлення співвідношення тривалості фаз прямої і зворотної полярності (від 15 % до 85 % від загальної тривалості періоду зварювання), що забезпечує ефективне катодне очищення поверхні сплавів на основі алюмінію та знижує деградацію вольфрамового електрода; підтримка режиму модуляції зварювального електричного струму з частотою від 0,25 Гц до 10 Гц, тривалістю імпульсу від 51 мс до 200 мс; незалежне налаштування значення електричного струму під час імпульсу і паузи в межах від 10 А до 450 А.

Окрім параметричного керування, FPA-RC забезпечує: запуск/зупинку зварювального циклу; аварійне вимкнення всієї системи; оперативне внесення

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

змін у параметри подачі дроту та витрату плазмоутворювального газу під час процесу зварювання.



Рисунок 2.5 – Виносний пульта керування FPA-RC

Коригування параметрів режиму зварювального процесу здійснюється за допомогою функціональних клавіш. Межі допустимих змін робочих параметрів задаються оператором для унеможливлення перевищення критичних значень. Актуальні робочі параметри процесу зварювання виводяться на РК-дисплей пульта FPA-RC у реальному часі. Загальний вигляд виносного пульта керування наведений на рис. 2.5.

Для інтеграції з блоком подачі присадного дроту KD 4000 до складу FPA 2003-Plasma входить модуль Addressing wire feeder. Він забезпечує: регулювання швидкості подачі присадного дроту в межах від $0 \text{ см} \cdot \text{хв}^{-1}$ до 750

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

см·хв⁻¹; реалізацію циклічного (переривчастого) режиму подачі присадного дроту; встановлення затримки запуску подачі присадного дроту після запалювання електричної дуги; визначення часу затримки зупинки подачі присадного дроту після згасання електричної дуги.

Система дозволяє зберігати до 200 програм користувача з повним набором робочих параметрів процесу зварювання. Обрані програми можуть швидко завантажуватись з пам'яті та запускатись для зварювання однотипних деталей та виробів, що забезпечує високу повторюваність та стабільність характеристик зварного шва.

В якості додаткової опції передбачено підключення зовнішнього модуля зберігання даних щодо налаштування зварювального процесу, що забезпечує можливість зручного перенесення зварювальних програм на інші комплекси.

Застосування спеціалізованого програмного забезпечення FPA MANAGER відкриває додаткові сучасні можливості дистанційного налаштування робочих параметрів зварювального процесу та їх коригування без необхідності безпосереднього фізичного підключення ПК до блоку керування. Це дає змогу здійснити попередню конфігурацію зварювальної програми, реалізувати її верифікацію, а також формувати бібліотеки технологічних параметрів режимів зварювання із подальшим передаванням у систему FPA 2003-Plasma.

Програмно-апаратний комплекс FPA 2003-Plasma може бути розширений для керування виконавчими механізмами лінійного або обертального типу. Це дозволяє автоматизувати рух зварювального пальника по складних траєкторіях, зокрема виконувати зварювання нерухомих кільцевих стиків, що зазвичай притаманне складальним операціям у суднобудуванні, авіаційній промисловості та трубному виробництві.

Інтегрований модем забезпечує дистанційний технічний супровід: фахівці компанії Fronius мають змогу виконувати діагностику та оновлення програмного забезпечення через інтернет-з'єднання, що значно зменшує час простою та полегшує сервісне обслуговування обладнання.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У стандартну комплектацію закладено опцію підключення та керування зовнішніми пневматичними приводами – наприклад, для автоматизованої подачі заготовок, позиціонування деталі або керування шиберними клапанами систем подавання газів.

2.5 Механізм просторового позиціонування

Для реалізації технологічного процесу плазово-дугового зварювання використовувалась експериментальна установка, розроблена в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, представлена на рис. 2.6. Основу конструкції експериментальної установки становлять вузли й компоненти від промислових стендів типу АСТЭ-7 та АСТВ-2м, які були доопрацьовані з метою підвищення точності та стабільності позиціонування робочих елементів при тривалій роботі.

Конструктивною особливістю цієї експериментальної установки є фіксоване положення плазмотрона. Замість переміщення пальника, просторове переміщення здійснює зварювальний стіл, на якому жорстко закріплюється деталь або зварювальне пристосування. Лінійне переміщення деталі реалізовано по двох напрямних рейках із приводом на базі гвинтової передачі. Як виконавчий механізм застосовано електропривід, що живиться постійним електричним струмом з робочою напругою 110 В.

Система дозволяє здійснювати зварювання зі швидкістю в межах від 5 м-год⁻¹ до 60 м-год⁻¹. Регулювання швидкості переміщення робочого стола виконується шляхом зміни електричної напруги на якорі електродвигуна, а також за рахунок добору передавального числа редуктора, який розташований в приводній частині системи переміщення.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.6 – Установка для плазмово-дугового зварювання, налаштована для виконання горизонтального зварювального шва на горизонтальній поверхні

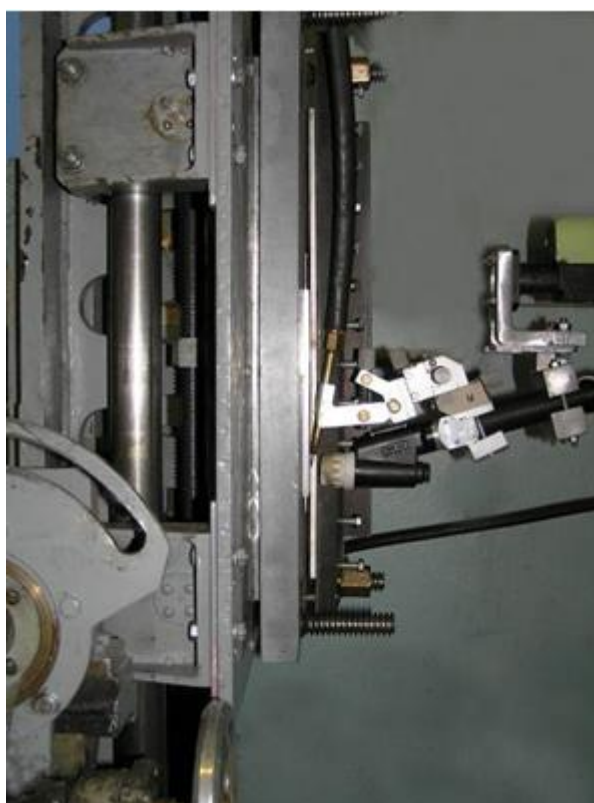


Рисунок 2.7 – Установка, налаштована для виконання вертикального зварювального шва на вертикальній поверхні

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Конструкція системи допускає інтеграцію механізму переміщення з поворотною платформою, що дозволяє суттєво розширити функціональні можливості експериментального обладнання. Завдяки цьому експериментальна установка здатна забезпечити зварювання як у горизонтальному, так і у вертикальному положенні. Налаштування обладнання для зварювання у вертикальному положенні представлене на рис. 2.7. Залежно від просторового розташування деталі можливе виконання швів «на підйом» або «на спуск».

Кут нахилу зварювального стола регулюється в межах від 0° до 90° відносно горизонтальної площини. Це дозволяє адаптувати установку до виконання різноманітних технологічних задач, зокрема здійснювати зварювання вертикальних стиків на площинних деталях складної геометричної форми.

2.6 Плазмотрон PMW 350-2

Плазмотрон PMW 350-2, зображений на рис. 2.8, призначений для зварювання у режимі стисненої дуги (плазми) із застосуванням прямої полярності постійного електричного струму у діапазоні від 10 А до 350 А при ПВ 100 %. У разі використання асиметричного змінного зварювального електричного струму з переважанням часу періоду дії струму прямої полярності, допустиме значення зварювального електричного струму становить до 320 А, без зменшення стабільності процесу.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

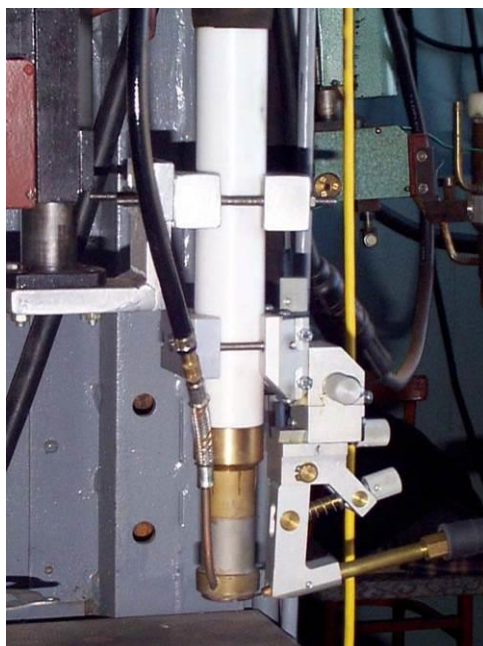


Рисунок 2.8 – Плазмотрон PMW 350-2

Для забезпечення ефективного формування стисненої електричної дуги плазмотрон оснащується змінними плазмоутворювальними соплами, діаметр центрального каналу яких складає: 2,0 мм; 2,8 мм; 3,2 мм; 3,5 мм або 4,0 мм. Оптимальний діаметр обирається з урахуванням стабільності горіння електричної дуги за умови уникнення явища подвійного дугоутворення.

Для зменшення динамічного тиску потоку струменя інертного газу на розплавлений метал зварювальної ванни, в конструкції кожного сопла передбачено два бічних отвори діаметром 1,0 мм, які розташовані симетрично відносно основного газового каналу. Під час монтажу сопла плазмотрона необхідно орієнтувати його таким чином, щоб вісь, яка проходить крізь зазначені додаткові отвори, була перпендикулярною до осі зварного шва.

Двійникова електрична дуга – небажане явище, при якому виникає паразитна дуга між соплом та поверхнею заготовки, що обробляється. Основними причинами появи подвійної електричної дуги є надмірна величина зварювального електричного струму для обраного діаметра сопла та недостатня витрата плазмоутворювального газу.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Газове сопло водяного охолодження з внутрішнім діаметром 30 мм використовується для захисту зони зварювання від впливу оточуючого повітря. Можливе застосування вдосконаленого неохолоджуваного газового сопла з подовженим кожухом. Таке сопло застосовують під час виконання робіт з матеріалами, що чутливі до насичення газами.

В якості центрального електрода плазмового пальника застосовуються вольфрамові стрижні марки WL10 діаметром 4,0 мм і довжиною до 130 мм. Кут заточування стрижнів складає 60°.

Останні розробки фірми Plasmatechnik Markus Colling GmbH & Co KG (PMC) включають вдосконалені версії водоохолоджуваних газових сопел, які розширюють зону дії захисту інертного газу. Виробником, випущені модифікації плазмотронів PMW 350-S 90 і PMW 350-S 180, які мають наступні переваги: зручніший доступ до електрода для його заміни та юстування; покращену конструкцію корпусу плазмового пальника; інтегровані посадкові місця для кріплення спрямовуючих пристроїв для подачі присадного матеріалу (дроту).

2.7 Плазмотрон Robacta PTW 3500 F+

Плазмотрон Robacta PTW 3500 F+, наведений на рис. 2.9, призначений для зварювання стиснутою плазмовою електричною дугою на прямій полярності постійного електричного струму або в режимі асиметричного різнополярного змінного зварювального струму. Максимальна величина зварювального струму становить 350 А при ПВ 100 %. Це забезпечує надійну та безперервну роботу обладнання в інтенсивному режимі.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.9 – Плазмотрон Robacta PTW 3500 F+

Для досягнення якісного стискання електричної дуги, плазмотрон може бути оснащений соплами діаметром: 3,2 мм; 3,5 мм або 4,0 мм. Матеріалом для виготовлення сопел є спеціальний мідний сплав, який характеризується високою теплопровідністю та стійкістю до ерозії. Конструкція кожного сопла включає центральний канал, а також два додаткові отвори діаметром 1,0 мм. Наявність додаткових отворів сприяє підвищенню стабільності горіння плазмової дуги – за принципом, подібним до моделі PMW 350-2.

В якості електродів використовуються вольфрамові стрижні діаметром 4,8 мм або 6,4 мм. Особливістю конструкції є можливість заміни та регулювання глибини вильоту електрода без необхідності демонтажу плазмоутворювального сопла. Така конструкція пальника характеризується суттєво підвищеною ергономічністю та спрощенням обслуговування.

Керамічне сопло діаметром 28 мм та мідне сопло діаметром 32 мм використовується для захисту зони зварювання від оточуючого повітря. Можливе застосування спеціального водоохолоджуваного сопла з розширеною зоною захисту металу зварного шва та ЗТВ.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновок по розділу 2

Для проведення досліджень застосований промисловий зварювальний комплекс виробництва Fronius (Австрія), адаптований для реалізації плазмово-дугового зварювання. До складу системи входять: джерело живлення зварювального електричного струму MW 450, плазмовий модуль FPM, блок подачі присадного дроту KD 4000, програмно-апаратний комплекс керування FPA 2003-Plasma та механізм просторового позиціонування на базі промислової установки АСТЭ-7.

Технічні характеристики зварювального джерела живлення електричного струму MW 450 забезпечують стабільне горіння плазмової дуги в широкому діапазоні струмів (до 450 А) та частот (до 250 Гц), з можливістю регулювання співвідношення часу дії фаз прямої і зворотної полярності зварювального струму, що є критично важливим при зварюванні сплавів на основі алюмінію.

Плазмовий модуль FPM забезпечує стабільне існування чергової електричної дуги та точну подачу плазмоутворювального газу. Блок KD 4000 гарантує стабільну подачу присадного дроту. Система FPA 2003-Plasma реалізує контроль процесу зварювання, включаючи програмування режимів технологічного процесу, зміну його параметрів у режимі реального часу та підтримку автоматизованого керування подавання присадного дроту, захисного та плазмоутворювального газів й електричного зварювального струму.

Застосування плазмотронів моделей PMW 350-2 і Robacta PTW 3500 F+ дало змогу реалізувати стабільний процес зварювання, зокрема і при інтенсивних режимах роботи. Обидва плазмотрони мають змінні охолоджувані газові сопла.

Обране обладнання забезпечило виконання всіх експериментальних досліджень, а також дозволило адаптувати технологію до різних типів з'єднань зі сплавом 1570.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Хімічний склад та властивості сплаву АМг6

Алюмінієвий сплав АМг6 відноситься до сплавів які деформуються. Основним компонентом сплаву типу АМг6 є алюміній (Al) з масовою часткою в межах від 91 % до 93 %. Актуальність застосування сплаву АМг6 обумовлена його малою густиною, що забезпечує зменшення маси готових виробів, зокрема у конструкціях, де вагові характеристики мають критичне значення. Корозійна стійкість сплавів алюмінію пояснюється наявністю на їх поверхні тонкої, але термодинамічно стійкої оксидної плівки, яка утворюється при контакті з киснем і вологим навколишнім середовищем. Ця оксидна плівка ефективно ізолює метал від подальшого окиснення [23].

Магній (Mg), у концентрації від 5,8 % мас. до 6,8 % мас., є основним легуючим елементом у системі Al-Mg. Введення магнію сприяє утворенню міцних міжатомних зв'язків та термодинамічно стійких хімічних сполук, що забезпечують підвищені характеристики міцності та жорсткості сплаву. Окрім того, магній позитивно впливає на стійкість до корозійного пошкодження сплавів на основі алюмінію, особливо у вологих середовищах, таких як морська вода або промислова атмосфера з підвищеною агресивністю [24].

Марганець (Mn), присутній у кількості до 0,5 % мас., виконує функцію легуючого елемента стабілізуючого структуру сплаву, що сприяє формуванню рівномірної зернистої мікроструктури. Така дія забезпечує підвищену опірність до зношування та зменшує ймовірність розвитку корозійно-напружених тріщин, що особливо актуально при експлуатації матеріалу в умовах змінних навантажень [6].

Залізо (Fe) і кремній (Si), що наявні у вигляді супутніх домішок (до 0,4 % мас. кожного), не мають цільового легуючого призначення, проте можуть впливати на здатність сплаву до механічної обробки. У помірних концентраціях ці елементи здатні покращити технологічні характеристики матеріалу, але за їх надмірного вмісту можливе формування крихких фаз, які

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

суттєво погіршують корозійну стійкість та знижують пластичні властивості [7].

Механічні характеристики сплаву АМг6 достатньо високі, зокрема границя міцності на розтяг знаходиться в діапазоні значень від 320 МПа до 390 МПа, що дозволяє його ефективне використання у відповідальних конструкціях, які піддаються впливу статичних і циклічних навантажень помірного рівня. Високе співвідношення міцності до густини робить цей матеріал перспективним для застосування в транспортному машинобудуванні, зокрема, при виготовленні кузовних елементів автомобілів, обшивок літальних апаратів та плавзасобів.

Показник границі текучості сплаву знаходиться в межах від 160 МПа до 240 МПа, що свідчить про здатність матеріалу сприймати значні деформації без утворення тріщин. Це є критично важливим для виготовлення елементів конструкцій, які піддаються навантаженням деформаційного типу – наприклад, у конструкціях фюзеляжів авіаційної техніки [23].

Відносне подовження у межах від 12 % до 18 % вказує на добру пластичність сплаву, що забезпечує його придатність до пластичного деформування за технологіями холодного штампування, прокатки та лиття, сприяючи виробництву складнопрофільних деталей з мінімальними втратами матеріалу [24].

Густина сплаву на рівні $\sim 2,66 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ дозволяє досягти істотного зменшення маси готових виробів, що є визначальним чинником при конструюванні засобів транспорту та аерокосмічних систем. Використання АМг6 у суднобудуванні та авіації сприяє підвищенню паливної ефективності транспортних засобів за рахунок зменшення маси конструкцій [6].

3.2 Хімічний склад та властивості сплаву 1570

У складі сплаву марки 1570 основним елементом є алюміній (Al), масова частка якого перевищує 94 %. Застосування алюмінію обумовлюється його

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

низькою густиною та стійкістю до корозії, що досягається завдяки природному формуванню захисного шару оксиду на поверхні металу. Цей пасивуючий шар забезпечує ефективну ізоляцію матеріалу від дії вологи та агресивних чинників [23].

Магній (Mg), у межах від 5,2 % мас. до 5,8 % мас., виконує роль основного легуючого компонента, що відповідає за підвищення характеристик міцності сплаву. Його присутність сприяє формуванню зміцнюючих інтерметалідних фаз, які також забезпечують покращення параметрів жорсткості, що є актуальним для використання матеріалу в авіаційній, космічній та оборонній техніці [24].

Скандій (Sc), навіть у незначній концентрації від 0,10 % мас. до 0,15 % мас., чинить суттєвий вплив на структуру та властивості сплаву. Завдяки утворенню фаз типу Al_3Sc відбувається термічна стабілізація структури та суттєве зростання межі міцності. Крім того, наявність скандію знижує ризик виникнення гарячих тріщин під час зварювальних процесів, що критично важливо при виготовленні відповідальних вузлів і агрегатів [6].

Цирконій (Zr), у кількості до 0,2 % мас., стабілізує мікроструктуру під час впливу високих температур. Його присутність особливо цінна в умовах експлуатації елементів, що зазнають інтенсивного термічного навантаження, наприклад у тепловідвідних екранах або частинах двигунів. Окрім цього, цирконій покращує технологічні властивості матеріалу, зокрема його оброблюваність [7].

Вміст заліза (Fe) та кремнію (Si) обмежено до 0,25 % мас. кожного, що мінімізує ймовірність формування крихких та корозійно-небезпечних фаз. Контроль цих домішок забезпечує збереження високого рівня корозійної стійкості, що є критичним для тривалого використання сплаву у складних середовищах.

Міцність сплаву 1570 на розрив знаходиться в межах від 390 МПа до 450 МПа, що забезпечує його надійність при використанні в силових конструкціях

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

літальних апаратів, зокрема в зонах з підвищеними навантаженнями та агресивним впливом навколишнього середовища [6].

Границя текучості у межах від 250 МПа до 320 МПа свідчить про здатність сплаву протистояти як статичним, так і змінним навантаженням без розвитку пластичних деформацій. Це робить його доцільним для виробництва відповідальних деталей літальних апаратів і аерокосмічних систем [7].

Показник відносного подовження на рівні від 10 % до 15 % демонструє задовільні пластичні характеристики сплаву, які зберігаються навіть при підвищених температурах. Це дозволяє ефективно використовувати матеріал у деталях, що піддаються термомеханічним впливам, зокрема при гарячому формуванні або експлуатації в умовах температурних коливань [24].

Густина матеріалу, яка становить приблизно $2,65 \text{ г·см}^{-3}$, забезпечує оптимізацію масових характеристик конструкцій. Це є ключовим чинником для авіа- та космічної техніки, де маса безпосередньо впливає на експлуатаційні параметри, включаючи ефективність витрати пального та дальність польоту [23].

3.3 Обґрунтування вибору хімічного складу присадного дроту

На підставі аналізу даних з науково-технічної літератури [14], [15] для сплаву АМг6, близькому за хімічним складом до об'єкта дослідження встановлено, що найвищу корозійну та термічну стійкість забезпечує присадний дріт системи легування Al–Mg–Mn (СвАМг6). Для зварювання сплаву 1570 – присадний дріт AlMg5Mn (ER5356), системи легування Al–Mg–Mn. Хімічний склад дротів наведений в табл. 3.1.

Зварні з'єднання виготовляли методом ПДЗ з використанням різнополярного асиметричного струму в нижньому положенні. Формування кореневої частини швів здійснювалося з використанням змінної підкладки з нержавіючої сталі. Підкладка мала формуючу канавку прямокутного перерізу.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1 – Хімічний склад присадних дротів [14], [15]

Марка дроту	Вміст домішок, % мас.							
	Mg	Mn	Zn	Cr	Cu	Ti	Fe	Si
СвАМг6	6,2	0,65	–	–	–	0,10	0,30	0,28
AlMg5Mn	4,5...5,5	0,05...0,2	0,2	0,05...0,2	0,1	0,06	0,4	0,25

3.4 Підготовка матеріалів до зварювання

Перед виконанням зварювальних робіт алюмінієві сплави АМг6 та 1570 проходили комплексну підготовку поверхні, яка включала знежирення, хімічне травлення, а також механічне очищення зони зварювання.

3.4.1 Хімічне травлення

Попередньо знежирені ацетоном поверхні пластин піддавали хімічній обробці за наступною технологічною схемою:

1. Травлення у водному розчині гідроксиду натрію (NaOH) з концентрацією $50 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ при температурі від 60°C до 70°C протягом від 1 хв до 2 хв;
2. Промивка спочатку гарячою проточною водою (температура не нижче 50°C), потім – холодною проточною водою;
3. Освітлення у розчині азотної кислоти (HNO_3) з концентрацією від $325 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ до $420 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ при кімнатній температурі. Час витримки – від 1 хв до 2 хв, допускається продовження до 10 хв у разі відсутності ознак пошкодження поверхні;
4. Завершальна промивка гарячою водою (не нижче 50°C) із подальшим природним висиханням на повітрі без застосування продувки [16].

3.4.2 Підготовка зварювального дроту та механічна обробка

Зварювальний дріт піддавався аналогічному хімічному травленню, що й основний матеріал. Після очищення дріт намотували на котушки та герметично упаковували в поліетиленову плівку для запобігання повторному окисненню. Застосування дроту дозволяється за умови, що тривалість його відкритого зберігання не перевищує 12 годин, або до 36 годин за умови зберігання у герметичних контейнерах, металевих ящиках. У випадку перевищення зазначених термінів – повторна хімічна обробка є обов'язковою, з можливістю двократного повторного очищення без попереднього знежирення.

Не рекомендується використовувати металеві щітки для видалення оксидного шару, оскільки вони не забезпечують повного очищення до чистого металу. Використання абразивних кругів є небажаним через ризик потрапляння сторонніх включень у зварний шов, що може суттєво зменшити характеристики якості зварного з'єднання. Нанесення антикорозійних, лакофарбових або інших захисних покриттів на зварні вузли проводиться лише після завершення зварювальних робіт.

3.5 Методика дослідження макро- та мікроструктури зварних з'єднань

З метою комплексного металографічного аналізу структури основного металу та зони зварювання сплаву 1570 було проведено як якісне, так і кількісне дослідження за допомогою оптичних мікроскопів МІМ-8 та НЕОРНОТ-32. Вивчення проводилось на поперечних шліфах, вирізаних із зразків зварних з'єднань.

Процес виготовлення металографічних шліфів складався з таких етапів:

– механічне відрізання зразків здійснювалось фрезеруванням із фіксацією напрямку різку перпендикулярно до осі зварного шва;

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– попереднє шліфування виконувалося на шліфувальних установках із горизонтально орієнтованою абразивною стрічкою. Обробку розпочинали з грубозернистого наждачного паперу (зерно Р150), поступово переходячи до тоншого (до Р2000 і Р4000) для усунення слідів попередніх стадій механічної обробки.

Для зразків, призначених для мікроскопічного аналізу мікроструктури, обов'язковим був етап фінішної поліровки. Полірування проводилось на горизонтальному полірувальному диску, обтягнутому сукном або велюром, із застосуванням спеціальної абразивної суспензії з розміром частинок від 1 мкм до 3 мкм. Під час полірування поверхню диска зволожували полірувальною емульсією з рівномірним розподілом частинок абразивної речовини

Після завершення обробки зразки промивали у дистильованій воді та висушували струменем гарячого повітря, щоб уникнути плям окиснення.

Для контрастного виявлення макроструктурних неоднорідностей зварних з'єднань алюмінієвих сплавів систем Al–Mg–Mn (АМг6) та Al–Mg–Mn–Sc (1570) використовували хімічне травлення у розчині наступного складу: 72 % об. – хлористоводнева кислота (HCl); 24 % об. – азотна кислота (HNO₃); 4 % об. – плавикова кислота (HF).

Зразок занурювали в реактив від 5 с до 7 с, після чого ретельно промивали водою та висушували гарячим повітрям. Триваліше травлення не рекомендується, щоб уникнути гравітаційного розмиття мікрорельєфу.

Для отримання висококонтрастного зображення мікроструктури шліфи полірували електролітичним методом. В якості електроліту застосовували розчин із наступним співвідношенням компонентів: від 930 до 970 см³ – оцтова кислота (CH₃COOH); від 30 см³ до 70 см³ – перекис хлорної кислоти (HClO₄).

Електрополірування проводилось при стабільних параметрах напруги протягом від 5 с до 10 с, що забезпечувало однорідне витравлення поверхні без надмірного «роз'їдання» зерен.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновок по розділу 3

У рамках дослідження встановлено, що алюмінієві сплави АМг6 та 1570 характеризуються високим співвідношенням міцності до густини, задовільною пластичністю та підвищеною корозійною стійкістю, що обумовлює доцільність їх застосування у зварних конструкціях підвищеної відповідальності.

Вибір присадного дроту AlMg5Mn (ER5356) підтверджено відповідністю його хімічного складу основному металу, а також стабільними зварювальними властивостями при використанні різнополярного асиметричного електричного струму.

Розроблена схема підготовки поверхонь до зварювання, яка включає хімічне травлення та виключає застосування механічних абразивних засобів, забезпечує ефективне видалення оксидного шару без ризику внесення сторонніх включень.

Методика виготовлення та обробки металографічних зразків забезпечує достовірне відтворення мікроструктури зварних з'єднань. Використання оптичної мікроскопії у поєднанні з електрополіруванням і хімічним травленням дозволяє виявляти макро- та мікронеоднорідності, пов'язані з термічними і структурними змінами в зоні зварювання.

Отримані результати підтверджують обґрунтованість вибору матеріалів, технології попередньої обробки та методів контролю структури для подальших зварювальних експериментів.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ СПЛАВУ 1570

4.1 Дослідження формування зварного шва у нижньому положенні

4.1.1 Частота різнополярного асиметричного струму

Для встановлення оптимального значення частоти різнополярного асиметричного зварювального струму, що забезпечує стабільне та якісне формування зварних швів при ПДЗ алюмінієвих сплавів, було проведено серію попередніх випробувань на зразках із сплаву АМг6 товщиною 6 мм.

Зварювальні проплави виконували на пластинах розміром 200 мм × 120 мм × 6 мм плазмово-дуговим методом зі сталою швидкістю переміщення зварювального пальника 24 м·год⁻¹, без застосування присадного матеріалу. Для виключення впливу тепловідведення підкладки, зварювання здійснювали в «підвішеному» положенні.

Усі досліді проводили при фіксованому значенні зварювального електричного струму 250 А, величина якого була обрана на основі експериментального визначення за умови неповного проплавлення дослідного зразка при частоті струму 50 Гц.

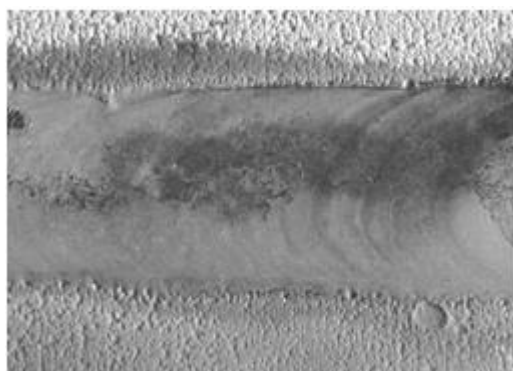
Відстань між кінцем плазмоутворюючого сопла та поверхнею виробу підтримувалась на рівні 6 мм. Місцевий газовий захист був реалізований із застосуванням водоохолоджуваного газового сопла діаметром 30 мм з подачею аргону в якості захисного газу.

Частота різнополярного струму варіювалася в діапазоні від 50 Гц до 240 Гц з кроком 50 Гц для визначення впливу цього параметра на особливості формування зварного шва.

Аналіз геометричної форми та стану поверхні проплавів, отриманих при варіюванні частоти різнополярного струму, свідчить, що у діапазоні від 50 Гц до 200 Гц зовнішній вигляд зварного шва залишається стабільно задовільним. На рис. 4.1 представлені поверхні проплавів, виконаних плазмово-дуговим зварюванням різнополярним струмом різної частоти.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

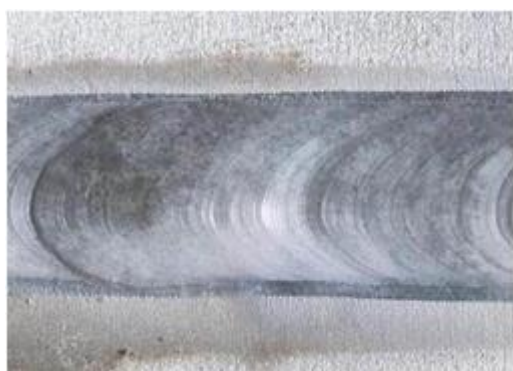
Дослідження поперечних шліфів виявило, що мінімальна глибина проплавлення (2,5 мм) спостерігається за частоти різнополярного електричного зварювального струму 50 Гц. Зі збільшенням частоти зварювального струму глибина проплавлення зростає. Найбільша глибина проплавлення основного металу досягається в діапазоні частот зварювального струму від 150 Гц до 240 Гц. При 200 Гц глибина проплавлення досягла значення в 5,5 мм, а на частоті 240 Гц було забезпечене повне проплавлення пластини. На рис. 4.1 наведені фотографії поверхні, а на рис. 4.2 поперечні шліфи проплавів пластини зі сплаву АМг6 товщиною 6 мм, отримані при ПДЗ різнополярним струмом за різної частоти зварювального струму.



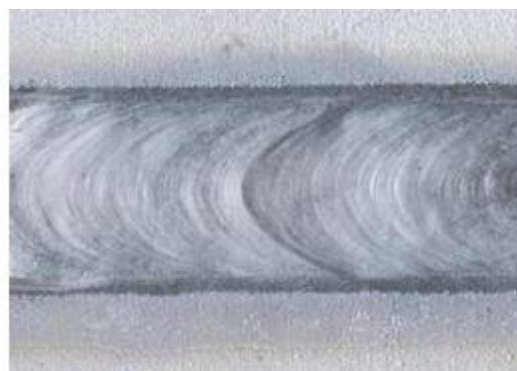
а



б

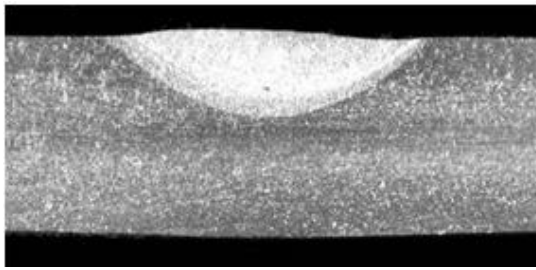


в

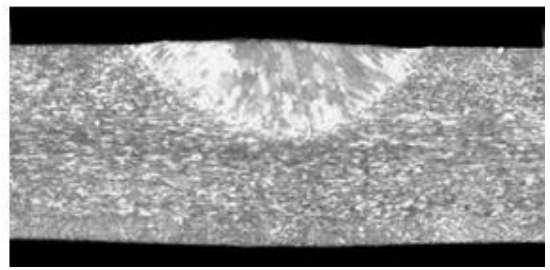


г

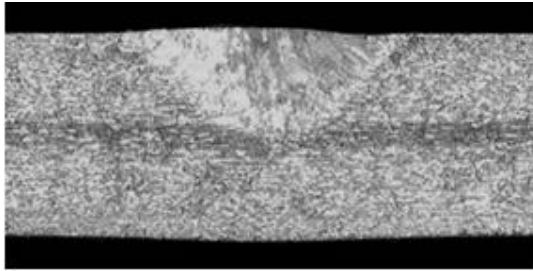
Рисунок 4.1 – Поверхня проплавів, виконаних плазмово-дуговим зварюванням різнополярним струмом із частотою 50 Гц (а), 100 Гц (б), 150 Гц (в) та 200 Гц (г)



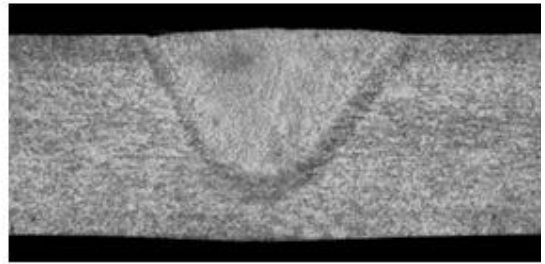
а



б



в



г

Рисунок 4.2 – Поперечні шліфи проплавів пластин зі сплаву АМг6 товщиною 6 мм, що отримані ПДЗ різнополярним струмом із частотою 50 Гц (а), 100 Гц (б), 150 Гц (в) та 200 Гц (г)

По результатах експериментальних досліджень побудований графік залежності ширини і глибини проплавлення від частоти зварювального струму, представлений на рис. 4.3, і встановлено, що з підвищенням частоти різнополярного зварювального струму від 50 Гц до 200 Гц ширина ділянки проплавлення зменшилась на 13 %, скоротившись з 9,5 мм до 8,2 мм.

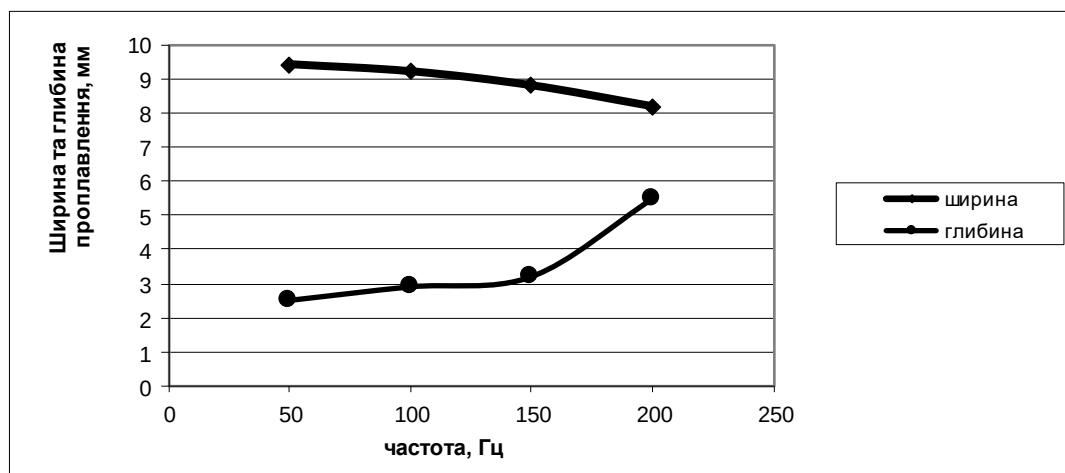


Рисунок 4.3 – Графік залежності ширини і глибини проплавлення від частоти струму при ПДЗ сплаву АМг6

4.1.2 Обґрунтування вибору тривалості фаз прямої та зворотної полярності

У наслідок високої термодинамічної спорідненості алюмінієвих сплавів до кисню повітря на їх поверхні формується щільна оксидна плівка Al_2O_3 з температурою плавлення приблизно $2030\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тобто температура плавлення оксидної плівки більш ніж утричі перевищує температуру плавлення самого алюмінію ($\approx 660\text{ }^{\circ}\text{C}$). Наявність тугоплавкої оксидної плівки суттєво ускладнює процес зварювання сплавів алюмінію, оскільки при застосуванні прямої полярності постійного зварювального струму, яка є типовою для зварювання сталевих матеріалів, руйнування оксидного шару не відбувається [8]. Зварний шов виконаний плазмово-дуговим зварюванням на постійному струмі прямої полярності пластини зі сплаву АМгб наведений на рис. 4.4.



Рисунок 4.4 – Зварний шов виконаний плазмово-дуговим зварюванням на постійному струмі прямої полярності пластини зі сплаву АМгб

Для забезпечення ефективного руйнування оксидної плівки в процесі зварювання алюмінієвих сплавів необхідно використовувати або зворотну полярність постійного струму, або режим різнополярного зварювального струму. Руйнування оксидної плівки відбувається виключно під час проходження зварювального струму зворотної полярності [8].

Застосування зворотної полярності у плазмово-дуговому процесі зварювання супроводжується концентрацією теплової енергії на

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вольфрамовому електроді, що працює в анодному режимі. Це потребує застосування заходів щодо підвищення тепловідведення, які реалізуються за рахунок суттєвого ускладнення конструкції системи охолодження плазмового пальника, використанням масивних мідних компонентів та інтенсивного водяного охолодження деталей, які безпосередньо взаємодіють з плазмовою дугою.

Зварні шви, які сформовані при використанні струму зворотної полярності, зазвичай характеризуються більшою шириною внаслідок меншої щільності теплового потоку в глибину. Для оптимального поєднання катодного очищення та ефективного тепловкладу застосовується різнополярний (змінний) струм, найчастіше синусоїдального типу. У режимі 50 Гц руйнування оксидного шару відбувається під час кожного напівперіоду зворотної полярності.

Згідно з дослідженнями, проведеними в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, ефективність катодного очищення досягається лише за умови, що амплітуда струму зворотної полярності перевищує певне критичне значення (I_k), за якого починається інтенсивне електричне руйнування оксидного шару, амплітуда наведена на рис. 4.5. Це є ключовим параметром при налаштуванні режиму різнополярного струму в умовах ПДЗ алюмінієвих сплавів.

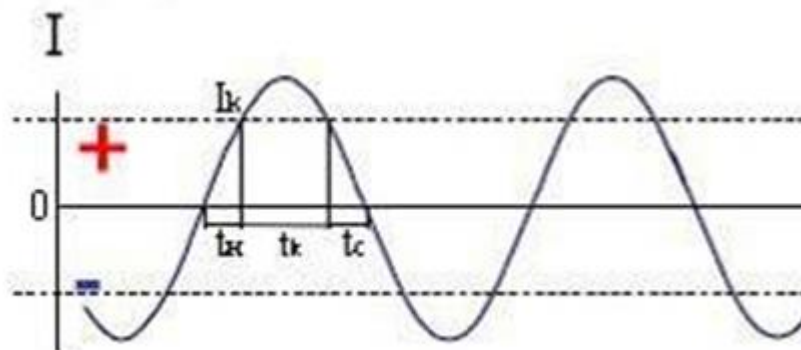


Рисунок 4.5 – Графік амплітуди різнополярного зварювального струму синусоїдальної форми

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

При живленні дуги синусоїдальним різнополярним струмом руйнування плівки для досягнення критичного значення зворотного струму I_k , необхідного для ефективного катодного руйнування оксидної плівки, з моменту проходження кривої струму через нуль потрібен певний часовий інтервал t_n . Упродовж цього проміжку дуга не розвиває достатньої потужності для руйнування плівки Al_2O_3 .

Ефективне катодне очищення поверхні відбувається тільки в часовому інтервалі t_k , коли струм перевищує порогове значення I_k . На етапі спаду струму в інтервалі t_c , коли струм зменшується від I_k до нуля, також не забезпечується руйнування оксидної плівки. У часових проміжках t_n та t_c енергія дуги витрачається переважно на нагрів електрода, що спричиняє його інтенсивне термічне навантаження і пришвидшене руйнування.

Застосування різнополярного струму прямокутної форми дає змогу досягати значення I_k практично миттєво після переходу через нульову точку, що усуває затримку на фазі наростання, наведено на рис. 4.6. У такому режимі катодне руйнування оксидної плівки відбувається протягом усього півперіоду зворотної полярності, що підвищує ефективність очищення зони зварювання.

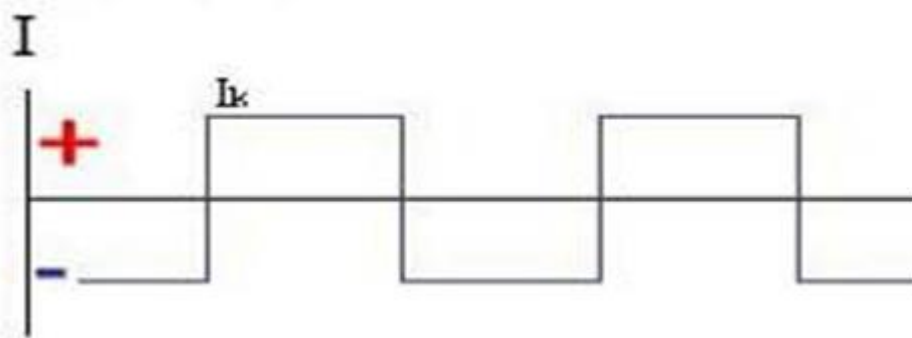


Рисунок 4.6 – Графік амплітуди різнополярного зварювального струму прямокутної форми

При ПДЗ на різнополярному струмі з прямокутною формою імпульсу оптимальним є співвідношення тривалостей напівперіодів: приблизно 4 мс для

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зворотної полярності та 13 мс для прямої. За такого режиму забезпечується достатня глибина проплавлення, ефективне катодне очищення зони зварювання від оксидної плівки, а також підвищується термостійкість вольфрамового електрода плазмотрона до руйнування.

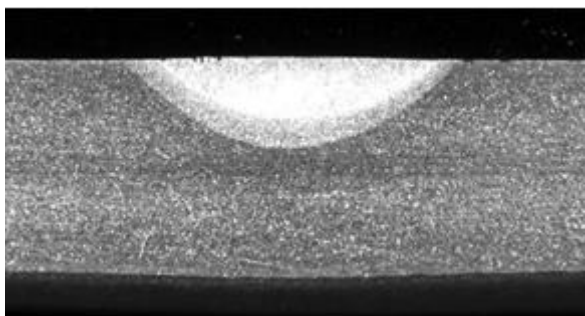
Амплітудне значення струму у напівперіоді зворотної полярності перевищувало аналогічне значення струму прямої полярності від 30 А до 50 А. Разом з тим, результати досліджень, проведених в ІЕЗ ім. О.О. Патона НАНУ, свідчать про можливість досягнення високої якості зварного з'єднання при застосуванні різнополярного асиметричного струму навіть за умови рівності амплітуд струмів у напівперіодах прямої та зворотної полярностей.

З метою визначення оптимальної тривалості фази струму прямої полярності було проведено експериментальні зварювальні роботи на зразках зі сплаву АМг6 (розміри 200 мм × 120 мм × 6 мм). Проплави виконували при сталих параметрах: зварювальний струм 250 А, частота перемикавання полярності – 100 Гц, витрата плазмоутворюючого газу, довжина дуги та швидкість зварювання залишалися незмінними. Для однакових теплових умов зразки зварювали у «підвісному» положенні.

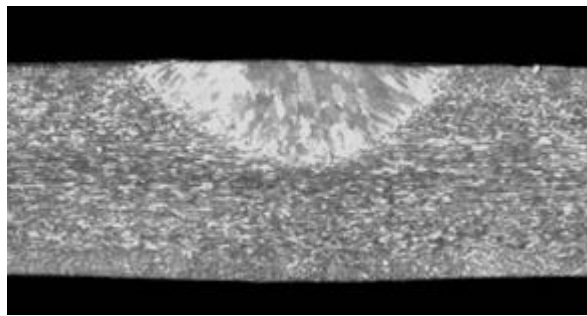
Після виконання проплавів із різними співвідношеннями тривалостей напівперіодів струму (баланс полярності), з кожного зразка вирізали поперечні шліфи шириною 20 мм. Підготовка до металографічного аналізу включала механічну обробку, хімічне травлення, промивку і сушіння. Мікроструктуру зварних з'єднань досліджували за допомогою мікроскопа МУМ-2 та наведена на рис. 4.7.

Огляд вольфрамових електродів після зварювання показав, що при положенні регулятора балансу - 4 (тобто 78 % часу струм протікав при прямій полярності) профіль заточування електрода залишився незмінним. У випадку положення регулятора + 4 (лише 22 % часу припадало на пряму полярність), на електроді із заточенням під кутом 60° спостерігалось оплавлення з утворенням напівсферичної головки радіусом близько 2 мм.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а



б

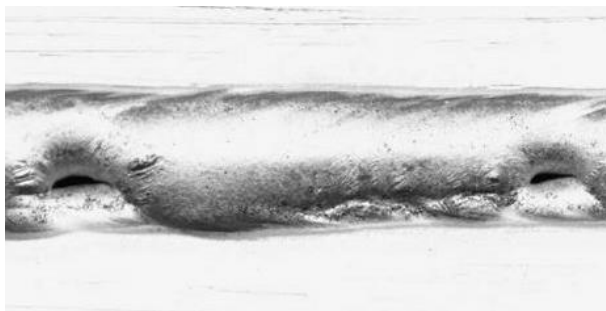
Рисунок 4.7 – Поперечні шліфи проплавів на зразках зі сплаву АМг6 товщиною 6 мм, отриманих ПДЗ при тривалості протікання струму прямої полярності 28 % (а) та 78 % (б)

4.1.3. Вибір витрати плазмоутворювального газу

Одним із ключових параметрів режиму плазово-дугового зварювання є витрата плазмоутворювального газу. На відміну від аргонодугового зварювання неплавким електродом, де основну силову дію на зварювальну ванну здійснює електрична дуга, у процесі ПДЗ на розплавлений метал, окрім дугового тиску, додатково впливає високошвидкісний потік газу, який проходить крізь канал малого діаметра.

Для уникнення викиду розплаву, що зумовлений надмірним сумарним тиском дуги та газового потоку, необхідно забезпечити оптимальне співвідношення між їхніми впливами. При занадто малій витраті плазмоутворювального газу зростає ймовірність виникнення паразитної дуги між соплом та виробом (так званої "подвійної дуги"). У свою чергу, надлишкова витрата газу під час зварювання із використанням підкладок, що мають формувальні канавки, може призвести до пробивання рідкого металу струменем плазми. У таких випадках плазмовий струмінь, відбиваючись від підкладки, деформує зварювальну ванну та формує увігнуту поверхню в кореневій частині шва, приклад наведений на рис. 4.8.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а



б

Рисунок 4.8 – Зовнішній вигляд лицьової (а) та зворотної (б) сторін шва, отриманих при надмірній витраті захисного газу

Експериментально визначено оптимальну витрату плазмоутворювального газу для ПДЗ сплавів АМг6 та 1570 товщиною 6,35 мм. Для струмів у діапазоні від 275 А до 285 А оптимальна витрата газу становила $0,2 \text{ л} \cdot \text{хв}^{-1}$.

4.1.4. Вибір форми канавки у знімній сталевій підкладці

Коренева зона швів, отриманих плазмово-дуговим зварюванням у нижньому положенні, формувалась із застосуванням знімних підкладок із нержавіючої сталі, оснащених формувальними канавками.

На етапі попередніх випробувань для визначення впливу геометричних параметрів канавок на якість стикових з'єднань сплаву АМг6 товщиною 6,35 мм застосовували прямокутні канавки: $4 \text{ мм} \times 1 \text{ мм}$; $10 \text{ мм} \times 1 \text{ мм}$; $10 \text{ мм} \times 2 \text{ мм}$. Зварювання проводили при швидкості $12 \text{ м} \cdot \text{год}^{-1}$ та сталому струмі 285 А.

Використання канавки розміром $4 \text{ мм} \times 1 \text{ мм}$ спричинило нерівномірність у формуванні лицьової та зворотної частин шва, а з'єднання наведені на рис. 4.9. Плазмовий струмінь відбивався від дна канавки, що викликало утворення увігнутості в кореневій зоні шва. Крім того, вузька ширина канавки підвищувала вимоги до точності центрування плазмового струменя відносно осі стику.



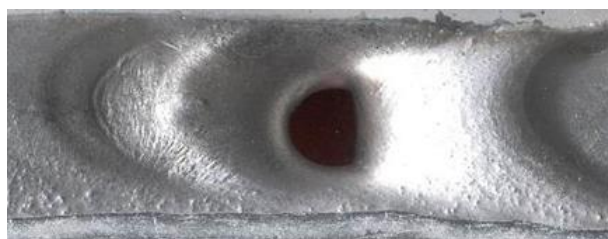
а



б

Рисунок 4.9 – Зовнішній вигляд лицьової (а) та зворотної (б) сторін шва, сформованого при ПДЗ з використанням підкладки з канавкою 4 мм × 1 мм

З метою зменшення чутливості процесу ПДЗ до відхилень плазмового струменя відносно осі стику, було застосовано підкладку з формувальною канавкою шириною 10 мм. Проте під час зварювання сплаву АМгб встановлено, що при глибині канавки 1 мм спостерігається нестабільне формування шва, відображене на рис. 4.10. У верхній зоні шва проявлялись напливи та локальні западини, не виключене утворення прожогів та підрізів. Водночас у зворотній частині з'єднання виявлено ділянки з вираженою увігнутістю, викликаною відбиттям плазмового потоку від дна канавки.



а



б

Рисунок 4.10 – Зовнішній вигляд лицьової (а) та зворотної (б) частин зварного з'єднання зі сплаву АМгб, отриманого при застосуванні канавки 10 мм × 1 мм

З метою усунення ефекту зворотного тиску від дна канавки було збільшено її глибину до 2 мм при збереженні ширини 10 мм. Така геометрична форма канавки забезпечила стабільне формування як лицьової, так і зворотної частин шва, що відображено на рис. 4.11.



а



б

Рисунок 4.11 – Поверхні лицьової (а) та зворотної (б) частин зварного з'єднання АМгб, виконаного з використанням канавки 10 мм × 2 мм

У попередніх дослідженнях аргонодугового зварювання неплавким електродом сплаву АМгб встановлено, що найкращі показники формування кореневої частини шва досягаються при використанні фольги з нержавіючої сталі завтовшки від 0,1 мм до 0,17 мм. Фольгу розміщували поверх канавки підкладки таким чином, щоб її центр збігався з віссю стику, що відображено на рис. 4.12. Під дією сили тяжіння рідкий метал продавлював фольгу, що забезпечувало чіткий і плавний перехід у зоні кореня шва, з одночасним зменшенням підсмоктування повітря з нижньої сторони з'єднання.

Під час складання стиків зі сплавів АМгб та 1570 для ПДЗ застосовувалась така технологія: смугу фольги завширшки 40 мм, попередньо знежирену ацетоном, укладали по центру канавки підкладки 10 мм × 2 мм. У центрі фольги робили легке заглиблення для покращення центрування.



Рисунок 4.12 – Схема складання стику з розміщенням фольги у формувальній канавці

Для зварювання стикових з'єднань зі сплаву 1570 завтовшки 6,35 мм у нижньому положенні використовували знімну підкладку з формувальною канавкою 10 мм × 2 мм у поєднанні з фольгою з нержавіючої сталі, вхідні та вихідні планки для стабілізації процесу.

Зведена інформація щодо режимів плазово-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом сплаву 1570 наведена в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Режим плазово-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом сплаву 1570 (6,35 мм, нижнє положення)

Положення зварювання	Зварювальний струм, А	Швидкість зварювання, см·хв ⁻¹	Витрата плазموутворюючого газу, л·хв ⁻¹
нижнє	275	20	0,2
Баланс полярності	Швидкість подачі присадного дроту, см·хв ⁻¹	Витрата захисного газу, л·хв ⁻¹	Умовна довжина дуги, мм
-4	240	30	6

На підбраному режимі ПДЗ було виконано стикові з'єднання з алюмінієвого сплаву 1570 товщиною 6,35 мм у нижньому просторовому положенні, які наведені на рис. 4.13 та 4.14.



Рисунок 4.13 – Зовнішній вигляд лицьової частини зварного шва стикового з'єднання сплаву 1570, отриманого в нижньому положенні при ПДЗ

Після завершення зварювального процесу фольга з нержавіючої сталі, розміщена в зоні кореня шва, вилучалась без зусиль, що свідчить про відсутність її сплавлення з основним металом. Зовнішній вигляд кореневої частини шва після вилучення фольги з нержавіючої сталі наведено на рис. 4.15.

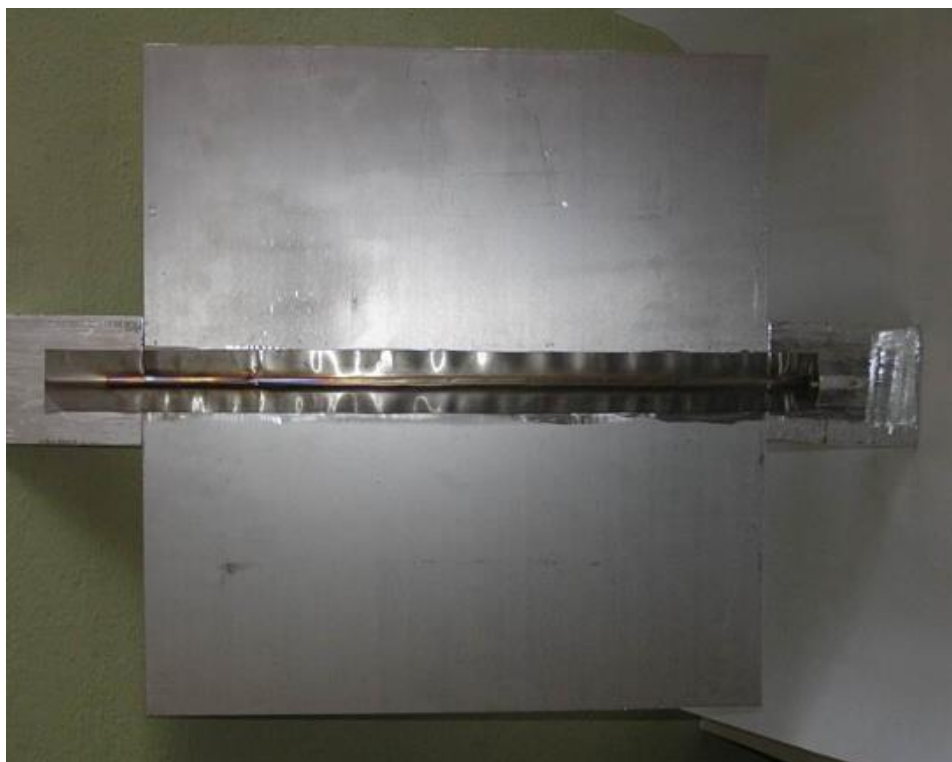


Рисунок 4.14 – Зовнішній вигляд кореневої частини зварного шва до видалення фольги з нержавіючої сталі (сплав 1570, товщина 6,35 мм, нижнє положення зварювання)



Рисунок 4.15 – Зовнішній вигляд кореневої частини шва після вилучення фольги з нержавіючої сталі

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.2 Дослідження формування зварного шва у вертикальному положенні

4.2.1 Аналіз специфіки формування зварного шва при зварюванні у вертикальному положенні

Під час виконання зварювальних робіт на вертикальній площині дію сили тяжіння на розплавлений метал слід вважати одним із визначальних чинників. Метал, що утворюється безпосередньо під плазмовою дугою, має тенденцію переміщуватися в нижню зону ванни, що призводить до зменшення товщини рідкого шару в зоні дугового впливу. Як наслідок, дуга зосереджується переважно на основному металі, підвищуючи інтенсивність його плавлення. Це, в свою чергу, забезпечує більшу глибину проплавлення порівняно з аналогічними умовами зварювання у нижньому положенні.

Зокрема, при зварюванні сплаву АМг6 завтовшки 6 мм у нижньому положенні (режим: швидкість $20 \text{ см} \cdot \text{хв}^{-1}$, відсутність присадки) повне проплавлення досягається при силі струму 245 А. У разі зварювання у вертикальній площині аналогічне проплавлення забезпечується вже за 205 А, а ширина шва зменшується на 3 мм і становить 10 мм.

Однак при зварюванні у вертикальному положенні змінюються умови переміщення розплавленого металу, що може спричинити дефекти типу підрізів у верхній частині шва, на межі сплавлення. При збереженні тієї ж відстані від зрізу сопла плазмового пальника до поверхні виробу, що й у нижньому положенні, утворюється локальний односторонній підріз значної глибини, що ілюструє поперечний шліф, наведений на рис. 4.16.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

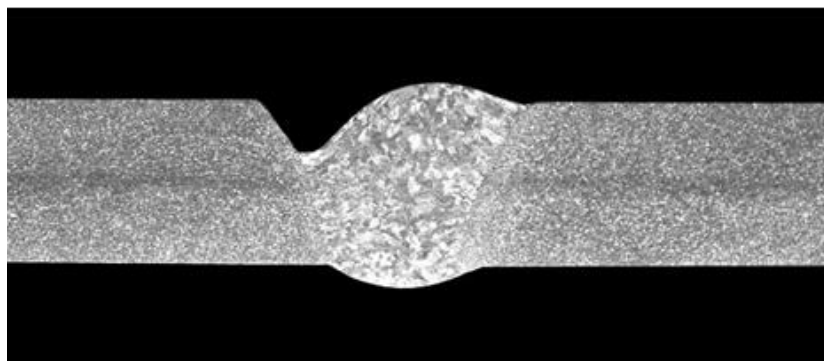


Рисунок 4.16 – Поперечний шліф зварного з'єднання сплаву АМг6 (товщина 6 мм), отриманого на вертикальній площині без застосування присадки при довжині дуги 6 мм. Відображено характерне утворення одностороннього глибокого підрізу

Зменшення відстані між соплом та поверхнею виробу до 4 мм дало змогу усунути глибокий підріз. У сформованому шві спостерігалися лише незначні підрізи по краях зони сплавлення, що наведено на рис. 4.17.

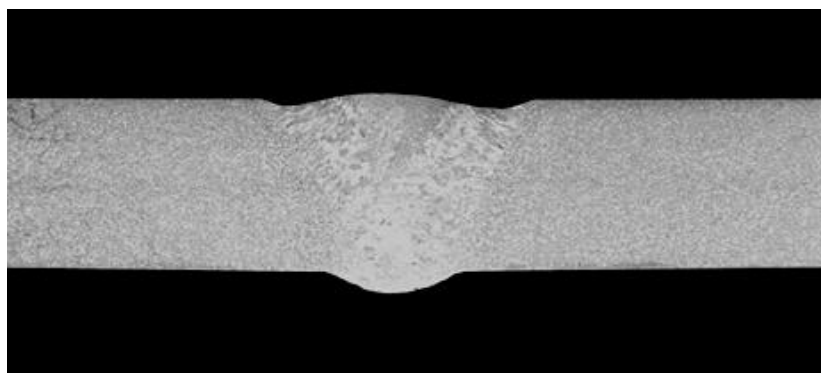


Рисунок 4.17 – Поперечний шліф з'єднання сплаву АМг6 (товщина 6 мм), звареного на вертикальній площині без застосування дроту при довжині дуги 4 мм

Таким чином відбувається більш рівномірне формування шва без утворення глибоких дефектів.

4.2.2. Підхід до формування зворотної частини шва при зварюванні на вертикальній площині

У нижньому положенні зварювання формування зворотної частини шва забезпечувалося за рахунок застосування знімних підкладок з нержавіючої сталі із попередньо обробленими формуючими канавками. Для вертикального положення на початковому етапі технологічного опрацювання також було прийнято рішення застосувати підкладку з канавкою розмірами 10 мм × 2 мм.

Втім, у ході експериментальних досліджень з'ясовано, що при зварюванні у вертикальному положенні плазмовий струмінь проходить крізь зварювальну ванну і, відбиваючись від дна канавки, викликає дефекти: у зворотній частині шва формується характерна увігнутість, а у верхній – виражений односторонній підріз. Типовий вигляд таких дефектів представлено на рис. 4.18.



а



б

Рисунок 4.18 – Зовнішній вигляд лицьової (а) та кореневої (б) частин вертикального шва, отриманого при ПДЗ листів із сплаву АМг6 товщиною 6 мм на вертикальній площині із застосуванням підкладки з канавкою розміром 10 мм по ширині та 2 мм по глибині

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Внаслідок відбиття плазмового струменя від підкладки в центральній зоні шва формувалися пори великого діаметру, розмір яких досягає від 2 мм до 3 мм, як це відображено на рис. 4.19.

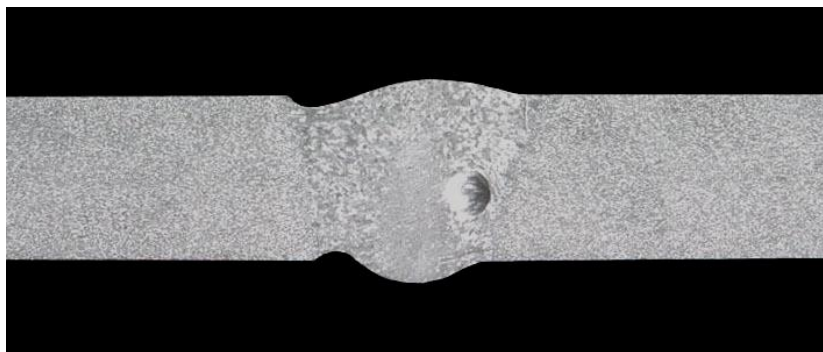
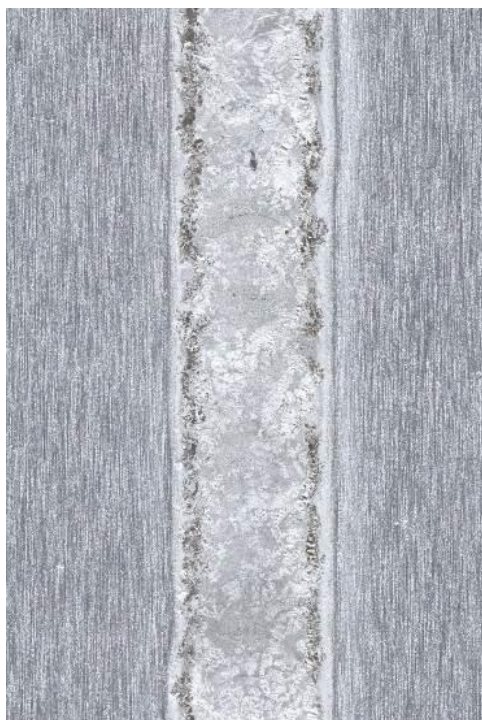


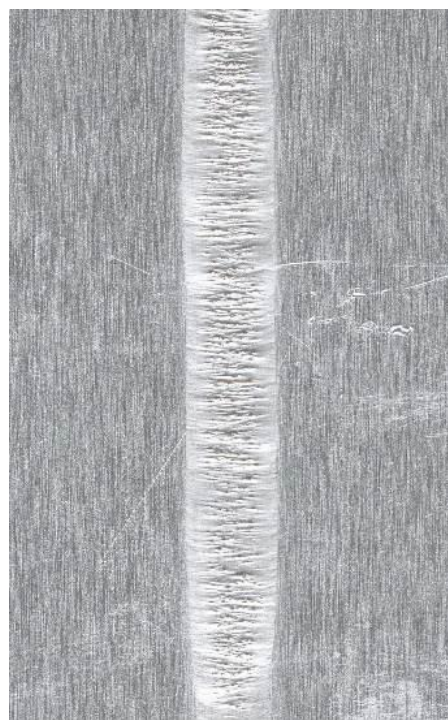
Рисунок 4.19 – Пори в металі вертикального шва, що виникли внаслідок відбиття плазмового струменя від підкладки

Збільшення глибини канавки до 3 мм не покращило якість формування кореневої частини шва: зберігалася увігнутість у кореневій зоні, а також утворювалися великі пори в центрі шва, аналогічно до випадку з підкладкою глибиною 2 мм.

З метою усунення ефекту відбиття плазмового струменя було прийнято рішення відмовитися від застосування підкладок. На рис. 4.20 наведено зовнішній вигляд верхньої рис. 4.20,а та кореневої рис. 4.20,б частин зварного шва, сформованого без використання підкладних елементів при ПДЗ сплаву АМг6 товщиною 6 мм на вертикальній площині.



а



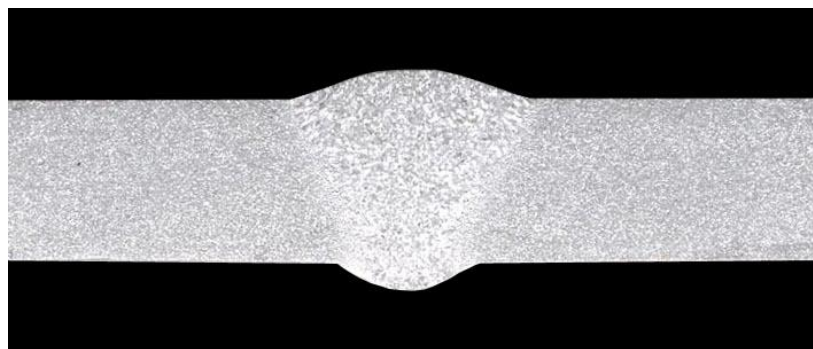
б

Рисунок 4.20 – Зовнішній вигляд верхньої (а) та кореневої (б) частин вертикального шва, сформованого плазмово-дуговим зварюванням на вертикальній площині сплаву АМг6 товщиною 6 мм без застосування підкладки

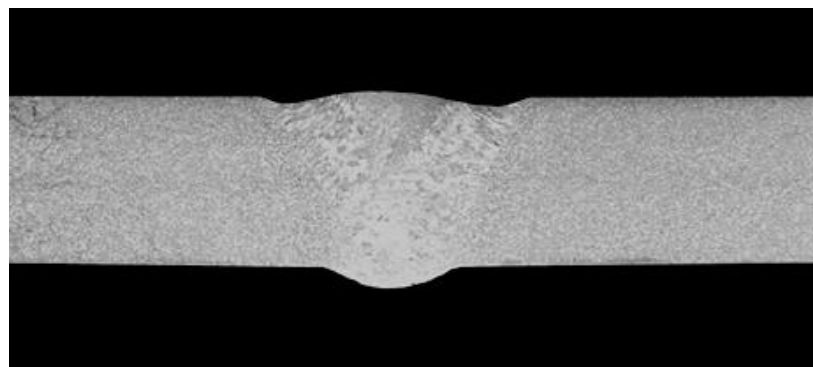
Варто також зазначити, що при формуванні вертикального шва на вертикальній площині спостерігається зменшене споживання присадного дроту, на 33 % менше у порівнянні з нижнім положенням.

Порівняння поперечних шліфів зварних з'єднань, отриманих у нижньому і вертикальному положеннях, представлено на рис. 4.21.

Режим зварювання сплаву 1570 передбачав зменшення зварювального струму на 10 А відносно параметра, встановленого для сплаву АМг6 тієї ж товщини, технічні параметри режимів наведені у табл. 4.2.



а



б

Рисунок 4.21 – Поперечні шліфи зварних з'єднань сплаву АМгб товщиною 6 мм, отримані ПДЗ у нижньому (а) та вертикальному (б) положеннях

Таблиця 4.2 – Параметри режимів плазово-дугового зварювання сплаву 1570 товщиною 6,35 мм у різних просторових положеннях

Положення зварювання	Струм, А	Швидкість зварювання, см·хв ⁻¹ ₁	Витрата плазموутворюючого газу, л·хв ⁻¹
Нижнє	275	20	0,2
Вертикальне	215	20	0,2
Положення зварювання	Швидкість подачі присадки, см/хв	Витрата захисного газу, л/хв	Умовна довжина дуги, мм
Нижнє	240	30	6
Вертикальне	160	30	4

Дослідження підтвердили можливість застосування плазмотронів PMW 350-2 та Robacta PTW 3500 F+ для зварювання. Основні дослідження реалізовані на плазмотроні PMW 350-2.

При ПДЗ на різнополярному струмі з прямокутною формою імпульсу оптимальним є співвідношення тривалостей напівперіодів: приблизно 4 мс для зворотної полярності та 13 мс для прямої. Тому при зварюванні обране положення регулятора балансу тривалості напівперіодів - 4 (тобто 78 % часу струм протікав при прямій полярності).

Висновок по розділу 4

У ході експериментальних досліджень встановлено оптимальні параметри ПДЗ алюмінієвого сплаву 1570 завтовшки 6,35 мм у нижньому та вертикальному просторових положеннях. Визначено, що зі зростанням частоти різнополярного асиметричного струму до 200 Гц досягається максимальна глибина проплавлення при збереженні стабільного формування шва.

Доведено ефективність використання прямокутної форми струму з перевагою тривалості прямої полярності (до 78 %), що забезпечує необхідний тепловий баланс для катодного очищення поверхні та мінімізації термічного зносу електрода. Експериментально обґрунтовано вибір витрати плазмоутворювального газу на рівні $0,2 \text{ л} \cdot \text{хв}^{-1}$, що гарантує стабільне існування дуги без утворення подвійного розряду або руйнування зварювальної ванни.

При зварюванні в нижньому положенні встановлено, що оптимальну якість формування кореня шва забезпечує підкладка з канавкою $10 \text{ мм} \times 2 \text{ мм}$ у поєднанні з фольгою з нержавіючої сталі. В умовах вертикального зварювання застосування підкладки спричиняло дефекти, зокрема утворення пор і підрізів, тому було рекомендовано виконання швів без підкладних елементів.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загалом визначено, що для кожного просторового положення необхідне індивідуальне налаштування параметрів струму, довжини дуги, витрати газу та геометричної форми підкладних елементів.

Отримані результати свідчать про можливість забезпечення високої якості зварних з'єднань сплаву 1570 при дотриманні рекомендованих технологічних режимів.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5 КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

Для верифікації цілісності зварних з'єднань, отриманих за технологією ПДЗ, було застосовано неруйнівний контроль, що дозволяє виявити наявність дефектів без пошкодження контрольованого виробу.

5.1 Радіографічний контроль якості зварних з'єднань

З метою виявлення внутрішніх дефектів зварних з'єднань, зокрема тріщин, непроварів, газових пор, а також шлакових, вольфрамових і оксидних включень, для контролю застосовували метод радіографічного просвічування. Цей метод дозволяє також виявляти пропалювання, підрізи та оцінювати геометричні параметри кореня шва (опуклість, увігнутість), які не піддаються зовнішньому візуальному контролю.

Фізичний принцип методу ґрунтується на різному ступені ослаблення (поглинання) рентгенівського або гамма-випромінювання металом зварного з'єднання залежно від його щільності та структури. Зони з порушеною щільністю (дефекти) фіксуються на плівці або екрані у вигляді затемнень різної інтенсивності. Наприклад, у разі відсутності дефектів контур шва реєструється як світліша смуга порівняно з основним металом, тоді як непровари, пори, включення або розкриті тріщини проявляються темними зонами на світлому тлі [17].

У якості приймального елемента використовували рентгенівську плівку, фотопапір або електронно-оптичний перетворювач, залежно від умов дослідження. Схематичне зображення основних елементів радіографічної схеми наведено на рис. 5.1.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

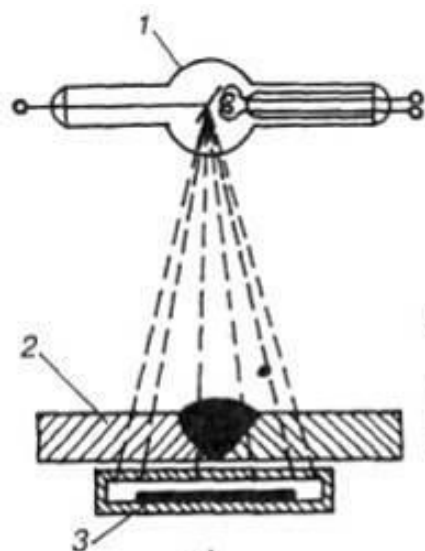


Рисунок 5.1 – Схема радіографічного контролю зварного з'єднання: 1 – джерело випромінювання; 2 – зразок; 3 – чутлива плівка

Радіографічний контроль зварних з'єднань зі сплаву 1570 товщиною 6,35 мм проводили методом прямого експонування з використанням рентгенівської установки типу РАП-150/300. Контроль здійснювали за таких умов:

- відстань від рентгенівського джерела до зразка $F = 1000$ мм;
- напруга на рентгенівській трубці $U = 50$ кВ;
- час експонування $t = 1$ хв.

З метою скорочення часу експонування використовували підсилювальний екран типу Р1 0,027.

Для реєстрації іонізуючого випромінювання застосовували рентгенографічні плівки KODAK-AA 400. Після проходження фотохімічної обробки результати просвічування підлягали аналізу за допомогою оптичного приладу «Денситометр», який забезпечує кількісне визначення оптичної щільності зображення та дозволяє надійно ідентифікувати дефектні ділянки.

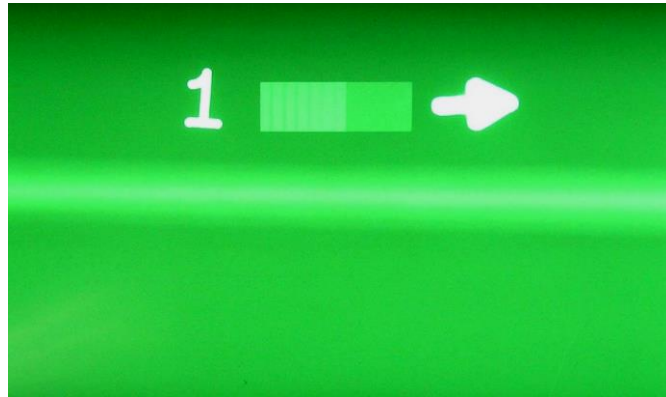


Рисунок 5.2 – Рентгенограма стикового з'єднання зі сплаву 1570 товщиною 6,35 мм, отриманого ПДЗ у нижньому положенні

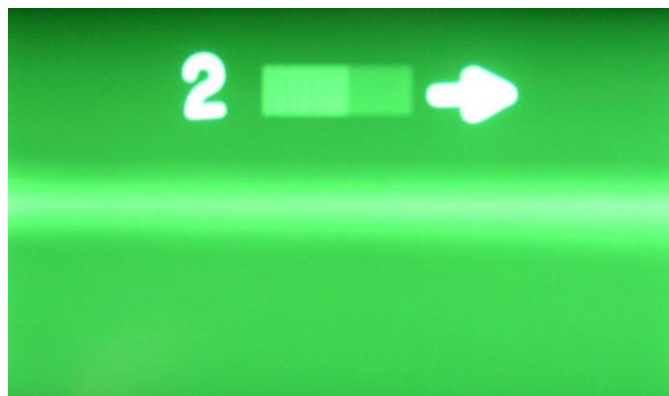


Рисунок 5.3 – Рентгенограма стикового з'єднання зі сплаву 1570 товщиною 6,35 мм, отриманого аргонодуговим зварюванням неплавким електродом

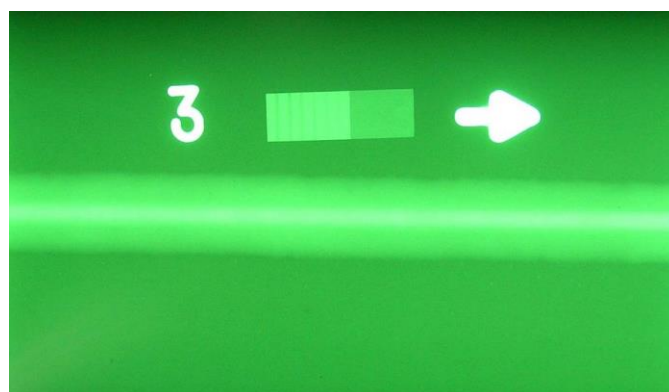


Рисунок 5.4 – Рентгенограма стикового з'єднання зі сплаву 1570 товщиною 6,35 мм, звареного плавким електродом у середовищі захисного газу на основі гелієво-аргонової суміші

Результати аналізу рентгеноплівок, виконаного за допомогою денситометра та продемонстровані на рис. 5.2, 5.3 та 5.4. Результати підтвердили відсутність у швах з'єднань сплаву 1570, зварених у нижньому положенні різними дуговими методами, дефектів розміром понад 0,1 мм.

5.2 Ультразвуковий контроль зварних з'єднань

Метод ультразвукового контролю (УЗК) ґрунтується на здатності ультразвукових хвиль проникати вглиб металу та відбиватися від зон неоднорідності – таких як пори, включення, непровари, тріщини тощо. У процесі контролю ультразвукові коливання, згенеровані п'єзоелементом перетворювача, вводяться в тіло шва, де, взаємодіючи з дефектом, частково відбиваються і реєструються приймальним елементом, який перетворює сигнал у електричний імпульс [18].

Оброблений імпульс виводиться на індикаторну систему дефектоскопа у вигляді А-скану. За амплітудою, формою та часом проходження імпульсу визначають просторове положення, протяжність і характер внутрішніх дефектів. Ультразвуковий контроль можна проводити при односторонньому доступі до шва, без зняття технологічного посилення або додаткової механічної обробки поверхні.

Контроль стикового з'єднання зі сплаву 1570 товщиною 6,35 мм, звареного плазово-дуговим методом у нижньому положенні поперек напрямку прокатки, здійснювали на тій самій ділянці, яка раніше пройшла рентгенографічний контроль.

УЗК виконували із використанням універсального дефектоскопа US N52 виробництва фірми Krautkramer. Для контролю застосовували похило-поперечний перетворювач П121-5-70, з частотою 11 МГц, кутом уведення хвилі 70° та довжиною стріли 10 мм. Налаштування системи проводили за допомогою контрольного дискового відбивача з побудовою АРД-діаграми.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сканування здійснювалося з обох боків відносно осі шва прямим і відбитим променем, із послідовним переміщенням перетворювача вздовж з'єднання зворотно-поступальними рухами. Для забезпечення належного акустичного контакту між перетворювачем і поверхнею металу застосовували спеціалізований гель MR 99.

У процесі контролю виводився типовий А-скан, наведений на рис. 5.5, який оператор розшифровував з подальшим оформленням висновку щодо наявності чи відсутності дефектів, а також їх просторової характеристики.

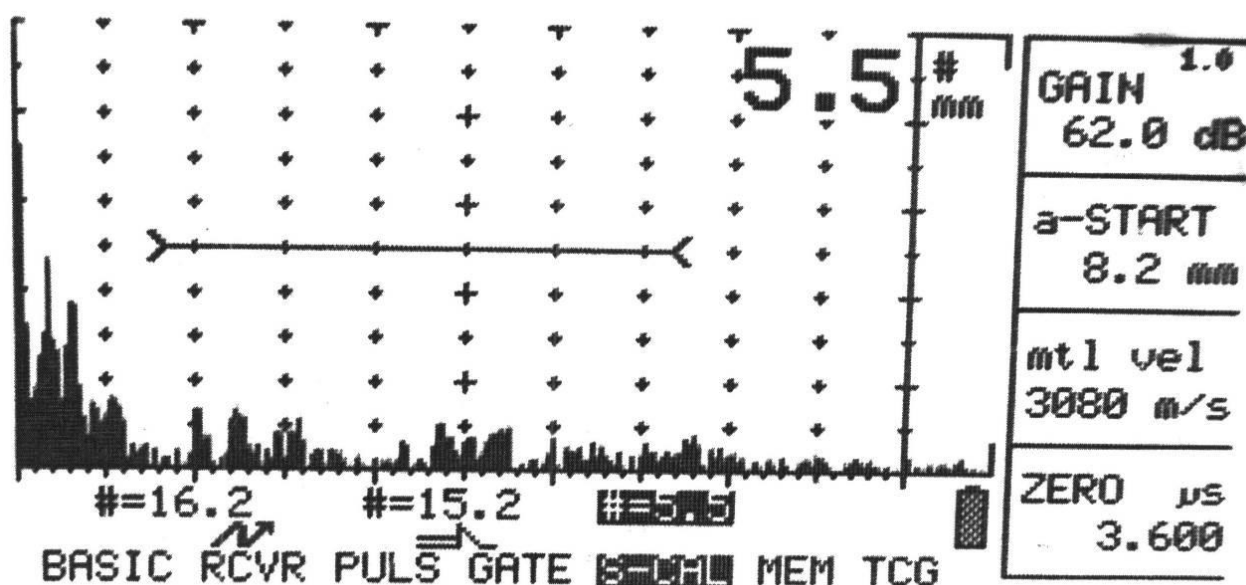


Рисунок 5.5 – Фрагмент А-скану, отриманого під час контролю стикового з'єднання сплаву 1570

Згідно з результатами ультразвукового контролю з'єднання, виконаного ПДЗ різнополярним асиметричним струмом у нижньому положенні, дефектів розміром понад 0,1 мм не виявлено.

Висновок по розділу 5

З метою верифікації якості зварних з'єднань, виготовлених методом плазово-дугового зварювання із застосуванням різнополярного асиметричного струму, проведено комплекс дослідів з неруйнівного контролю, що включає радіографічне та ультразвукове дослідження.

Радіографічний контроль дозволив оцінити внутрішню структуру шва на предмет наявності пор, непроварів, тріщин і включень. Візуалізація з використанням рентгенівської плівки у поєднанні з денситометричним аналізом показала відсутність дефектів розміром понад 0,1 мм у досліджених зразках.

Ультразвукова дефектоскопія, проведена із застосуванням похило-поперечного перетворювача, підтвердила результати рентгенографії та дозволила локалізувати критичні ділянки з високою просторовою роздільністю. У межах контрольованої зони не виявлено акустичних відгуків, характерних для порушень суцільності металу.

Отримані результати свідчать про високу якість формування з'єднань за розробленими технологічними режимами, що забезпечують відсутність внутрішніх дефектів, критичних для подальшої експлуатації зварної конструкції.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						85
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

6.1 Опис ідеї стартап-проекту

У дипломній роботі є ідея стартапу, описана в таблиці 6.1, яка полягає у створенні універсальної мобільної платформи для високоякісного зварювання алюмінієвих сплавів із застосуванням вдосконаленої технології плазмово-дугового зварювання. Основна інновація полягає у використанні асиметричного різнополярного струму прямокутної форми. Система передбачає програмне керування параметрами зварювання з можливістю збереження технологічних режимів.

Таблиця 6.1 – Опис ідеї стартап

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Універсальна мобільна система для зварювання алюмінієвих сплавів з режимами ПДЗ на основі асиметричного різнополярного струму.	Авіаційна галузь – для зварювання тонкостінних елементів з алюмінію.	Зменшення ваги, мінімальне тепло викривлення
	Космічна галузь – для зварювання корпусів супутників, космічних кораблів.	Герметичність, зменшення кількості палива
	Суднобудування – для зварювання корпусів кораблів, паливних баків	Герметичність, стійкість до корозії

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ			
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Кім А. О.				Розроблення стартап-проекту	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Глуценко Я.І.						86	111
Н. контр.	Лисак В.В.					КПІ ім. Ізгоря Сікорського НН ІМЗ ім. Є.О. Патона		
Затверд.	Квасницький В.В.							

Такі напрямки як авіація, космос та суднобудування часто використовують алюміній, тому інноваційне удосконалення є актуальним. У дипломі представлено технологію зварювання, яка забезпечує: економію матеріалів; високу якість швів; уникнення пористості та інших дефектів; зменшенню ваги конструкцій, яка дозволяє витратити менше палива.

6.1.1 Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї

Таблиця 6.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик

№ п/ п	Техніко- економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейт- ральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Fronius	Kemppi Oy			
1	Асиметричний струм прямокутної форми	Присутній	Присутній	Частково		+	
2	Економність (Витрата газу/ Енергоспожива ння)	Висока	Середня	Середня			+
4	Ціна обладнання	Помірна	Висока	Висока			+
5	Мобільність / компактність	Висока	Середня	Висока		+	

В проєкті застосовується джерело, здатне генерувати різнополярний струм із прямокутним профілем імпульсу, що дозволяє миттєво досягати порогових значень струму зворотної полярності для ефективного катодного очищення. Це мінімізує інтервали низької іонізації та забезпечує максимальний корисний вплив зварювальної дуги. Kemppi Oy використовує напівсинусоїдальний або квазіпрямокутний режим, проте з обмеженим діапазоном частот і меншим впливом на стабільність дуги у високочастотному режимі. Представлена ідея перевершує конкурентів за ключовими параметрами, що дає підстави віднести її до сильних сторін і розглядати як технологічно доцільну та економічно обґрунтовану альтернативу для впровадження у виробництво. Визначення сильних та нейтральних характеристик представлено в таблиці 6.2.

6.2 Технічний аудит ідеї проєкту

Таблиця 6.3 містить аналіз впровадження розглянутої технології в межах стартап-проєкту, враховуючи рівень готовності її компонентів, доступність технічних рішень.

Запропонована концепція має високий рівень технологічної здійсненності, оскільки ключові елементи системи вже реалізовані у промислових зразках або можуть бути адаптовані без суттєвих доопрацювань. Основна інженерна цінність рішення полягає в його системній інтеграції, що оптимізує параметри зварювального процесу та підвищує якість отриманих з'єднань.

					3С11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						88
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 6.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Опис ідеї проекту	Технологія реалізації ідеї проекту	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Універсальна мобільна платформа для високоякісного зварювання алюмінієвих сплавів	Плазмово-дугове зварювання з асиметричним різнополярним струмом прямокутної форми	Наявна на ринку, потребує адаптації	Обладнання доступне, потребує доопрацювання
2	Ультразвуковий контроль якості зварних з'єднань	Використання промислових ультразвукових дефектоскопів	Впроваджена у виробництво	Доступне для інтеграції
3	Оптимізація витрати матеріалів та газу при зварюванні	Програмне керування параметрами зварювання, зменшення витрати газу та електродів	Потребує розробки алгоритмів	Доступне для реалізації через програмне забезпечення

6.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Попит на високоякісне зварювання алюмінієвих сплавів зростає так, як вони дозволяють знижувати вагу конструкцій, підвищувати їхню міцність і забезпечувати довговічність.

Авіабудування активно використовує алюмінієві сплави через їх низьку густину, високу міцність та корозійну стійкість. Зварювання алюмінію є

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		89

критичним для виробництва: фюзеляжів – необхідно забезпечити герметичні та міцні стикові з'єднання для зменшення ваги літака; крила та несучі конструкції – від якості зварних з'єднань залежить аеродинаміка та безпека експлуатації; паливні баки – алюміній дозволяє зменшити вагу та підвищити паливну ефективність.

Алюміній є ключовим матеріалом у виробництві супутників, космічних кораблів та ракетних систем. Його легкість та термостійкість дозволяє створювати конструкції, здатні витримувати екстремальні умови. Корпуси супутників повинні мати герметичність та стійкість до космічної радіації та температурних перепадів, мінімізація маси бака дозволяє зменшити паливне навантаження. Алюміній добре забезпечує теплозбереження електроніки у супутниках та модулях.

Точний контроль зварного шва методом ультразвуку гарантує відсутність тріщин та дефектів, що важливо для безперебійної роботи космічних апаратів.

Алюміній набирає популярність у морських конструкціях, оскільки має високу корозійну стійкість, особливо у морській воді. Зварювання плазмово-дуговим методом із асиметричним струмом дозволяє зменшити деформації конструкцій та забезпечити герметичність стикових з'єднань для підвищення терміну експлуатації суден. Використання мобільної платформи з ПДЗ дозволить автоматизувати виробництво, забезпечити якісні зварні з'єднання та мінімізувати витрати матеріалів. Характеристика потенційного ринку стартап-проекту приведена в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Характеристика потенційного ринку стартап- проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців	6 одиниць (Fronius, Kemppi Oy, ESAB, Lincoln Electric,)
2	Загальний обсяг продаж	Орієнтовно \$1 млрд на глобальному ринку

Продовження таблиці 6.4

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
3	Динаміка ринку	Стабільне зростання на 7-10% щорічно через збільшення використання алюмінієвих конструкцій
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Високі витрати на розробку обладнання, необхідність сертифікації, конкуренція з великими виробниками
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ISO 18273:2015 (зварювальні матеріали), ДСТУ EN 1714:2015 (ультразвуковий контроль), промислові стандарти для авіації та суднобудування
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	15-25% у сегментах зварювальних технологій (висока маржинальність у спеціалізованих рішеннях)

Стартап має високий потенціал для виходу на ринок, який демонструє стабільне зростання та перспективи розвитку у сфері зварювальних технологій. Водночас необхідно враховувати низку викликів, зокрема високу вартість стартового впровадження, сертифікаційні обмеження та конкуренцію з великими виробниками. Додаткові складнощі можуть виникнути через необхідність навчання персоналу та залежність від постачальників витратних матеріалів, що впливає на стабільність процесу. Незважаючи на ці фактори, проєкт має вагомі конкурентні переваги завдяки інноваційному підходу до зварювання алюмінієвих сплавів, оптимізації виробничих витрат та технологічній ефективності.

Цільова аудиторія охоплює широкий спектр галузей, що перебувають у стадії активного зростання та потребують інноваційних рішень у сфері

зварювання, що забезпечує стабільний попит на запропоновану технологію. Проведений аналіз ринку дозволив сформулювати характеристики потенційних клієнтів, наведені в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Зниження маси авіаційних конструкцій	Виробники авіаційної техніки	Жорсткий контроль відповідності стандартам	Оптимальне співвідношення міцності, легкості та довговічності
2	Забезпечення герметичності та міцності конструкцій у вакуумному середовищі	Космічні агентства	Відповідність технічним регламентам і сертифікації	Використання в екстремальних умовах
3	Оптимізація конструкцій суден для підвищення експлуатаційної ефективності	Виробники морських платформ	Відповідність технічним регламентам і сертифікації	Корозійна стійкість у морських умовах, відповідність галузевим стандартам

Проект має виразні конкурентні переваги, зокрема використання високоефективного способу з'єднання алюмінієвих сплавів, що забезпечує кращі механічні характеристики швів і стабільність процесу порівняно з традиційними методами зварювання.

Наявність технічної бази, досвіду та підтверджених результатів випробувань надає змогу швидко адаптувати технологію до виробничих умов. До беззаперечних сильних сторін можна віднести інноваційність підходу та високий потенціал для автоматизації, що відкриває шлях до застосування в аерокосмічній, транспортній та енергетичній галузях. Водночас реалізація технології стикається з певними внутрішніми обмеженнями – передусім йдеться про обмежену фінансову підтримку на старті, необхідність залучення зовнішнього інвестора або стратегічного партнера, а також потребу в адаптації обладнання під серійне виробництво.

У деяких аспектах проєкт поступається конкуруючим рішенням у частині вже ustalених виробничих процесів та масштабованості. Водночас зовнішнє середовище створює значні можливості: існує виражений попит на легкі та міцні з'єднання алюмінієвих сплавів, держава підтримує інноваційні розробки в галузі машинобудування, а зростаючий інтерес до "зеленої" енергетики стимулює потребу в легких конструкціях.

Загрози, які можуть вплинути на успішність впровадження, включають жорстку конкуренцію з боку великих виробників з налагодженими технологіями, ризики коливань вартості сировини та матеріалів, а також невизначеність регуляторного середовища щодо сертифікації нових технологій. SWOT-аналіз стартап-проєкту наведено в таблиці 6.6. Незважаючи на ці виклики, грамотне позиціонування та акцент на перевагах дають підстави розглядати проєкт як перспективний для виведення на ринок.

Таблиця 6.6 – SWOT-аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони:		Слабкі сторони:	
Унікальна технологія плазмово-дугового зварювання з асиметричним різнополярним струмом		Високі початкові витрати на розробку та інтеграцію технології	
Висока якість зварних з'єднань та мінімізація пористості		Необхідність сертифікації відповідно до міжнародних стандартів	
Економічна ефективність (зменшена витрата газу та електродів)		Відсутність широкої ринкової впізнаваності	
Компактність та мобільність платформи		Потенційна залежність від постачальників	
Використання ультразвукового контролю для забезпечення бездефектних швів		Потреба в додатковому фінансуванні для масштабування.	
Можливості:		Загрози:	
Зростання попиту на високоякісне зварювання		Конкуренція з великими гравцями ринку	
Державні програми підтримки технологічних стартапів		Висока вартість сертифікації для виходу на міжнародний ринок	
Розширення технології для застосування в електромобільному транспорті		Технологічна застарілість у разі швидкого розвитку альтернативних методів зварювання	
Потенціал для стратегічного партнерства з великими виробниками		Можливі зміни стандартів, що вплинуть на вимоги до технології	

SO-стратегії. Високий рівень інноваційності технології, наявність дослідницької бази та технічної компетенції дозволяють ефективно використати поточні ринкові можливості – зокрема, зростаючий попит на легкі, високоміцні конструкції в авіабудуванні, суднобудуванні та енергетиці. Завдяки стабільності процесу зварювання та можливості автоматизації відкривається перспектива інтеграції в масштабне виробництво при наявності державних грантових програм і підтримки технологічних інновацій.

WO-стратегії. Для компенсації обмежених фінансових ресурсів та недостатньої комерційної масштабованості може бути реалізована стратегія залучення зовнішнього фінансування через державні програми інноваційної підтримки. Водночас, розвиток компетенцій у сфері маркетингу та стратегічного менеджменту дозволить посилити життєздатність проекту. Доступ до партнерських програм з технопарками чи промисловими інкубаторами дає змогу частково компенсувати відсутність власної виробничої інфраструктури.

ST-стратегії. Глибока технічна експертиза та унікальність технології дозволяють частково нівелювати вплив ринкової конкуренції: проект орієнтується на вузькоспеціалізовані сектори, де типові технології не забезпечують належної якості. Впровадження стандартизованих технічних рішень і цифрового керування процесом зварювання дозволяє уникати ризиків, пов'язаних із нестабільністю людського чинника. Готовність до адаптації технології під сучасні вимоги сертифікації забезпечує відповідність регуляторним викликам.

WT-стратегії. Потенціал до автоматизації знижує вплив кадрових ризиків, а гнучкість процесу зварювання в умовах змінних навантажень дозволяє адаптуватися до ринкових та технічних викликів. Використання дослідно перевіреного устаткування забезпечує стабільність якості, що є вагомим аргументом у разі загроз з боку конкурентів або регуляторних органів.

Для даного стартап-проекту доцільно орієнтуватися на WO-стратегію, оскільки саме вона найбільш повно відповідає поточному технічному та

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

організаційному стану проекту. На сьогодні ключова технологічна база створена, базові компоненти протестовані, проте існують обмеження фінансового характеру, питання масштабування та сертифікації, що є типовими для інноваційного інженерного стартапу на ранніх етапах розвитку. Основні зусилля слід зосередити на забезпеченні повної відповідності вимогам стандартів ISO та ДСТУ для промислового застосування. Реалізація цієї стратегії дозволить перетворити прототип на готовий до ринку технологічний продукт із конкурентною вартістю та високою надійністю.

Висновок по розділу 6

Проведений стратегічний аналіз підтвердив техніко-економічну доцільність ідеї стартапу, заснованої на створенні мобільної зварювальної платформи для обробки алюмінієвих сплавів за допомогою ПДЗ з асиметричним різнополярним струмом прямокутної форми. Запропоноване технічне рішення вирізняється як інженерною обґрунтованістю, так і високим рівнем адаптивності до потреб промислових галузей із підвищеними вимогами до якості стикових з'єднань.

Використання прямокутного імпульсного струму дозволяє істотно покращити ефективність катодного очищення, зменшити інерційні втрати тепла на фазах переходу та підвищити термостійкість вольфрамових електродів. Мобільність системи та її здатність до збереження і автоматизованого відтворення режимів зварювання забезпечують високу повторюваність параметрів шва та зменшення людського впливу на стабільність процесу.

Результати SWOT-аналізу свідчать про наявність суттєвих конкурентних переваг – як з боку технологічного рівня, так і з погляду потенціалу інтеграції в індустріальні ланцюги. Водночас проект демонструє здатність компенсувати існуючі слабкі сторони за рахунок стратегічних партнерств, участі у державних програмах підтримки інновацій та адаптації під галузеві стандарти

					3С11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7 ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці є головним аспектом безпечного функціонування будь-якого виробництва, особливо в галузі зварювальних технологій. Виконання плазмово-дугового зварювання потребує ретельного контролю за умовами праці, відповідності робочого середовища встановленим нормативам.

У процесі ПДЗ сплавів алюмінію працівник піддається дії комплексу шкідливих та небезпечних виробничих факторів, наведені в таблиці 7.1, які можуть негативно впливати на функціональний стан організму та викликати професійні захворювання. З урахуванням характеру виконуваних робіт, фактори поділяються на фізичні, хімічні, психофізіологічні та механічні.

7.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів (ШНВФ)

7.1.1 Фізичні фактори

Основним фізичним чинником у зоні зварювання є інтенсивне електромагнітне випромінювання, що охоплює ультрафіолетову, видиму та інфрачервону області спектра. Підвищене теплове навантаження формується внаслідок випромінювання зони дуги та розігрітого металу. Значне джерело шуму утворюється від дугового розряду та роботи допоміжного обладнання (системи подачі дроту, охолодження, механізмів переміщення), що може спричинити професійні захворювання слуху або нервової системи. Крім того, при зварюванні на відкритих майданчиках або у непровітрюваних приміщеннях на працівника діє мікрокліматичний дискомфорт – висока температура, недостатня вологість, конвективні потоки газів [19, 20].

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ								
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Кім А. О.			Охорона праці				Літ.	Арк.	Аркушів		
Перевір.		Левченко О.Г.									96	111	
Н. контр.		Лисак В.В.											
Затверд.		Квасницький В.В.			КПІ ім. Ізгоря Сікорського								
					НН ІМЗ ім. Е.О. Патона								

7.1.2 Хімічні фактори

У процесі плавлення металу відбувається термічне розкладання поверхневих оксидів і домішок, у тому числі залишків мастил, які можуть містити органічні сполуки. Основну небезпеку становить утворення аерозолів металів (алюмінію, магнію, марганцю) та їхніх оксидів. В умовах недостатньої вентиляції можлива концентрація парів фтору, хлору або озону, які виникають при взаємодії плазми з домішками в захисному газі. При постійному вдиханні таких сполук спостерігаються ушкодження дихальної системи та загальнотоксична дія [22].

7.1.3 Психофізіологічні фактори

До цієї групи слід віднести зорове та нервово-емоційне напруження, пов'язане з візуальним контролем процесу, підтриманням точності переміщення плазмотрона та дотриманням стабільності дуги. Робота супроводжується необхідністю постійної концентрації уваги, що зумовлює розвиток втоми, зниження реакції на зміну зовнішніх умов. У разі тривалого статичного навантаження на опорно-руховий апарат виникає ризик розвитку локального м'язового перенапруження [29].

7.1.4 Механічні фактори

Зварювальний процес включає роботу з різноманітним обладнанням, що створює потенційно небезпечні зони – рухомі механізми подачі, електроприводи, системи високовольтного живлення. При обслуговуванні елементів, що перебувають під напругою, можливий ураження електричним струмом. Існує ризик термічного опіку через контакт з розігрітими деталями, бризками розплавленого металу або плазмового струменя. Падіння предметів,

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						97
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

переміщення вузлів або нестабільне закріплення заготовок можуть викликати травматизм [29].

Таблиця 7.1 – Небезпечні та шкідливі виробничі фактори при зварюванні і споріднених процесах

Плазмо-дугове зварювання			Інтенсивність фактору
Шкідливі виробничі фактори	Шкідливі речовини		XX
	Випромінювання в оптичному діапазоні	Ультрафіолетове	X
		Видиме	XX
		Інфрачервона	XX
	Електромагнітні поля		-
	Магнітні поля		-
	Іонізуючі випромінювання		X
	Шум		X
	Ультразвук		X
	Статичне навантаження руху		-
Небезпечні виробничі фактори	Електричний струм		XX
	Іскри, бризки і види розплавленого металу		XX
	Механізми і вироби, що рухаються		X
	Системи, які знаходяться під тиском, що не дорівнює атмосферному		XX

Примітки: xx – інтенсивний фактор; x – помірний фактор; (-) – незначний фактор чи його відсутність

7.2 Нормативні вимоги безпеки та гігієни праці

При виконанні робіт із плазмово-дугового зварювання алюмінієвих сплавів у виробничих умовах необхідно дотримуватись вимог безпеки праці відповідно до чинного законодавства України, включаючи вимоги Закону України «Про охорону праці», ДСТУ 2456-94 [25] «Системи стандартів безпеки праці. Організація робочих місць. Загальні положення» та ДСТУ 2489-94 [26] «Захист працюючих від впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Основні положення».

ПДЗ потребує чіткого дотримання правил охорони праці, оскільки процес пов'язаний з інтенсивним тепловим випромінюванням, виділенням аерозолів металів, впливом електромагнітного випромінювання та можливими механічними ризиками.

Усі операції зварювання мають виконуватись згідно з технологічною картою, з урахуванням режимів, які виключають утворення вибухонебезпечних концентрацій газів або перегрів обладнання.

7.2.1 Вимоги до приміщення

Виробниче приміщення повинне мати відповідну вентиляційну систему для видалення зварювальних аерозолів, пилу та диму. Природне та штучне освітлення повинно забезпечувати рівень не нижчий ніж 300 лк в зоні зварювання відповідно до ДБН В.2.5-28:2006 [27]. Температурний режим у приміщенні повинен підтримуватись у межах від 18 °С до 24 °С. Підлога повинна бути електроізолюваною та стійкою до механічного та термічного впливу.

Зварювальне обладнання повинне відповідати технічним умовам експлуатації. Робоче місце зварювальника необхідно облаштувати екранами з негорючих матеріалів, які обмежують розповсюдження ультрафіолетового

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		99

випромінювання. Кожен агрегат має бути заземлений, а силові кабелі повинні бути ізольованими та закріпленими згідно з вимогами електробезпеки.

Періодичний контроль стану вентиляційної системи, справності заземлення, рівня шуму (не вище 85 дБ у робочій зоні) та освітлення проводиться не рідше одного разу на квартал. До робіт допускаються лише особи, які пройшли навчання, інструктаж з охорони праці та мають відповідну кваліфікацію.

7.2.2 Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)

Працюючі повинні бути забезпечені спеціальним одягом, рукавицями, захисним зварювальним щитком або маскою з автоматичним затемненням. Також необхідне використання респіратора класу FFP2 або вищого при зварюванні алюмінієвих сплавів, що супроводжується утворенням металевих аерозолів. Взуття повинне бути діелектричним або з антистатичними властивостями.

Усі працівники повинні проходити попередній і періодичний медичний огляд згідно з вимогами МОЗ. Забезпечення працівників питною водою, приміщеннями для відпочинку та приймання їжі є обов'язковим, згідно з типовими нормами [30].

7.3 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці

7.3.1 Технологічні процеси

Безпека праці при зварюванні забезпечується впровадженням автоматизованих систем з дистанційним керуванням. Установки ПДЗ повинні бути оснащені елементами електрозахисту – реле струму витоку, автоматами відключення при аварійних перевантаженнях. Для зменшення концентрації зварювальних аерозолів використовуються локальні витяжні системи з регульованим потоком, що встановлюються безпосередньо в зоні дуги.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						100
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Газопостачання реалізується через системи з запобіжними клапанами, що виключає перевищення тиску або витік аргону. Зварювальні роботи повинні відповідати ДСТУ 2456-94 [25] та ДСТУ 2489-94 [25], які встановлюють норми щодо безпечного ведення технологічних операцій. Важливим аспектом є дотримання вимог електробезпеки відповідно до ДСТУ EN 60974-1 [28], що регламентує конструкцію, ізоляцію та захист струмоведучих частин обладнання.

Контроль стану електродів і витратних матеріалів здійснюється через регламентовану заміну та калібрування. Пристрої для ручного втручання ізольовані та мають маркування допустимих дій. З метою зниження теплового навантаження на зварника використовується водяне охолодження плазмотрона, що забезпечує стабільний температурний режим і зменшує ризик опіків.

7.3.2 Захист від шкідливих речовин

У процесі плазмодугового зварювання алюмінієвих сплавів в робоче середовище потрапляють шкідливі речовини, зокрема пари і аерозолі металів (алюмінію, магнію), оксиди азоту та озону. Це обумовлено високою температурою дуги та інтенсивним ультрафіолетовим випромінюванням. Найбільш небезпечним є дрібнодисперсний пил і гази, які можуть потрапляти в органи дихання працівника та викликають гострі й хронічні професійні захворювання [31].

Відповідно до вимог ДСН 3.3.6.042-99 [32], необхідно дотримуватись гранично допустимих концентрацій: для аерозолію алюмінію $2 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$; для озону $0,1 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$; для діоксиду азоту $1,5 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$.

З метою зниження концентрації шкідливих речовин у повітрі та захисту персоналу в проекті передбачено такі інженерні рішення: місцева витяжна вентиляція безпосередньо над робочим місцем зварника для відведення забрудненого повітря; загальнообмінна вентиляція, що відповідає

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						101
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нормативним вимогам для зварювальних дільниць; використання засобів індивідуального захисту органів дихання; використання водяного охолодження плазмотрона, що знижує тепловий вплив і, відповідно, інтенсивність утворення озону; регулярний лабораторний контроль стану повітряного середовища у робочій зоні, не рідше одного разу на рік або після модернізації обладнання; організація раціонального режиму праці та відпочинку з урахуванням часу дії шкідливих факторів.

7.3.3 Вимоги до вентиляції

Об'єм повітря, який потрібно видалити за допомогою місцевої вентиляції L_M , визначають з урахуванням швидкості всмоктування безпосередньо біля джерела утворення шкідливих речовин. При цьому беруть до уваги особливості конструкції витяжного отвору, характер розподілу швидкостей повітряного потоку та наявність огорожуючих елементів у зоні всмоктування [24]. У цьому випадку визначається за формулою (1.1):

$$L_M = 3600 F_0 V_0 = 3600 * 0,015 * 51,4 = 2775,6 \text{ м}^3 * \text{год}, \quad (1.1)$$

де F_0 – площа відкритого перерізу витяжного отвору відсмоктувача, м^2 ;

V_0 – швидкість всмоктування повітря у цьому прорізі, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$.

У даній роботі використовується місцева витяжна система ESTA - SRF K-10 FM, наведена на рис. 7.1. Витяжний пристрій для всмоктування має округлу форму з екраном діаметром $d = 0,14 \text{ м}$. Площа відкритого перерізу витяжного отвору відсмоктувача визначається за формулою обчислення площі кола (1.2):

$$F_0 = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 0,015 \text{ м}^2. \quad (1.2)$$

					3С11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						102
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Швидкість руху повітря, що створюється місцевими відсмоктувачами біля джерел виділення шкідливих речовин при ПДЗ для алюмінія становить $V_X = 1,4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, відстань від місця зварювання до всмоктувального пристрою повітря дорівнює $X = 0,3 \text{ м}$, розрахунок виконується за формулою (1.3):

$$V_0 = 8V_X \left(\frac{X}{d}\right)^2 = 8 * 1,4 * \left(\frac{0,3}{0,14}\right)^2 = 51,4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (1.3)$$



Рисунок 7.1 – Місцева витяжна система ESTA - SRF K-10 FM

Кількість шкідливих речовин, що локалізується місцевою вентиляцією, може складати для витяжних шаф не більше 90%, а для інших видів витяжних пристроїв – не більше 75%. Тому решта шкідливих речовин (10-25%) повинна видалятися загальнообмінною вентиляцією [33].

7.3.4 Організації робочого місця

Робоче місце оператора зварювання організовується відповідно до вимог ДБН В.2.2-28:2012 [22], з урахуванням просторової безпеки та ергономіки. Поверхня підлоги повинна бути антиковзкою та теплоізовованою. Усі кабелі розміщуються у захисних гофрах або кабель-каналах з маркуванням. У зоні обслуговування обладнання передбачене аварійне освітлення та дублювання вентиляції. Робоча поверхня має достатнє освітлення не менше 300 лк, з мінімальним рівнем засліплення.

В обов'язковому порядку передбачено використання засобів індивідуального захисту: костюм з вогнестійкої тканини; зварювальна маска з автоматичним затемненням; термостійкі рукавиці; захисне взуття з металевим підноском. Периферійне захисне обладнання – екрани та щити – обмежує вплив оптичного випромінювання на сторонніх осіб.

У межах виробничого процесу організовується періодичне навчання персоналу з техніки безпеки та пожежної безпеки, а також перевірка знань щодо порядку дій у разі аварійних ситуацій. Засоби пожежогасіння (вогнегасники, пісок, ізолюючі ковдри) розміщуються у безпосередній близькості до установки.

7.4 Пожежна безпека

Згідно з НАПБ Б.03.002-2007 [34] забезпечення пожежної безпеки у зварювальному виробництві є критично важливим завданням, яке включає контроль використаних матеріалів, ідентифікацію можливих джерел загоряння та впровадження заходів профілактики для мінімізації ризиків.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						104
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7.4.1 Аналіз пожежовибухонебезпечних матеріалів

У технологічному процесі застосовуються речовини, які можуть бути потенційними джерелами займання. До них належать:

- електроди та присадні матеріали, що містять горючі компоненти;
- гази (аргон, кисень, ацетилен), що використовуються для зварювання та можуть спричинити вибух за неправильного зберігання;
- мастильні та ізоляційні матеріали, здатні займатися при високих температурах;
- пил і дрібнодисперсні частинки металу, які можуть спалахнути при контакті з відкритим вогнем або електричним розрядом.

Виробниче приміщення, де виконуються зварювальні роботи, має відповідати вимогам безпеки та бути віднесене до відповідної категорії пожежовибухонебезпечності.

7.4.2 Причини виникнення пожеж та профілактичні заходи

Основні причини займання у зварювальному виробництві:

- несправне електрозварювальне обладнання або його перегрів;
- порушення режиму роботи із газами та недостатня герметичність балонів;
- неконтрольоване накопичення горючих речовин у зоні виконання робіт;
- іскроутворення, що може спричинити займання легкозаймистих матеріалів.

Заходи профілактики: регулярний технічний огляд та обслуговування обладнання; дотримання технологічних норм при зварюванні, уникнення перегріву робочих зон; використання негорючих матеріалів для обшивки та ізоляції приміщення; систематична перевірка герметичності газових балонів та трубопроводів.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						105
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Важливим елементом безпечної роботи є система пожежного контролю, яка включає: засоби первинного пожежогасіння – вогнегасники, пісок, пожежні щити); автоматичні системи пожежної сигналізації та локального гасіння; наявність евакуаційних виходів із відповідним маркуванням; системи оперативного зв'язку для виклику пожежних служб.

Висновок по розділу 7

У процесі ПЗД алюмінієвих сплавів працівник зазнає дії комплексу ШНВФ фізичної, хімічної, механічної та психофізіологічної природи. Найбільшу загрозу становлять електромагнітне випромінювання, підвищені температури, токсичні аерозолі металів, шум, вібрації та небезпека ураження електричним струмом.

Запропоновані інженерні рішення дозволяють мінімізувати ризики професійних захворювань та травм. Організація безпечного робочого середовища, дотримання вимог нормативної документації, регулярний інструктаж персоналу та використання засобів індивідуального захисту забезпечують відповідність умов праці сучасним вимогам безпеки на виробництві.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		106

ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті досліджено процес плазово-дугового зварювання алюмінієвого сплаву 1570, запропоновано практичні рекомендації щодо підвищення стабільності зварювального процесу.

На основі проведеного аналізу літературних джерел було встановлено, що сплав 1570 є перспективним для застосування в промисловості. Під час досліджень встановлено, що оптимальні параметри різнополярного асиметричного струму (зокрема частота і тривалість фаз) позитивно впливають на формування зварного шва, зменшення дефектів та покращення структури металу в зоні термічного впливу.

Результати експериментів свідчать про доцільність використання підкладок зі знімною канавкою та обраного присадного дроту на основі системи Al–Mg–Mn. Це дозволило забезпечити достатню глибину проплавлення та якісне формування кореня шва у нижньому положенні.

У рамках проєкту також було виконано контроль якості зварних з'єднань із використанням методів неруйнівного контролю. Аналіз показав відсутність критичних внутрішніх і зовнішніх дефектів, що підтверджує ефективність обраної технології.

Окрему увагу приділено питанням безпеки праці, де розглянуто шкідливі та небезпечні чинники, що виникають при виконанні зварювальних робіт. Запропоновано технічні та організаційні заходи для їх усунення або зменшення впливу.

Крім того, в проєкті розроблено ідею стартапу на основі дослідженої технології, з виконанням техніко-економічного аналізу та оцінкою ринкових можливостей її впровадження у промисловість.

Загалом, результати дипломної роботи можуть бути використані для вдосконалення процесу зварювання сплаву 1570 у реальних виробничих умовах, а також для подальших досліджень у галузі підвищення якості зварних з'єднань алюмінієвих матеріалів.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						107
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Калініна Н.Є. Використання алюмінієвих сплавів в авіаційній та ракетно-космічній техніці/ О.В. Бондаренко. – Київ: РВВ ДНУ, 2011. – 64 с.
2. Алюмінієві сплави в суднобудуванні – швидкозростаюча тенденція [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dhm-aluminum.com/news/5083-6082-aluminium-alloys-in-shipbuilding-a-29226075.html> (дата звернення: 13.05.2025). – Назва з екрана.
3. 5083 алюміній Фізична характеристика та хімічний склад [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ua.dl-aluminum.com/info/5083-aluminum-physical-specification-and-chemical-26292085.html> (дата звернення: 13.05.2025). – Назва з екрана.
4. Сплав АМг61 (1561) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://evk.com.ua/materials/splav-amg61-1561.html> (дата звернення: 14.05.2025). – Назва з екрана.
5. АЛЮМІНІЙ AW-5086 | AlMg4 | AW-AlMg4 | AlMg4Mn | 3.3545 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://emetal.eu/ua/AW-5086/> (дата звернення: 14.05.2025). – Назва з екрана.
6. Алюмінієві сплави. Хімічний склад і властивості: ДСТУ ГОСТ 4784:2007. – Київ: Держспоживстандарт України, 2007.
7. Дриц М. Є. Вплив РЗМ на механічні властивості сплаву Al–6,5 % Mg / М. Є. Дриц, Л. С. Торопова, Ю. Г. Биков // Металознавство і термічна обробка металів. – 1980. – № 10. – С. 35–37.
8. Філатов Ю. А. Деформовані сплави на основі системи Al–Mg–Sc / Ю. А. Філатов // Металознавство і термічна обробка металів. – 1996. – № 6. – С. 33–36.
9. Сплави алюмінію у харчовій промисловості [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://auremo.vip/reference/pishhevoj-aluminium.html> (дата звернення: 14.05.2025). – Назва з екрана.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		108

10. ВПЛИВ РЕЖИМІВ ІМПУЛЬСНО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ НА ЗМІНУ ПАРАМЕТРІВ ШВА І ЗТВ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.li/zgrflt> (дата звернення: 15.05.2025). – Назва з екрана.

11. Гібридне зварювання алюмінієвих сплавів 1561 та 5083 з використанням плазмової дуги і дуги плавкого електрода (plasma-mig)/ Бабич О.А. [та ін.]; Гуандунський інститут зварювання (Китайсько-український інститут зварювання ім. Є.О. Патона), Гуанчжоу, КНР ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. – м. Київ : 2020. – 12 с.

12. Кривцун І. В. Плазмове зварювання: Енциклопедія Сучасної України. – Кмів: Освіта, 2023. – 6 с.

13. Гринюк А.А. Плазмово-дугове зварюванні алюмінієвих сплавів різнополярним асиметричним струмом: дис. ... канд. тех.-наук: 05.03.06 / Гринюк Андрій Андрійович, – Київ, 2021. – 185 с.

14. Патон Є. О. Зварювання алюмінію та його сплавів / Є. О. Патон, В. В. Скрябінський. – Київ: Наук. думка, 1972. – 328 с.

15. Mathers J. Aluminium Welding / J. Mathers; The Welding Institute (TWI). – Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2002. – 240 p.

16. Aluminum Vacuum Preparation [Електронний ресурс] // Instructables Workshop. – Режим доступу: <https://www.instructables.com/Aluminum-Vacuum-Preparation/> (дата звернення: 04.06.2025). – Назва з екрана.

17. Чернов В. В. Сучасні методи неруйнівного контролю / В. В. Чернов, Ю. М. Мельник. – Київ: Либідь, 2020. – 256 с.

18. ДСТУ EN 1714:2015. Контроль неруйнівний. Ультразвуковий контроль. Настанова щодо використання.

19. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.

20. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						109
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

21. Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві: навч. посіб. / О. Г. Левченко. – Київ: Основа, 2010. – 240 с.
22. ДБН В.2.2-28:2010. Будинки адміністративного та побутового призначення.
23. Гевко Б. М. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів / Б. М. Гевко, Р. Б. Гевко. – Львів: Світ, 2019. – 312 с.
24. Паньків І. Я. Фізико-хімічні основи сплавів / І. Я. Паньків. – Київ: Наукова думка, 2015. – 278 с.
25. ДСТУ 2456-94. Зварювання дугове і електрошлакове. Вимоги безпеки (61739) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.li/pwkezy> (дата звернення: 06.06.2025). – Назва з екрана.
26. ДСТУ 2489-94. Система стандартів безпеки праці. Контактне зварювання. Вимоги безпеки (59989) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.li/pwkezy> (дата звернення: 06.06.2025). – Назва з екрана.
27. BN01:1961-5428-6735-5037 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surli.cc/arjnz5> (дата звернення: 06.06.2025). – Назва з екрана.
28. ДСТУ EN 60974-11:2017. Обладнання для дугового зварювання. Частина 11. Електродотримачі. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017.
29. Охорона праці та цивільний захист / О. Г. Левченко, О. І. Полукаров, В. В. Зацарний та ін. // За ред. О. Г. Левченка. – К.: Основа, 2019. – 472 с.
30. ДСТУ 7239:2011. Національний стандарт України. Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація.
31. Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві: Навчальний посібник. – К.: Основа, 2010. – 240 с.
32. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень (34094).

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		110

33. Розділ з охорони праці в дипломних роботах: Рекомендації до виконання [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка» (зварювальні та споріднені спеціалізації) / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: О. Г. Левченко. – Електронні текстові дані (1 файл: 108 Кбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 28 с.

34. НАПБ Б.03.002-2007. Визначення категорії приміщень, будинків там зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.

					ЗС11.13.04.00.000 ПЗ	Арк..
						111
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		