

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет митної справи, матеріалів та технологій

(повне найменування факультету)

Кафедра матеріалознавства

(повна найменування кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»

**Вплив технологічних параметрів на якість зварного
з'єднання зі сплаву АМг5/The influence of technological
parameters on the quality of a welded joint made of АМг5
alloy**

спеціальність 132 Матеріалознавство

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма матеріалознавство

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти

групи _____

МАЗУРАК Михайло Вікторович

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Фещук Юрій Петрович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«___» _____ 2025 р.

к.т.н., доцент

Гарант освітньої програми:

Мельничук Микола

Дмитрович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

факультет митної справи, матеріалів та технологій
Кафедра матеріалознавства
Ступінь вищої освіти: магістр
Галузь знань: 13 Механічна інженерія
Спеціальність: 132 Матеріалознавство
Освітня програма: Матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

Імбирович Н.Ю.

“ ” 20 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Мазурку Михайлу Вікторовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Вплив технологічних параметрів на якість зварного з'єднання зі сплаву АМг5

керівник роботи Решук Юрій Петрович, І.к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ ” 20 року №

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи «св» згідно 202 р.

3. Вихідні дані до роботи Сплав АМг5, зварювання середовища аргоном, товщина матеріалу 2мм, зварювання зя і прохід

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Аналітичний огляд і постановка задачі.

2. Методика проведення досліджень. 3. Освітлення теми

3.1. Макродослідження зварних з'єднань 3.2. Мікросіруктура

металу шва 3.3. Мікросіруктура штифного впаиву, 3.4. Розподіл

діл мікротвердості по перетнику, 3.5. Порівняння різних методик

пості зварного з'єднання 3.6. Висновки та рекомендації 4. Охорона

праці та замісі навколишнього середовища. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Слайд 1. Мета, Об'єкт, сфера Прикладі дослідження. Слайд 2. Завдання

дослідження Слайд 3. Надукова кобизка Слайд 4. Схема експериментальної

установки Слайд 5. Зовнішній вигляд зварного шва Слайд 6. Визначення

розподілу мікротвердості по перетнику Слайд 7. Результати вимірювання твердості

з зміниним кваліфікаційним темп. Слайд 8. Різні режими впаивання Слайд 9.

Таблиці результатів. Слайд 10. Результати досліджень щодо мікро структури

Слайд 11-14. Висновки та практичні рекомендації.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання «02» вересня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	Розділ 1. Аналітичний огляд і поетапна заготовка Слайд 1-4	20.10.2025	Виконано
2.	Методика проведення дослідження	15.11.2025	Виконано
3.	Огляд гасетини. Охорона праці та захист навколишнього середовища. Висновки та практичні рекомендації Слайд 5-14	06.12.2025	Виконано

Здобувач вищої освіти _____

(підпис)

Мазурек М.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____

(підпис)

Кемурі Т.П.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Мазурак М.В. Вплив технологічних параметрів на якість зварного з'єднання зі сплаву АМг5. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Матеріалознавство» спеціальності 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків.

В роботі встановлено оптимальний режим зварювання для забезпечення якісного зварного шва. Досліджено вплив швидкості зварювання, кількості тепlopідведення, напруги дуги та сили струму, а також проаналізовано макро та мікроструктура зварного шва. Зроблено загальні висновки та приведено порівняння розробленого технологічного процесу зварювання з іншими відомими методами.

Загальний обсяг роботи: 58 сторінок, вступ, 4 розділи та висновки, 6 рисунків, 2 таблиці, 13 літературних джерела.

Ключові слова: зварне з'єднання, макроструктура, мікроструктура, мікротвердість, режим зварювання

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	MP 0725.00.000 ПЗ			
Розробив		Мазурак М			Вплив технологічних параметрів на якість зварного з'єднання зі сплаву АМг5/The influence of technological parameters on the quality of a welded joint made of АМг5 alloy	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірив		Фещук					3	58
Н. Контр		Мисковець			ЛНТУ, каф. матеріалознавства, гр. Мм-21			
Затв.		Імбірович						

ABSTRACT

Mazurak A.V. The influence of technological parameters on the quality of a welded joint made of AМr5 alloy. Manuscript.

Master's qualification work of EP "Materials Science" specialty 132 Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The master's qualification work consists of an introduction, four sections, conclusions, a list of sources used, and appendices.

The work establishes the optimal welding mode to ensure a high-quality weld. The influence of welding speed, heat input, arc voltage, and current strength is studied, and the macro and microstructure of the weld is analyzed. General conclusions are drawn and a comparison of the developed welding process with other known methods is given.

Total volume of work: 58 pages, introduction, 4 sections and conclusions, 6 figures, 2 tables, 13 literary sources.

Keywords: welded joint, macrostructure, microstructure, microhardness, welding mode

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ	11
1.1. Зварювання алюмінієвих і магнієвих сплавів у машинобудуванні	11
1.2. Фізико-металургійна характеристика сплаву АМг5	20
1.3. Вплив технологічних параметрів на формування зварного шва	21
1.4. Типові дефекти та методи контролю якості зварних з'єднань	24
1.5. Сучасні дослідження у галузі	26
1.6. Постановка задачі дослідження	27
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	30
2.1. Загальні умови відбору та підготовки зразків	30
2.2. Оптична металографія: мікроструктура WM і ЗТВ	32
2.3. SEM (PEM) та EDS дослідження	33
2.4. Дослідження мікротвердості	33
2.5 Кількісна оцінка пористості (металографічна)	34
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДНА ЧАСТИНА	37
3.1. Макродослідження зварних з'єднань (макрошліфи)	37
3.2. Мікроструктура металу шва (WM)	38
3.3. Мікроструктура зони термічного впливу (ЗТВ)	39
3.4. Розподіл мікротвердості по перетину (BM–HAZ–WM)	40
3.5. Пористість та інші недосконалості зварного з'єднання	42
3.6. Висновки та рекомендації	43

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО

СЕРЕДОВИЩА..... 50

4.1. Нормативна база..... 50

4.2. Вимоги безпеки до робочих місць 50

4.3. Охорони праці під час проведення зварювальних робіт (MIG/CV та pulsed MIG) 51

4.4. Пункти з охорони праці під час травлення зразків хімічними реактивами та їх утилізація..... 53

ВИСНОВКИ ТА ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ..... 55

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 58

ДОДАТКИ

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Алюмінієво-магнієві деформівні сплави системи Al–Mg із вмістом магнію близько 5% (зокрема АМг5, а також близькі за хімічним складом та призначенням 5058, 5083-Н111, АА5056) широко застосовуються у зварних конструкціях транспортного, суднобудівного, машинобудівного та будівельного призначення завдяки поєднанню корозійної тривкості, достатньої міцності та високої технологічності у виготовленні листів і профілів. Типова легувальна основа АМг5 – твердий розчин Mg в α -Al, а також дисперсні інтерметалідні частинки системи Al–Mn–Fe, які формуються під час лиття/деформації та впливають на зародження рекристалізації й локальну деформаційну поведінку. Для АМг5 (за нормами на основі ГОСТ 4784) характерний діапазон Mg орієнтовно 4,8...5,8% та Mn порядку 0,3...0,8% з регламентованими домішками Fe, Si тощо, що зближує його з групою 5xxx (зокрема 5056/5083) і визначає подібність металознавчих закономірностей під час зварювання.

На відміну від термічно зміцнюваних Al-сплавів (2xxx/6xxx/7xxx), сплави Al–Mg не мають ефекту дисперсійного зміцнення за рахунок контрольованого старіння; їх міцність забезпечується переважно твердорозчинним зміцненням магнієм та деформаційним зміцненням (наклепом). Саме тому зварювання, яке супроводжується локальним нагрівом і термічними циклами різної інтенсивності, є критично важливим з позицій матеріалознавства: воно може частково або повністю «зняти» наклеп у зоні термічного впливу (ЗТВ), змінити розподіл і морфологію другофазних частинок, переформувати зеренну структуру та сформувати градієнт мікротвердості й міцності по перетину з'єднання. Для промислових процесів дугового плавлення (MIG/GMAW, TIG/GTAW, імпульсні режими) ключовим інтегральним фактором виступає тепловкладення (heat input), яке визначає ширину ЗТВ та швидкість охолодження; показово, що підвищення тепловкладення у GTAW для Al–Mg асоціюється з розширенням ЗТВ, укрупненням частинок/виділень та зниженням міцності зварного вузла.

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Якість зварного з'єднання AlMg5 у металознавчому сенсі доцільно трактувати як сукупність дефектності (пористість, несплавлення, тріщини, включення оксидів), керованості структурного стану шва і ЗТВ (зерно, дендритна будова, сегрегація Mg, частинки Al–Mn–Fe, можливі Mg-вмісні фази), локальних властивостей (мікротвердість, міцність, пластичність, втомна довговічність), а також корозійної поведінки, включно зі схильністю до міжкристалітної корозії при «сенсibiliзації» Al–Mg сплавів. Остання пов'язана з формуванням β -фази Al_3Mg_2 (або Mg-збагачених виділень) переважно вздовж меж зерен за тривалого перебування в інтервалі помірних температур; зварювальні термоцикли та подальші експлуатаційні нагріви можуть створювати передумови для такого структурного «старіння», особливо в неоднорідних за складом ділянках.

З позицій формування мікроструктури зварювання Al–Mg сплавів можна розглядати як процес, що створює три відмінні за механізмами структуроутворення області: метал шва (кристалізаційна структура, часто дендритна/коміркова, із можливою мікросегрегацією Mg), ЗТВ (перерозподіл дислокаційної густини, рекристалізація/відпал наклепу, зміни у дисперсних частинках), та основний метал (вихідний стан, наприклад H111, з помірним наклепом). Саме співвідношення параметрів режиму – сила струму, напруга, швидкість зварювання, форма переносу металу (суцільний/імпульсний), діаметр дроту, витрата та склад захисного газу, довжина дуги, підготовка кромки і чистота поверхні, попередній підігрів та міжпрохідна температура – визначає тепловкладення і, відповідно, характер структурних змін. У практиці зварювання алюмінію імпульсні режими GMAW часто застосовують як інструмент зниження середнього тепловкладення, що може сприяти зменшенню ширини ЗТВ та подрібненню зерна, одночасно знижуючи деформації та теплові впливи на властивості.

Окремої уваги потребує вибір присадного матеріалу для зварювання Al–Mg. Для конструкцій на основі сплавів із Mg до близько 5% широко застосовують дріт типу AlMg5, який у міжнародній класифікації відповідає,

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зокрема, ER5356 / EN ISO 18273 S Al 5356; його хімічна спорідненість з основним металом спрямована на отримання корозійностійкого металу шва та зниження ризиків утворення гарячих тріщин і крихких евтектик у кристалізаційній зоні. При цьому технологічні параметри визначають ступінь вигорання/випаровування Mg у ванні, розчинення оксидної плівки Al₂O₃, змочуваність та газонасичення розплаву – фактори, які прямо пов’язані з пористістю та стабільністю складу/структури шва.

Паралельно із плавильними методами, у сучасній практиці все більшого значення набувають твердофазні технології, насамперед зварювання тертям з перемішуванням (FSW), які для 5083-H111 демонструють інший принциповий шлях формування структури: інтенсивна пластична деформація та рекристалізація в ядрі шва (nugget zone) контактного зварювання зі значним подрібненням зерна, фрагментацією інтерметалідних частинок і, за даними експериментальних робіт, більш рівномірним профілем мікротвердості по перетину, ніж у випадку дугового зварювання з плавленням. У таких умовах технологічні параметри (швидкість зварювання, оберти інструмента, геометрія штифта, притискне зусилля) керують теплогенерацією та деформаційним режимом, а отже – розміром зерна, частинковою підструктурою та локальними властивостями.

У межах даного дослідження фокус доцільно зосередити на причинно-наслідковому зв’язку «параметри процесу → термічний цикл/швидкість охолодження → мікроструктура (шов/ЗТВ) → мікротвердість і експлуатаційні показники». Практична цінність такого підходу полягає у можливості обґрунтовано підбирати режими зварювання для АМг5 залежно від вимог до міцності, пластичності, герметичності та корозійної тривкості, а також пояснювати типові відмови з позицій структурної металургії (локальне розм’якшення ЗТВ, концентрація деформацій, пористість, структурна неоднорідність, сенсibiliзація). Таким чином, матеріалознавчий аналіз впливу технологічних параметрів є базою для оптимізації процесу зварювання АМг5 і

						MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
							9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

підвищення стабільності якості зварних з'єднань у реальних умовах виробництва та експлуатації.

Під час виконання кваліфікаційної роботи магістра було використано інструменти штучного інтелекту – виключно як допоміжний засіб для пошуку ідей, уточнення формулювань та опрацювання літератури. Усі твердження, висновки та результати дослідження належать автору та ґрунтуються на власному аналізі, а отримані результати від генеративного ШІ були перевірені на достовірність та відповідність академічній доброчесності.

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1. Зварювання алюмінієвих і магнієвих сплавів у машинобудуванні

У XX...XXI століттях алюмінієві сплави набули статусу стратегічного конструкційного матеріалу завдяки поєднанню малої густини, високої питомої міцності та відмінної корозійної стійкості. Їх масове впровадження у машинобудуванні, транспортній техніці, авіації, суднобудуванні та енергетиці зумовлене прагненням знизити масу конструкцій без втрати міцності. Густина алюмінію становить лише $2,65 \text{ г/см}^3$ - майже втричі менше, ніж сталі, а питомий модуль міцності сплавів систем Al-Mg дозволяє створювати тонкостінні, легкі, але жорсткі конструкції.

Понад 80 % конструкцій з алюмінієвих сплавів у машинобудуванні виконують зварними, тому зварюваність визначає технологічну ефективність їх використання. Проте алюміній належить до матеріалів зі зниженою зварюваністю, оскільки поєднує ряд фізико-хімічних особливостей, які ускладнюють процес:

Висока теплопровідність (у 4...5 разів вища, ніж у сталі) призводить до швидкого розсіювання тепла з дуги, що ускладнює стабільне формування ванни.

Низька температура плавлення (близько $660 \text{ }^\circ\text{C}$) у поєднанні з високою теплопровідністю створює вузьке «вікно стабільності» температур.

Інтенсивне окиснення – поверхня миттєво вкривається плівкою Al_2O_3 із температурою плавлення близько $2050 \text{ }^\circ\text{C}$, яка перешкоджає злиттю металу.

Схильність до пороутворення через високу розчинність водню в розплавленому алюмінії.

Великий коефіцієнт лінійного розширення, що підсилює деформації та залишкові напруження.

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ці властивості обумовлюють необхідність застосування спеціалізованих способів зварювання, захисних газів і ретельного контролю теплових режимів [1...3].

1.1.1. Класифікація алюмінієвих сплавів і зварюваність

Для потреб машинобудування алюмінієві сплави поділяють на деформівні (серії 1xxx-8xxx за EN/AA) та ливарні (серії 2xx.x-7xx.x). У зварювальних конструкціях найчастіше використовують деформівні Al-Mg сплави (серія 5xxx) та Al-Mg-Si сплави (серія 6xxx).

Al-Mg (5xxx) - неміцнозміцнювані, зміцнюються холодною деформацією; відзначаються високою пластичністю, корозійною стійкістю та доброю зварюваністю.

Al-Mg-Si (6xxx) - термічно зміцнювані, схильні до розтріскування при перегріві, зварюваність нижча.

Серед Al-Mg сплавів особливо поширені AMg4,5, AMg5, AMg6, аналогічні європейським EN AW-5052, EN AW-5056, EN AW-5083, американській AA5056, японській 5056 [1, 5]. Сплав AMg5 поєднує достатню міцність (σ_B близько 280...320 МПа), корозійну стійкість і технологічність, тому його застосовують для зварних корпусних деталей, баків, трубопроводів, елементів кузовів, морських і транспортних конструкцій.

Магнієві сплави (на основі Mg) також застосовують у машинобудуванні, однак вони більш реакційні, мають нижчу температуру плавлення (близько 640 °C) і потребують інертного середовища з гелієм або аргоном підвищеної чистоти. Тому в цій роботі розглядається саме алюмінієвий сплав AMg5, як конструкційний матеріал із кращою технологічною стабільністю при TIG-зварюванні.

1.1.2. Методи зварювання алюмінієвих сплавів

Вибір способу зварювання залежить від товщини виробу, умов експлуатації та вимог до шва.

Основні процеси:

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

TIG (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) – аргонодугове зварювання неплавким вольфрамовим електродом у середовищі інертного газу. Дає найчистіші шви, застосовується для товщин 1...6 мм, забезпечує повний контроль теплового внеску.

MIG (Gas Metal Arc Welding, GMAW) – дугове зварювання плавким дротом у середовищі аргону чи сумішей аргону та гелію. Продуктивніше, використовується для товщин понад 3 мм.

Лазерне зварювання – забезпечує високу концентрацію енергії, малу зону термічного впливу, мінімальні деформації. Недоліки – складність та вартість.

Фрикційне зварювання (FSW) – твердотільний процес, що виключає плавлення, забезпечує найкращі механічні властивості, але потребує спеціального обладнання [7].

Електронно-променеве та плазмове зварювання – для високоточних конструкцій у вакуумі або контрольованому середовищі.

Для більшості машинобудівних деталей середньої товщини (3...5 мм) найраціональнішим є TIG-зварювання, оскільки воно поєднує чистоту, контроль і універсальність.

1.1.3. Особливості процесу TIG-зварювання

Процес TIG (GTAW) полягає в утворенні електричної дуги між вольфрамовим електродом і виробом у середовищі інертного газу – аргону або суміші аргону та гелію. Джерело живлення – постійного струму прямої полярності (DCEN) для алюмінієвих сплавів, або змінного струму (AC) з катодним очищенням для руйнування оксидної плівки [2, 9].

Переваги TIG-зварювання:

- відсутність бризок і шлаку;
- точне регулювання параметрів дуги;
- висока якість поверхні шва;
- можливість зварювання у будь-якому положенні;
- мінімальні деформації через контрольований тепловий внесок.

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Недоліки TIG-зварювання – менша продуктивність порівняно з MIG, чутливість до чистоти поверхні та витратного газу.

Під час TIG-процесу виділяють три основні фази:

Підготовка поверхні (знежирення, механічне або хімічне очищення від Al_2O_3).

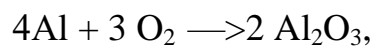
Формування дуги та стабілізація ванни.

Кристалізація металу шва з формуванням дендритної структури та зонт термічного впливу (ЗТВ).

Фізико-хімічні процеси під час зварювання

У розплавленому стані алюміній надзвичайно активний: взаємодіє з киснем, воднем, азотом. Внаслідок цього відбуваються:

Окиснення:



утворює тугу оксидну плівку.

Поглинання водню:



При кристалізації надлишок H_2 утворює пори.

Розчинення магнію в алюмінії: Mg стабілізує твердий розчин і зменшує схильність до корозії, але при перегріві утворює фазу β ($AlMg_2$), що знижує пластичність [2, 5].

Швидкість кристалізації та охолодження визначають розмір зерна. Високий тепловідвід алюмінію формує дрібнодендритну структуру при короткій дузі й помірному тепловому внеску (400...700 Дж/см).

Мікроструктурні особливості зварних з'єднань $Al-Mg$.

Метал шва при TIG-зварюванні має зональну будову:

Зона плавлення (метал шва) складається з дендритів $\alpha-Al$ із твердим розчином Mg . На межах зерен можливі виділення β -фази.

Зона термічного впливу (ЗТВ) – область без плавлення, де відбувається рекристалізація та коагуляція зміцнювальних частинок.

Основний метал – зберігає прокатну структуру та залишкові напруження.

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Залежно від швидкості охолодження структура може бути дрібнозернистою (при малому Q) або грубозернистою (при великому Q). Згідно з дослідженнями Kou [2] та Totten [5], оптимальна структура досягається при середніх швидкостях зварювання (20...25 см/хв), коли формується рівноважна дендритна структура з мінімальними напруженнями.

Схема експериментальної установки для випробування за різних режимів зварювання наведена на рисунку 1.1.

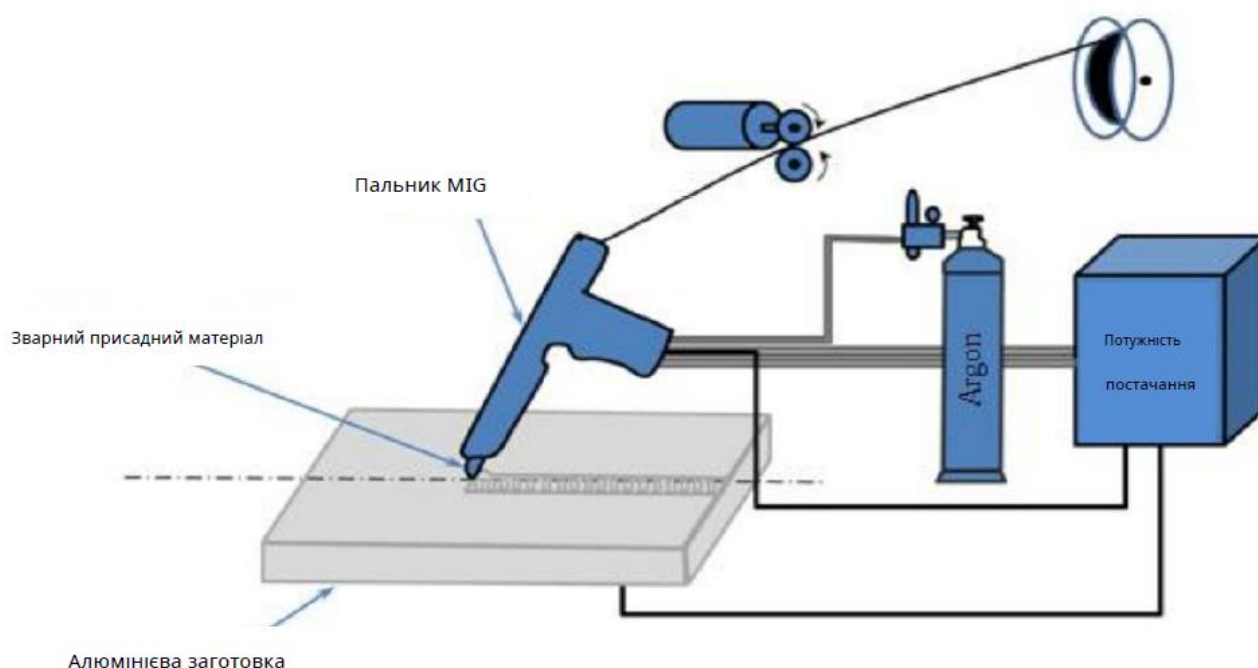


Рисунок 1.1 – Схема експериментальної установки [13]

1.1.4. Вплив хімічного складу сплаву на зварюваність

Сплави Al-Mg містять від 2 до 6 % Mg, що визначає баланс між міцністю й пластичністю. Магній підвищує міцність і корозійну стійкість, але збільшує схильність до гарячих тріщин при вмісті понад 6 %. Додавання *Mn*, *Cr*, *Ti* сприяє подрібненню зерна та стабілізації структури. У сплаві АМг5 оптимальний вміст магнію (близько 5 %) забезпечує високу зварюваність без надмірної схильності до тріщин [1,5].

Важливим чинником є вибір зварювального дроту. Для АМг5 використовують дроти марок AlMg4,5Mn або AlMg5, які забезпечують близький склад і запобігають утворенню евтектик на межах зерен.

						MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			15

1.1.5. Роль захисного газу

Захисний газ запобігає контакту розплаву з атмосферою. Аргон – найпоширеніший газ, оскільки інертний, важчий за повітря та утворює щільну захисну «ковдру» над ванною. Додавання гелію (до 50 %) підвищує температуру дуги на близько 200...300 °С, збільшує глибину проплавлення та покращує формування шва при товстих секціях [1, 11].

Чистота газу є критичною: навіть 0,1 % вологи чи кисню різко підвищує пористість. Для промислових установок рекомендовано використовувати аргон чистоти не нижче 99,99 %. Згідно з дослідженнями Matsuda та Nakata [9], оптимальна витрата для ручного TIG-зварювання алюмінію становить 8...12 л/хв; збільшення понад 15 л/хв не покращує якість, а лише створює турбулентність потоку.

Порівняльна характеристика методів TIG і MIG наведена в таблиці 1.1.

Отже, TIG-процес оптимальний для лабораторних і малосерійних умов, де першочерговою є якість, а не швидкість.

1.1.6. Проблеми і виклики зварювання Al-Mg сплавів

Незважаючи на розвиток технологій, залишається низка проблем:

- оксидна плівка Al_2O_3 – потребує ретельного очищення перед кожним проходом;
- пористість – головна причина браку, особливо при недостатньо сухому газі;
- гарячі тріщини - характерні при надмірному тепловому внеску;
- деформації та залишкові напруження - через великий коефіцієнт розширення;
- зниження міцності у ЗТВ - через рекристалізацію та укрупнення зерна.

Сучасні дослідження спрямовані на моделювання теплових полів і

розроблення оптимальних режимів, що дозволяють мінімізувати ці ефекти [2...5, 9].

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика методів TIG і MIG

Параметр	TIG	MIG
Електрод	Неплавкий (вольфрам)	Плавкий (дріт AlMg)
Джерело живлення	DC або AC	DC
Діапазон товщин	0,5...6 мм	2...12 мм
Якість шва	Вища (чистий, гладкий)	Висока, але з більшими деформаціями
Продуктивність	Низька	Висока
Контроль тепла	Точний	Менш точний
Застосування	Тонкі листи, герметичні баки, трубопроводи	Масивні корпуси, профілі, балки

1.1.7. Використання зварних конструкцій з алюмінієвих сплавів у машинобудуванні

Транспортне машинобудування

У легкових і вантажних автомобілях алюмінієві зварні елементи знижують масу кузова на 30...40 %, що веде до зменшення витрат пального та викидів CO₂. Зварні сплави AlMg5 застосовують для панелей кузовів, порогів, багажних відсіків, підрамників.

1.1.8. Авіа- та космічна техніка

В авіаційній галузі зварні сплави Al-Mg використовують у паливних баках, елементах фюзеляжу, підвісках. TIG-процес забезпечує герметичність та відсутність оксидних включень при мінімальній зоні термічного впливу [1,5].

1.1.9. Суднобудування

Зварні панелі зі сплаву AlMg5 використовуються в корпусах швидкісних катерів, понтонів, надбудов, оскільки матеріал має високу стійкість до морської води та не потребує додаткового покриття [4, 6].

1.1.10. Енергетичне та хімічне машинобудування

Зварні баки, теплообмінники та трубопроводи зі сплавів Al-Mg експлуатуються у середовищах з агресивними розчинами (NaCl, H₂SO₄ у низьких

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

концентраціях). TIG-зварювання забезпечує герметичність та мінімальні деформації.

1.1.11 Сучасні тенденції розвитку

Розвиток технологій зварювання алюмінієвих і магнієвих сплавів у XXI столітті відбувається в напрямках цифровізації, автоматизації та підвищення енергоефективності. Провідні виробники зварювального обладнання (Fronius, ESAB, Lincoln Electric, Panasonic, Kemppi, Siemens) активно впроваджують системи інтелектуального керування процесом TIG, які дозволяють підтримувати стабільність дуги, контролювати тепловий внесок та мінімізувати людський фактор.

Однією з ключових тенденцій є використання цифрових інверторних джерел живлення з мікропроцесорним керуванням. Такі системи дають змогу в реальному часі регулювати форму струму, баланс полярності, частоту змінного струму (AC), а також відстежувати динаміку дуги через зворотний зв'язок за струмом і напругою [2, 4]. Це підвищує стабільність дуги, покращує якість шва та зменшує енергоспоживання.

1.1.11.1. Автоматизація та роботизація процесів

Сучасне машинобудування переходить від ручного до автоматизованого і роботизованого зварювання. У промислових умовах дедалі ширше використовуються роботизовані TIG-комплекси з адаптивним керуванням і сенсорним зворотним зв'язком, які дозволяють зварювати складні алюмінієві конструкції з високою повторюваністю параметрів. Системи керування на базі Siemens SIMATIC S7, Beckhoff CX, або Fanuc Robot Controller забезпечують автоматичне регулювання подачі дроту, позиціонування пальника, контроль температури ванни за допомогою інфрачервоних датчиків [14].

Такі рішення інтегруються у концепцію «Industry 4.0», де процес зварювання є частиною цифрового виробничого ланцюга. Це дозволяє не лише оптимізувати час і собівартість, а й проводити аналітику ефективності (OEE - Overall Equipment Effectiveness) [14].

1.1.11.2. Сенсорика та адаптивне керування

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Удосконалення процесу TIG неможливе без систем моніторингу дуги, температури та формування ванни. Сучасні установки оснащують:

- оптичними та ПЧ-датчиками, що контролюють температуру розплаву (1200...1600 °C);
- камерами високої швидкості, які фіксують динаміку краплеутворення;
- електронними блоками зворотного зв'язку, що автоматично регулюють струм і напругу залежно від товщини деталі.

У перспективі розвиваються системи нейромережевого керування, де на основі масивів даних (температура, яскравість дуги, швидкість охолодження) штучний інтелект коригує параметри процесу у реальному часі. Такі підходи вже досліджуються в університетах Японії (Osaka University, Tokyo Institute of Technology) [6, 9].

1.1.11.3. Енергоефективність і сталість процесу

Зростає увага до енергоефективності TIG-зварювання. Використання імпульсного режиму (pulsed TIG) дає змогу зменшити середній тепловий внесок на 20...30 %, що скорочує ширину зони термічного впливу, покращує структуру та знижує деформації [2, 4]. Імпульсна подача енергії сприяє рівномірній кристалізації й зменшує утворення гарячих тріщин, особливо у сплавах з високим вмістом Mg.

Крім того, активно розвиваються гібридні технології, які поєднують TIG із лазерним або плазмовим процесом. Гібридна дуга забезпечує більшу глибину проплавлення при меншій енергії на одиницю довжини, що є перспективним для товстостінних деталей (6... 10 мм).

1.1.11.4. Моделювання та цифрові двійники процесів

Сучасні дослідження спрямовані на моделювання теплових полів і чисельне прогнозування структури шва. За допомогою програмних комплексів ANSYS Fluent, Simufact Welding, SYSWELD моделюють динаміку температурних полів, швидкість охолодження, напруження та деформації в зварній конструкції. Ці цифрові моделі (digital twins) дозволяють оптимізувати

						MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
							19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

параметри TIG-зварювання ще на етапі проектування виробу, що зменшує кількість експериментів і підвищує якість виробництва [5, 9].

1.1.11.5 Використання легких сплавів у «зеленій» промисловості

Окремою тенденцією є перехід до екологічно сталого машинобудування. Алюмінієві сплави, зокрема АМг5, мають 100 % переробність, тому використання зварних конструкцій із них підтримує концепцію Circular Economy - циклічного виробництва з мінімальним відходом матеріалів [1, 4]. Сучасні технології TIG-зварювання дають змогу з'єднувати алюміній з іншими легкими сплавами (Mg, Ti, сталі) у гібридних структурах для електромобілів, залізничних вагонів та суден нового покоління.

Таким чином, сучасні тенденції у зварюванні алюмінієвих і магнієвих сплавів характеризуються інтеграцією цифрових технологій, автоматизації, адаптивного керування та моделювання, що суттєво розширює можливості процесу TIG. Його розвиток орієнтований не лише на покращення якості швів, а й на створення «розумних зварювальних систем», які здатні самостійно підтримувати оптимальний режим у змінних умовах виробництва, мінімізуючи відхилення і втрати [2...6, 9, 14].

1.2. Фізико-металургійна характеристика сплаву АМг5

Сплав АМг5 ($AlMg_5$) належить до деформівних не термічно зміцнених сплавів системи Al-Mg [1]. Його перевага - комбінація пластичності, в'язкості та корозійної стійкості. Хімічний склад (мас.%): Al – основа; Mg – 4,8...5,8%; Mn – 0,4...0,8%; Fe не більше 0,4%; Si не більше 0,3%; Cu не більше 0,1%; Ti не більше 0,15%. Магній розчиняється в алюмінії, утворюючи твердий розчин $\alpha-Al(Mg)$, що зміцнює сплав механізмом твердорозчинного зміцнення [5].

Утворення вторинної β -фази (A_3Mg_2) при перегріві або тривалому відпалі негативно впливає на корозійну стійкість, тому зварювання вимагає мінімізації перегріву [2, 5]. Температура плавлення сплаву 590...640 °C; теплопровідність

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

близько 140 Вт/(м·К), що зумовлює швидке відведення тепла із зони дуги та потребує точного регулювання енергії.

Механічні властивості основного металу: σ_B близько 270...310 МПа, $\sigma_{0.2}$ близько 130...160 МПа, δ близько 12...16 %, HV близько 80...90. Після зварювання у зоні шва та ЗТВ ці показники зменшуються на 15...30 % через коагуляцію твердорозчинних фаз і перегрів структури [6].

Зварюваність АМг5 оцінюється як добра, але існує схильність до утворення пористості, окиснення та гарячих тріщин у результаті сегрегації Mg на межах зерен [3, 6, 7]. Зниження пористості досягається використанням високочистого аргону (99,99 %), осушеного дроту та попереднього підігріву до 100...150 °С [4].

1.3. Вплив технологічних параметрів на формування зварного шва

Формування якісного зварного шва зі сплаву АМг5 у процесі аргонодугового зварювання ТІГ визначається складною взаємодією термічних, фізико-хімічних і металургійних чинників. Зварна ванна, утворена дугою між вольфрамовим електродом і поверхнею металу, є зоною інтенсивного тепло- і масообміну, де будь-яка зміна режимних параметрів миттєво відбивається на структурі та властивостях металу шва.

Основними технологічними параметрами процесу ТІГ-зварювання є сила зварювального струму (I), напруга дуги (U), швидкість переміщення пальника (v), витрата захисного газу (G), кут нахилу електрода та відстань між електродом і поверхнею металу. Взаємозв'язок цих параметрів визначає тепловий внесок Q, який задає інтенсивність нагрівання й охолодження зони зварювання, а отже - розмір зерна, форму кристалітів, ширину зони термічного впливу (ЗТВ) і ступінь розчинення легуючих елементів.

У найзагальнішому вигляді тепловий внесок обчислюють за співвідношенням:

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Q = \frac{V \cdot I \cdot 60}{v} \text{ (J/sm)},$$

де Q – тепловий внесок, Дж/см;

V – напруга, В;

I – сила струму, А;

v – швидкість, см/хв.

1.3.1. Вплив сили струму. Сила зварювального струму безпосередньо визначає глибину проплавлення і температуру зварювальної ванни. Для зварювання листів товщиною 3...5 мм зі сплаву АМг5 зазвичай застосовують 100... 150 А при постійному струмі прямої полярності (DCEN) [2, 9]. При струмах нижче 90 А спостерігається недостатнє проплавлення й непровари, а при перевищенні 160...180 А – надмірне розплавлення та прожоги. Зі зростанням струму збільшується швидкість циркуляції розплаву, утворюється глибша ванна з більшою температурною градієнтністю, що сприяє розвитку стовпчастої кристалізації у напрямку тепловідведення.

У той самий час високий струм збільшує об'єм металу, що перегрівається, і провокує ріст зерна у ЗТВ, зниження ударної в'язкості та появу міжкристалітних тріщин. Тому для стабільного процесу зварювання важливо дотримуватися оптимального співвідношення між струмом і швидкістю, яке забезпечує рівноважний тепловий баланс і контрольовану форму шва [3, 8].

1.3.2. Вплив напруги дуги

Напруга дуги визначає довжину дугового проміжку і впливає на форму та ширину шва. При короткій дузі (12... 14 В) енергія концентрується у вузькій зоні, шов стає глибоким і вузьким. При збільшенні напруги до 18...20 В дуга розширюється, тепловий вплив розподіляється ширше, а валик шва вирівнюється. Надмірна напруга призводить до розбризкування, утворення підрізів і нестабільності дуги.

						MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
							22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Таким чином, оптимальна напруга для АМг5 у діапазоні 14...18 В забезпечує стабільність процесу, рівномірне проплавлення та формування плавного валика шва [4, 8].

1.3.3. Вплив швидкості зварювання

Швидкість переміщення пальника визначає час дії теплового потоку на матеріал.

При надто низькій швидкості (менше 15 см/хв) ванна перегрівається, підвищується ширина ЗТВ і зростає ризик утворення гарячих тріщин через зниження в'язкості металу в процесі кристалізації. При надто високій швидкості (понад 30 см/хв) не забезпечується повне злиття шва з основним металом, з'являються непровари.

За даними Коу [2], з підвищенням швидкості до 25 см/хв зменшується тепловий внесок, і у металі шва формується дрібнозерниста структура з високою дисперсією дендритів, що підвищує пластичність з'єднання.

1.3.4. Вплив витрати захисного газу

Аргон виконує функцію захисного середовища, запобігаючи контакту розплаву з атмосферою. Недостатня витрата (менше 6 л/хв) спричиняє окиснення та пористість, тоді як надлишкова (більше 15 л/хв) може викликати турбулентні потоки, що засмоктують повітря в зону зварювання. Оптимальною вважається витрата 8... 12 л/хв, яка забезпечує ламінарний потік і чисту поверхню шва [9]. Додавання до аргону гелію (25...50 %) підвищує температуру дуги й сприяє кращому проплавленню товстих секцій (до 8 мм), як зазначено в роботі Davis [1, 11].

1.3.5. Вплив діаметра та форми електрода

Діаметр електрода (1,6...2,4 мм) і форма загострення визначають стабільність дуги. Малий діаметр і гостре загострення сприяють концентрованій дузі, тоді як тупий кінець дає ширшу дугу з меншою густиною струму. Для АМг5 оптимальний кут загострення – 60...70°, що забезпечує стабільність дуги й рівномірне розплавлення поверхні.

1.3.6. Тепловий цикл і формування структури

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У процесі TIG-зварювання сплавів Al-Mg формується три зони:

– метал шва, де кристалізація відбувається у напрямку тепловідведення, формуючи стовпчасті зерна, що переходять у рівнозернисту структуру біля центру шва;

– зона термічного впливу (ЗТВ), англійською Heat-Affected Zone (HAZ) – область перегріву без розплавлення, де відбувається рекристалізація та розчинення частинок β -AlMg₂;

– основний метал, який зберігає вихідну структуру після прокатки.

Швидкість охолодження визначає розмір зерна: при швидкому охолодженні (низький тепловий внесок, висока швидкість) структура дрібна, при повільному – формується грубозерниста кристалічна решітка з внутрішніми напруженнями [2, 5].

1.4. Типові дефекти та методи контролю якості зварних з'єднань

Навіть при дотриманні оптимальних режимів TIG-зварювання алюмінієвих сплавів можливе виникнення різних металургійних і

технологічних дефектів, які знижують механічну міцність та герметичність з'єднання. Їх природа тісно пов'язана з особливостями хімічного складу Al-Mg систем і термодинамікою процесів у рідкому металі.

1.4.1. Пористість

Пористість є одним із найхарактерніших дефектів при зварюванні алюмінієвих сплавів. Вона зумовлена виділенням водню, який легко розчиняється у рідкому алюмінії, але має надзвичайно низьку розчинність у твердому стані. Під час кристалізації надлишковий водень не встигає дифундувати та утворює газові включення [3,6]. Джерела водню – залишкова волога на поверхні, органічні забруднення, повітря, волога в зварювальному дроті або газі. Зменшення пористості досягається:

- ретельним знежиренням і сушінням поверхні;
- використанням високочистого аргону (99,99 %);

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- попереднім підігрівом заготовки до 100...150 °С [5];
- стабілізацією дуги на короткій довжині.

1.4.2. Гарячі тріщини

Гарячі тріщини виникають у процесі кристалізації металу шва через усадкові деформації та сегрегацію магнієвих фаз. Високий уміст Mg (понад 5 %) підвищує схильність до таких тріщин, особливо у сплавах без Mn. Утворення фаз AlMg₂ знижує пластичність у температурному інтервалі 200...400 °С, де метал стає крихким [3, 6]. Запобігають тріщинам шляхом вибору зварювального дроту з меншим вмістом магнію (AlMg_{4,5}Mn), контролем теплового внеску та рівномірного охолодження [4, 6].

1.4.3. Непровари, подрізи та прожоги

Непровари виникають при низькому струмі або надмірній швидкості зварювання. Подрізи формуються при великій нарузі та високій швидкості руху пальника. Прожоги - при надмірному тепловому внеску або затримці дуги на одному місці. Правильний підбір режиму ($I=120...150$ А, $V=16...18$ В, $v=20...25$ см/хв) практично усуває ці дефекти [8, 9].

1.4.4. Оксидні включення

Поверхня алюмінію покрита плівкою Al₂O₃, температура плавлення якої сягає 2050 °С, тобто значно вища за температуру плавлення основного металу. Ця плівка не розчиняється при TIG-зварюванні й може потрапляти у шов, утворюючи тверді включення, що є осередками концентрації напружень [3,4]. Її видаляють механічним очищенням (щіткою, травленням) або електричним катодним очищенням при змінному струмі (АС).

1.4.5. Методи контролю якості

Контроль якості проводять відповідно до міжнародних стандартів EN ISO 17637, EN ISO 5817, EN ISO 9015-1, EN ISO 4136, EN ISO 5173 [12, 13]. Основні методи:

- візуальний і капілярний контроль для виявлення поверхневих дефектів;
- радіографія та ультразвук - для контролю внутрішніх дефектів і пор;

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– металографія (OM, SEM) - для аналізу структури шва, виявлення зон плавлення, дендритних границь;

– мікротвердість HV0.1...HV1 – для оцінки зміцнення або розм'якшення УЗТВ;

Механічні випробування (розтяг, згин) – для порівняння з основним металом [5, 10].

1.5. Сучасні дослідження у галузі

Останні десятиліття характеризуються активним розвитком експериментальних досліджень з оптимізації режимів ТЮ-зварювання алюмінієвих сплавів. Видатний внесок зробили Кой [2], Mathers [4], Lancaster [3], Kim і Sato [6], Matsuda і Nakata [9].

Kou [2] показав, що підвищення швидкості зварювання зменшує глибину проплавлення, але сприяє формуванню дрібнозернистої структури, підвищуючи пластичність. Mathers [4] встановив, що оптимальний тепловий внесок забезпечує рівномірне формування шва без пористості. Lancaster [3] у фундаментальній монографії «Metallurgy of Welding» описав вплив теплового циклу на фазові перетворення в Al-Mg системах, зазначивши, що β -фаза ($AlMg_2$) є критичною для корозійної стійкості з'єднання. Kit і Sato [6] виявили, що при швидкості понад 25 см/хв розмір зерна в шві зменшується удвічі, а межа твердість у ЗТВ підвищується на 10... 12 %. Davis [1, 11] рекомендує застосування змішаних газів аргону та гелію для товстих секцій, що покращує проплавлення без підрізів. Totten і Mac Kenzie [5] довели позитивний ефект попереднього підігріву (100... 120 °C), який зменшує напруження й ризик гарячих тріщин. Matsuda і Nakata [9] експериментально визначили, що збільшення витрати аргону понад 15 л/хв не покращує якості, натомість може викликати турбулентність і засмоктування повітря. Zhang і Chen [7] відзначили, що, хоча фрикційне зварювання (FSW) дає кращі механічні властивості, TIG залишається найгнучкішим процесом для ремонту й малосерійного виробництва.

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У Європейському Союзі TIG-зварювання алюмінієвих сплавів регламентується стандартами EN ISO 9606-2, EN ISO 15614-2 і EN ISO 14341 [12, 13], що визначають вимоги до кваліфікації зварників, процедур і витратних матеріалів. У Японії розроблено стандартизовані карти режимів для сплавів серій AlMg і AlMn [9].

Таким чином, світовий досвід підтверджує, що оптимізація параметрів TIG-зварювання дозволяє забезпечити стабільність структури, мінімізувати пористість і підвищити довговічність з'єднання, не змінюючи хімічний склад основного металу.

1.6. Постановка задачі дослідження

Зварювання тонколистової продукції зі сплавів системи Al–Mg (AMg5, аналоги 5xxx) процесом MIG характеризується формуванням зональної неоднорідності WM–HAZ(ЗТВ)–WM, виникненням кристалізаційної структури у металі шва та термічно індукованими змінами підструктури в HAZ(ЗТВ). Для товщини 2 мм технологічне “вікно” є вузьким: з одного боку існує ризик непровару/несплавлення при зниженні енерговкладення, з іншого – ризик пропалу і розширення ЗТВ при його зростанні. Додатковим критичним фактором є пористість, чутлива до стану поверхні та стабільності газового захисту.

У зв'язку з цим виникає необхідність встановити кількісні та якісні закономірності впливу режимних параметрів CV MIG і pulsed MIG на геометрію проплавлення, мікроструктуру WM/HAZ(ЗТВ) та профіль мікротвердості, а також визначити режим, який забезпечує одночасно низьку дефектність і мінімізацію “soft zone”.

Мета дослідження

Встановити закономірності впливу режимних параметрів MIG (CV) та pulsed MIG при зварюванні сплаву AMg5 товщиною 2 мм одним проходом на

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

формування мікроструктури WM і HAZ, розподіл мікротвердості та дефектність з'єднання, і на цій основі обґрунтувати оптимальний режим, що забезпечує повний проплав без критичних дефектів при мінімальній ширині HAZ і soft zone.

Об'єкт дослідження.

Стикові зварні з'єднання сплаву АМг5 товщиною 2 мм, виконані одним проходом методами CV MIG та pulsed MIG.

Предмет дослідження

Залежності між режимними параметрами зварювання (U, I/avg, WFS, v, тип режиму CV/pulsed, параметри імпульсу) та:

- геометрією проплавлення і макродефектами;
- мікроструктурою WM і ЗТВ;
- профілем мікротвердості WM–HAZ–WM (HVmin, ΔHV, ширина soft zone);
- рівнем пористості.

Завдання дослідження

1. Сформувані серію режимів CV MIG і pulsed MIG, що охоплює робочий діапазон теплового впливу для листа 2 мм, та забезпечити порівняння режимів із близькою геометрією проплавлення.

2. Виконати макроаналіз поперечних перерізів для визначення геометрії шва, глибини проплавлення, ширини ЗТВ та наявності критичних дефектів (непровар/пропал).

3. Дослідити мікроструктуру металу шва (WM) з оцінкою кристалізаційної неоднорідності та наявності мікродефектів (пори, оксидні включення).

4. Дослідити мікроструктуру ЗТВ з ідентифікацією зон із найбільш вираженим відпалом деформаційного зміцнення та встановленням її протяжності.

5. Визначити профіль мікротвердості WM–HAZ–WM і кількісні параметри розм'якшення: HVmin у ЗТВ, ΔHV та ширину soft zone; встановити зв'язок цих параметрів із режимом/тепловкладенням.

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. Оцінити пористість (кількісно) та встановити її зв'язок із типом режиму (CV/pulsed) і стабільністю процесу.

Провести інтегральне ранжування режимів за сукупністю критеріїв (відсутність критичних дефектів плюс мінімальна пористість плюс мінімальна ЗТВ/ Δ HV) та сформулювати рекомендації щодо оптимального режиму для алюмінієвого сплаву АМг5 товщиною 2 мм, зварювання за 1 прохід.

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Загальні умови відбору та підготовки зразків

Дослідження зварних швів здійснено у відповідності до ДСТУ EN ISO 17639:2022 «Випробування на руйнування зварних швів металевих матеріалів. Макроскопічне та мікроскопічне дослідження зварних швів» (EN ISO 17639:2022, IDT; ISO 17639:2022, IDT).

Згідно стандарту місце відбору зразка для досліджень – перечний переріз через середину шва (перпендикулярно до напрямку зварювання). Для досліджень приймаємо 3 зразки на режим.

Зразок маркуємо: режим/дата/напрямок прокатки/сторона шва.

Закріплюємо зразок. За потреби заливаємо зразок в епоксидну смолу або запресовуємо, так щоб робоча площа містила:

BM-HAZ-WM,

де *BM* (Base Metal, БМ або ОМ) – основний метал: матеріал деталі поза впливом зварювального нагріву, з вихідною мікроструктурою та властивостями (в даному випадку – сплав АМг5 у стані постачання);

HAZ (Heat-Affected Zone, ЗТВ) – зона термічного впливу: ділянка поблизу шва, яка не плавилась, але сприймала нагрів під час зварювання. В наслідок цього змінюється структура/підструктура (відпал наклепу, рекристалізація тощо) і часто знижується мікротвердість;

WM (Weld Metal, МШ) – метал шва: ділянка, яка плавилась і знову закристалізувалась (суміш розплаву основного металу й присадки). Має кристалізаційну (часто дендритну/коміркову) структуру та може містити пори чи інші дефекти.

Шліфування та полірування проводимо послідовно зменшуючи зернистість шліфувального матеріалу: шліфування - послідовно Р240 → Р400 →

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

P800 → P1200 → P2500 (або еквівалент); полірування 3 μm → 1 μm (Al₂O₃/алмазна паста), фініш – колоїдний SiO₂ (за можливості) для мінімізації деформаційного шару.

Очищення здійснюємо промиванням водою та спиртом, сушку проводимо теплим повітрям. Після полірування мікрошліфи зберігали в ексикаторі з осушувачем (силікагель) для запобігання зволоженню, забрудненню та окисненню поверхні.

Макродослідження на макрошліфі проводимо для дослідження геометрії шва, проплавлення, ЗТВ, виявлення дефектів. Метою є оцінка геометрії валика, глибини проплавлення, симетрії, наявності непровару, несплавлення, пропалу, а також орієнтовної ширину ЗТВ.

Використано оптичний мікроскоп МЕТАМ РВ-23 у режимі малих збільшень (x100); масштабна лінійка.

Процедура (послідовність) проведення металографічних досліджень зварного шва:

1. підготувати поперечний шліф (див. загальну підготовку);
2. зробити фото без травлення (для дефектів на «чистому» шліфі);
3. виконати макротравлення для проявлення меж ЗТВ та лінії плавлення (варіанти для Al-сплавів): коротке травлення в розчині NaOH (помірної концентрації) з наступним «освітленням» у HNO₃ (desmut), або використання спеціалізованого реагенту для Al (за наявності в лабораторії);
4. Зняти серію зображень (з масштабом) по всій товщині 2 мм;
5. Виміряти:
 - ширину валика (face width), форму кореня;
 - глибину проплавлення;
 - наявність або довжину зони несплавлення (якщо є);
 - ширину ЗТВ (визначити, чи вимірюєте «на 1 бік» чи сумарно).

Обробка результатів полягає в заповненні таблиці параметрів геометрії для кожного режиму та фіксації дефектів: «так/ні + характеристика (довжина,

						MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			31

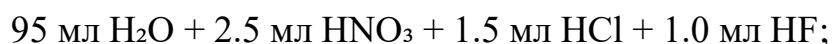
площа)», виготовляють супровідні фото з розмірами та підписами зон WM/ЗТВ/WM.

2.2. Оптична металографія: мікроструктура WM і ЗТВ

Мета оптичної металографії є опис структуру металу шва (комірково-дендритну/кристалізаційну неоднорідність) і структурні зміни в ЗТВ (відпал наклепу, зміна зеренної картини, підструктура).

Травлення (рекомендовано 2 підходи):

– травлення для загального контрасту (структурні межі): реактив Келлера (Keller's) – типовий для Al-сплавів. Типова рецептура:



– електролітичне травлення для зерна (за можливості): реактив Баркера (Barker's) – дає чіткі межі зерен у поляризованому світлі. Не застосовували.

Процедура (послідовність) проведення оптичної металографії:

1. після фінішного полірування виконати травлення;

2. зняти зображення:

– WM (центр шва);

– межа плавлення;

– ЗТВ біля межі плавлення;

– ЗТВ у перехідній зоні;

– WM як еталон;

3. збільшення: 50×, 100×, 200×, 500× (за потреби). Використовувати 100×;

4. для порівняння режимів обов'язково робити знімки в однакових зонах та з однаковими збільшеннями.

Показники/метрики (для напівкількісних випробувань):

– орієнтовна «дрібність» кристалізаційної будови (дендритний крок/комірковий розмір) у WM;

– наявність/відсутність грубих частинок у ЗТВ;

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– якісний опис: «ознаки відпалу/рекристалізації», «однорідність/неоднорідність».

2.3. SEM (PEM) та EDS дослідження

Метою SEM (PEM) та EDS дослідження є підтвердити відносну або кількісну оцінку частинки, сегрегація, локальний склад:

- морфологію інтерметалідних частинок (Al–Mn–Fe типу);
- локальну неоднорідність у WM;
- наявність збагачення Mg/інших елементів у характерних ділянках (за потреби).

Обладнання та налаштування

SEM з BSE/SE режимами; EDS-детектор. Типові напруги прискорення 10...20 кВ.

Процедура (послідовність):

1. використовувати дзеркально відполірований зразок (травлення не обов'язкове для BSE);
2. зняти SE/BSE зображення в WM, ЗТВ і ВМ;
3. вибрати 5...10 характерних частинок/ділянок і виконати EDS:
 - точковий аналіз,
 - лінійний профіль (через межу плавлення або характерну ділянку),
 - елементні карти (за потреби).

Обробка результатів полягає у створенні таблиці складу частинок (мас.% або ат.% – послідовно один формат) та написання коментаря щодо похибок EDS для легких елементів (Mg) та впливу матриці Al.

2.4. Дослідження мікротвердості

Метою є дослідження мікротвердості (HV0.1 або HV0.2) для профіля ВМ–HAZ–WM.

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для отримання профілю мікротвердості і визначення: HV(BM), HVmin у ЗТВ (HAZ), ΔHV , ширини soft zone.

Застосовуване обладнання: мікротвердомір Віккерса; калібрувальна міра; ПЗ для прив'язки координат.

Схема вимірювань (рекомендовано для $t = 2$ мм):

– лінія інденцій (вимірювань) на 0,8...1,0 мм від поверхні (щоб уникнути впливу поверхневих артефактів), поперек шва;

– крок між відбитками: 0,2...0,3 мм (для тонкого листа це дає достатню роздільну здатність ЗТВ);

– мінімум 3...5 відбитків у BM (зона базового матеріалу) з кожного боку, 8...15 через HAZ/WM (залежно від ширини зон).

Процедура (послідовність):

1. підготувати поверхню до дзеркала (без травлення);
2. провести інденції за схемою, фіксуючи координату x (відносно осі шва або межі плавлення);

3. для кожного відбитка записати HV та координату;

4. для повторів – обчислити середнє та стандартне відхилення для ключових параметрів.

Обробка результатів полягає в створенні графіка HV(x).

Обчислення:

– $HV_{BM} = \frac{1}{n} \sum HV_{BM}$ – середнє по BM;

– HV_{min} – мінімум у ЗТВ;

– $\Delta HV = HV_{BM} - HV_{min}$

– ширина soft zone (зона пом'якшення) за критерієм (наприклад, $HV < 0.9 \cdot HV(BM)$).

2.5 Кількісна оцінка пористості (металографічна)

Метою є кількісна оцінка пористості у WM та/або біля межі плавлення і встановити кореляцію з параметрами режиму.

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Використовуємо оптичний мікроскоп або макроскоп із стабільним освітленням; ПЗ для аналізу зображень (ImageJ).

Процедура (послідовність) кількісної оцінки пористості:

1. виконати шліфування/полірування (без травлення або з мінімальним травленням, якщо це покращує контраст);

2. визначити стандартизовану область аналізу, наприклад:

– лише метал шва (WM) на поперечному перерізі;

– або прямокутник фіксованого розміру в центральній частині WM;

3. зняти 3...5 полів зору на однаковому збільшенні (наприклад, 100× або 200×). В нашому випадку 100×;

4. У ПЗ необхідно:

– виконати порогову сегментацію пор (threshold);

– перевірити вручну, що не «підхоплюються» подряпини чи включення;

– порахувати площу пор, кількість пор, еквівалентний діаметр.

Показники кількісної оцінки пористості:

– пористість, % площі:

$$P_A = \frac{\sum A_{\text{пор}}}{A_{\text{зони}}} \cdot 100\%$$
$$P_A = \frac{\sum A_{\text{пор}}}{A_{\text{зони}}} \cdot 100\%$$

– кількість пор на мм²;

– середній/медіанний діаметр (еквівалентний).

Вихід (результат) – порівняльна таблиця пористості по режимах та приклади зображень із маскою пор;

2.6. Фіксація технологічної якості формування (візуальний контроль та протокол режимів)

Мета фіксація – забезпечити відтворюваність та пояснюваність результатів структури/твердості.

Процедура фіксації:

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. візуально оцінити валик: рівномірність, подріз, бризки, колір/ознаки окиснення;

2. протоколювати для кожного режиму:

- WFS, U, I/avg, v;
- CTWD;
- витрату Ar (л/хв);
- підготовку поверхні (знежирення/очистка);
- зазор у стику, прихватки, підкладка (якщо застосована).

Порядок виконання фіксації в роботі:

1. макрошліф (геометрія, ЗТВ, дефекти);
2. ОМ (WM/ЗТВ/ВМ);
3. мікротвердість (HV – профіль);
4. пористість (кількісно);
5. SEM/EDS (за наявності).

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

3.1. Макродослідження зварних з'єднань (макрошліфи)

Макродослідження поперечного перерізу стикового з'єднання зі сплаву АМг5 товщиною 2 мм, виконаного одним проходом, розглядалося як первинний етап оцінювання якості формування шва та технологічної придатності обраних режимів MIG (CV) і pulsed MIG. Для тонколистової заготовки 2 мм геометрія проплавлення є визначальною, оскільки саме вона формує «вікно» технологічної стабільності між двома критичними дефектами: непроваром/несплавленням (за недостатнього енерговкладення) та пропалом (за надлишкового енерговкладення або локального перегріву) Рисунок 3.1.

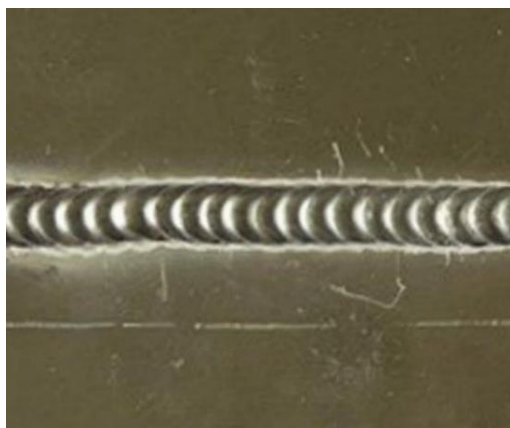
На макрошліфах аналізували форму та розміри валика, симетрію профілю відносно осі стику, глибину проплавлення і стан кореня шва. Для кожного режиму додатково фіксували ознаки порушень формування: локальні перетоншення металу, провисання, підрізи, нерівномірність ширини валика, а також макродефекти у вигляді пор і зон несплавлення. Окрему увагу приділяли співвідношенню ширини металу шва та протяжності зони термічного впливу (ЗТВ), оскільки це співвідношення в подальшому напряму корелює з профілем мікротвердості та зоною локального розм'якшення.

Порівняння режимів CV MIG і pulsed MIG у макроструктурному аспекті виконувалося за принципом технологічної еквівалентності: коректним вважалося порівняння режимів, які забезпечують близьку геометрію проплавлення та схожий профіль валика. У випадках, коли геометрія істотно відрізняється, зміни мікроструктури та мікротвердості можуть бути зумовлені насамперед різницею теплового впливу на одиницю довжини та різною масою/об'ємом наплавленого металу, а не лише різницею між CV і pulsed режимами.

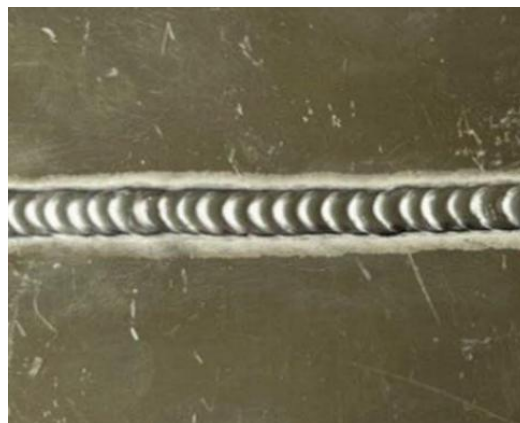
Таким чином, макродослідження дозволило: відсіяти режими з

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк. 37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

очевидними порушеннями формування (ризик непровару або пропалу), визначити режими для подальшого коректного мікроструктурного та мікротвердісного зіставлення, окреслити очікувані тенденції щодо ширини ЗТВ та структурної неоднорідності.



а)



б)

Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд зварного шва з тепловкладенням $Q= 0,4$ (а) та $0,35$ (б) кДж/мм

3.2. Мікроструктура металу шва (WM)

Мікроструктурний аналіз металу шва (WM) був спрямований на встановлення характеру структуроутворення після плавлення та повторної кристалізації, а також на ідентифікацію неоднорідностей, що можуть обумовлювати розкид локальних властивостей. Для алюмінієво-магнієвих сплавів серії 5xxx (аналогом яких є АМг5) типова комірково-дендритна кристалізаційна структура металу шва, яка формується за умов високих градієнтів температури та значних швидкостей кристалізації, характерних для дугового процесу в тонкому листі.

У WM оцінювали морфологію кристалізаційної будови (ступінь вираженості комірково-дендритних елементів, їх орієнтацію та однорідність), наявність зон із різною «дрібністю» (як індикатор локальної зміни умов тепловідведення), а також присутність частинок вторинних фаз/інтерметалідів. У сплавах Al–Mg роль інтерметалідних частинок (переважно системи Al–Mn–

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Fe) важлива з позицій локальної деформаційної поведінки та можливого формування мікроконцентраторів напружень, особливо в поєднанні з пористістю або оксидними включеннями.

Окремим об'єктом уваги в WM була пористість мікрорівня. Її наявність у зварних з'єднаннях алюмінію часто має газову природу й пов'язана з воднем, який може потрапляти у ванну з вологи, забруднень або при порушенні газового захисту. Для тонкого листа 2 мм мікропористість є особливо критичною, оскільки навіть відносно невеликі пори істотно впливають на ефективний переріз і можуть підвищувати чутливість до втомних навантажень. Тому опис структури WM у роботі виконувався в нерозривному зв'язку з фіксацією дефектності та оцінкою її характеру.

3.3. Мікроструктура зони термічного впливу (ЗТВ)

Зона термічного впливу (ЗТВ) у сплаві АМг5 є ключовою з позицій зміни властивостей, оскільки для Al–Mg сплавів міцність значною мірою визначається твердорозчинним і деформаційним зміцненням, тоді як зварювальний термоцикл здатний частково або повністю знімати ефект наклепу. На відміну від термічно зміцнюваних алюмінієвих сплавів, де основним механізмом деградації є розчинення/перерозподіл зміцнювальних виділень, у АМг5 домінує відпал дислокаційної структури та можливий розвиток рекристалізаційних явищ.

У мікроструктурі ЗТВ аналізували перехід від межі плавлення до основного металу, виділяючи підзони з різним рівнем термічного впливу. У найближчій до шва області очікуваними є найбільш інтенсивні структурні зміни: зменшення дислокаційної густини, вирівнювання підструктури, локальна перебудова зеренної картини. Далі, у напрямку основного металу, інтенсивність змін зменшується і структура поступово наближається до вихідного стану.

Важливим елементом обговорення є співвідношення ширини ЗТВ і прогнозованого тепловкладення. За підвищеного теплового впливу (наприклад, при зменшенні швидкості зварювання або при більшій енергії дуги) ЗТВ

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

очікувано розширюється, а структурні зміни стають глибшими. За зниженого тепловкладення (підвищення швидкості та/або застосування pulsed MIG із нижчим середнім струмом при збереженні проплавлення) очікується звуження ЗТВ і менша інтенсивність відпалу наклепу.

Таким чином, мікроструктурне дослідження ЗТВ виступає металознавчою основою для пояснення профілів мікротвердості: місце і глибина мінімуму HV у ЗТВ повинні узгоджуватися з ділянкою найбільш виражених структурних змін.

3.4. Розподіл мікротвердості по перетину (BM–HAZ–WM)

Профіль мікротвердості BM–HAZ–WM застосовано як кількісний критерій оцінки наслідків термічного впливу та структурної неоднорідності зварного з'єднання. Для сплавів типу АМг5 характерним є формування локальної зони розм'якшення у ЗТВ (soft zone), де мікротвердість досягає мінімуму, тоді як основний метал зберігає вищий рівень твердості, визначений вихідним станом деформаційного зміцнення (рисунок 3.2).

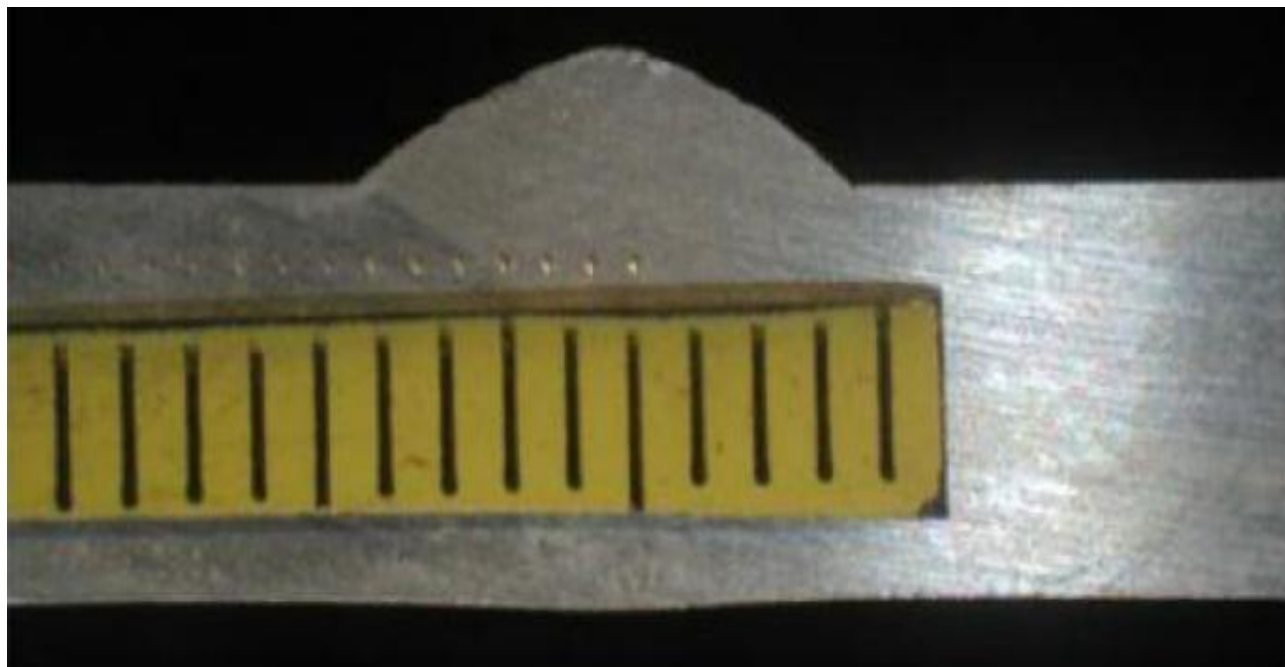


Рисунок 3.2 – Визначення мікротвердості зразка

У межах аналізу профілю HV(x) для кожного режиму визначали: середнє значення твердості основного металу HV(BM), мінімальне значення у HAZ

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

HV_{min}, величину «провалу» $\Delta HV = HV(BM) - HV_{min}$ та ширину soft zone (протяжність ділянки зі зниженим рівнем твердості за обраним критерієм). Додатково оцінювали характер розподілу твердості в WM, зокрема рівень розкиду, який може зростати за наявності пористості або вираженої кристалізаційної неоднорідності.

Металознавча інтерпретація отриманих профілів базується на зв'язку мікротвердості з підструктурним станом: відпал наклепу у ЗТВ призводить до зменшення дислокаційної густини і, відповідно, до зниження твердості. При збільшенні тепловкладення очікується не лише зниження HV_{min}, але й розширення ділянки soft zone. Натомість застосування pulsed MIG за умов зіставного проплавлення здатне зменшити ефективний тепловий вплив (зокрема за рахунок нижчого середнього струму) і сформувати більш «плаский» профіль твердості з меншою ΔHV (Рисунки 3.3 та 3.4).

Для коректності висновків порівняння CV і pulsed режимів доцільно виконувати для зразків із близькою геометрією шва, оскільки різне проплавлення саме по собі змінює термічний цикл і може суттєво вплинути на ширину HAZ та глибину розм'якшення.

Розподіл мікротвердості зразків від підведеного тепла Q

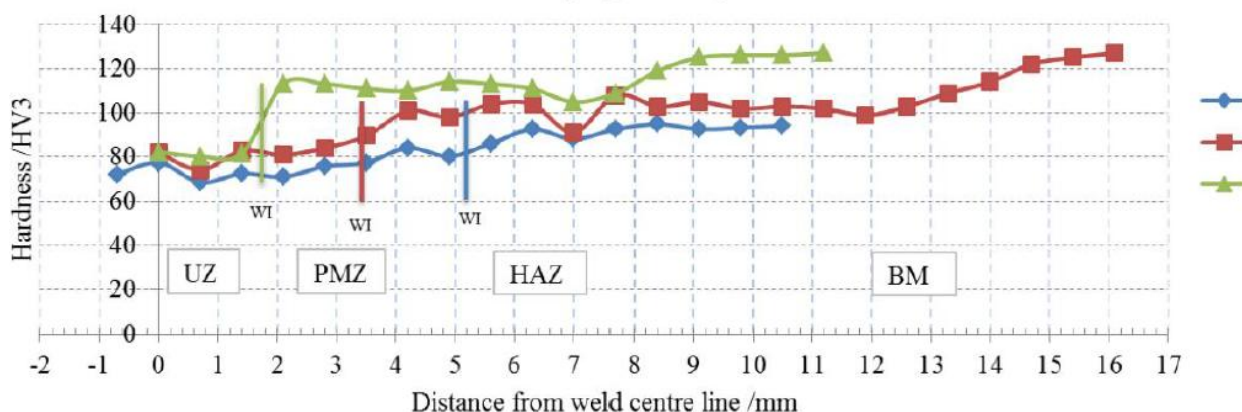


Рисунок 3.3 – Випробування твердості зразків зі змінним підведенням тепла: 1 – 0,106 кДж/мм²; 2 – 0,127 кДж/мм²; 3 – 0,318 кДж/мм²

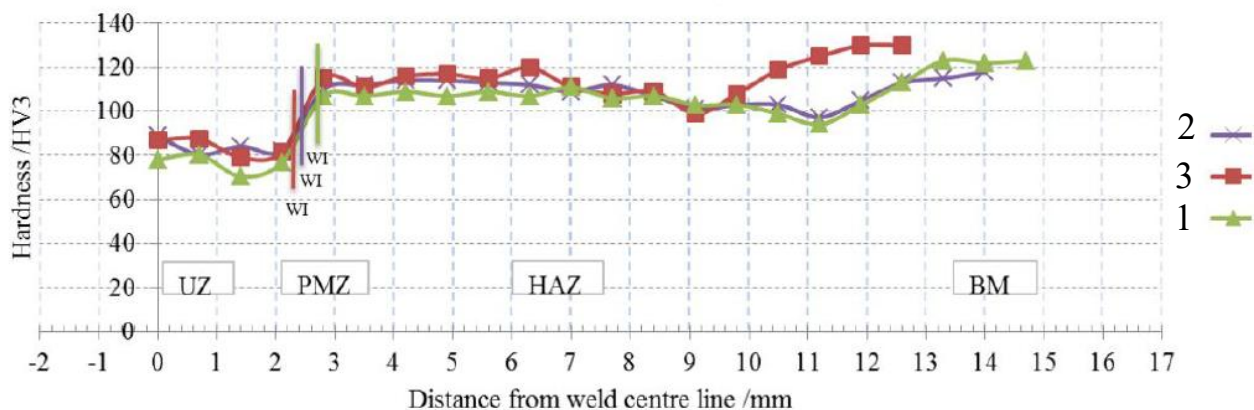


Рисунок 3.4 – Випробування твердості зразків з відносно постійним підведенням тепла Q: 1 – I=200A; 2 – I=190A; 3 – I=180A

3.5. Пористість та інші недосконалості зварного з'єднання

Дефектність зварного з'єднання аналізували з позицій її впливу на якість та прогнозовану працездатність. Для дугового зварювання алюмінію пористість є одним із найтипівіших дефектів і має переважно газову природу. Для тонкого листа 2 мм її значущість підвищується через малий переріз і підвищену чутливість конструкції до локальних концентраторів напружень.

Під час аналізу пористості звертали увагу на: локалізацію пор (центр WM, приосередкова зона, область поблизу межі плавлення), характер пористості (поодинокі крупні пори або дисперсна дрібнопориста структура), узгодженість пористості з режимом формування шва та зі стабільністю процесу. Встановлювали також, чи поєднується пористість з іншими недосконалостями, зокрема з оксидними включеннями або ознаками забруднення, що може свідчити про недостатню підготовку поверхні або порушення газового захисту.

Окремо від пористості принципово важливо розглядати несплавлення/непровар, оскільки цей дефект здатний зумовлювати критичне зниження міцності навіть за відносно прийнятного профілю мікротвердості. Саме тому у роботі дефектність розглядається як рівноправний критерій

оптимізації режимів разом із параметрами мікротвердості: режим, який дає меншу soft zone, але супроводжується непроваром, не може вважатися придатним для практичного застосування.

У порівняльному аспекті pulsed MIG за умови коректних налаштувань і стабільного газового захисту зазвичай забезпечує більш керований перенос металу і потенційно меншу варіативність пористості. Разом з тим, за відхилення технологічної дисципліни (волога/забруднення/протяги/нестабільна подача дроту) пористість може різко зростати незалежно від режиму, що підкреслює необхідність одночасного контролю параметрів процесу та умов підготовки.

3.6. Висновки та рекомендації

Отримані результати доцільно узагальнювати у вигляді причинно-наслідкового ланцюга: режимні параметри (U, I/avg, WFS, v, тип режиму CV/pulsed) → ефективний тепловкладення і стабільність зварювальної ванни → геометрія проплавлення та ширина ЗТВ → структурний стан WM і ЗТВ → профіль мікротвердості (HVmin, ΔHV, soft zone) + дефектність (пористість/несплавлення) → інтегральна оцінка якості з'єднання.

З позицій металознавства визначальними є два конкуруючі фактори. Перший – прагнення зменшити тепловкладення для звуження HAZ і мінімізації soft zone. Другий – необхідність забезпечити достатній проплав без несплавлення і підтримати стабільність ванни та газового захисту для обмеження пористості. У цьому контексті pulsed MIG є перспективним інструментом оптимізації, оскільки дозволяє керувати переносом металу і середнім тепловим впливом, формуючи умови для зменшення ЗТВ при збереженні технологічної надійності процесу на тонкому листі 2 мм.

Порівняльний аналіз режимів зварювання виконано з урахуванням того, що для тонколистової заготовки $t = 2$ мм якість з'єднання визначається не одним показником, а компромісом між: забезпеченням надійного проплавлення без несплавлення/непровару, мінімізацією термічного впливу (HAZ і «soft zone»),

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обмеженням пористості та макро/мікрODEфектів, стабільністю процесу та повторюваністю.

3.6.1. Критерії порівняння режимів

Для оцінювання придатності режимів доцільно застосувати систему критеріїв, у якій дефекти «вирішують долю» режиму, а мікротвердість і ЗТВ – уточнюють оптимальність:

Технологічна придатність формування шва (обов'язковий критерій):

- відсутність несплавлення/непровару;
- відсутність пропалу, провисання кореня, критичного перетоншення;
- стабільна геометрія валика.

Дефектність (обов'язковий критерій):

- мінімальна пористість (за площею/кількістю пор);
- відсутність систематичних скупчень пор на межі плавлення або в корені.

Параметри «м'якої зони» та мікротвердості (оптимізаційний критерій):

- HV_{min} у ЗТВ (чим вище – тим краще);
- $\Delta HV = HV(BM) - HV_{min}$ (чим менше – тим краще);
- ширина soft zone (чим менша – тим краще);
- характер і розкид HV у WM (побічний індикатор неоднорідності та дефектів).

Ширина ЗТВ (оптимізаційний критерій): чим вужча ЗТВ за однакової якості формування, тим менший обсяг металу із «знятим» наклепом, отже – менша ймовірність локалізації деформацій у експлуатації.

3.6.2. Порівняння CV MIG режимів за тепловкладенням і ризиками (t = 2 мм)

Режими CV MIG при варіюванні швидкості та подачі дроту формують типовий компроміс:

- підвищений тепловкладення (умовно «гарячі» режими).

Характеризуються збільшеною шириною ЗТВ та більш вираженим розм'якшенням (нижчий HV_{min} , більша ΔHV). Для товщини 2 мм «гарячий»

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

режим додатково підвищує ризик пропалу і деформацій. Навіть якщо за таких умов іноді знижується ймовірність непровару, металознавча «ціна» у вигляді широкої soft zone та ризику пропалу робить такі режими небажаними як рекомендовані;

- знижений тепловкладення (умовно «холодні» режими).

Забезпечують вузку ЗТВ і менший «провал» твердості, однак стають критично чутливими до центрування пальника, зазору, СТВД і стабільності дуги. Для тонкого листа це часто означає зростання ризику несплавлення/непровару, який є дефектом, що різко знижує працездатність з'єднання незалежно від красивого профілю НВ.

Таким чином, для CV MIG оптимальною є «середня зона» тепловкладення, де забезпечується повний проплав без пропалу, а soft zone залишається прийнятною. Базовий режим (порядку $Q \approx 0.40$ кДж/мм без урахування η) зазвичай лежить ближче саме до цієї «робочої» області, але не гарантує мінімуму HAZ і ΔHV .

3.6.3. Переваги та обмеження pulsed MIG у даній задачі

Pulsed MIG для Al–Mg тонких листів є технологічно привабливим тому, що дозволяє:

- керувати переносом краплі та стабілізувати ванну;
- зменшити середній тепловкладення (через нижчий I_{avg} при пікових значеннях струму), не втрачаючи здатності до проплавлення;
- потенційно звузити ЗТВ і зменшити ΔHV при збереженні прийнятної геометрії шва.

Разом із тим, pulsed MIG не «скасовує» вимог до технологічної дисципліни: при поганій підготовці поверхні або нестабільному газовому захисті пористість може зростати так само, як і в CV MIG. Тому рекомендація pulsed режиму має спиратися на одночасне виконання двох умов: (1) надійний проплав без дефектів, (2) нижчі значення ЗТВ/ ΔHV у порівнянні з CV при подібній геометрії.

3.6.4. Вибір рекомендованого режиму та логіка відбору

Відбір рекомендованого режиму доцільно виконувати в такій

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

послідовності:

Відсіювання за «заборонними» ознаками: будь-який режим із непроваром/несплавленням або пропалом не може бути рекомендованим, незалежно від показників мікротвердості.

Серед придатних – пріоритет режимам із нижчою дефектністю:

режими з мінімальною пористістю мають перевагу, оскільки пори є концентраторами напружень і підвищують розкид властивостей у WM.

Фінальний вибір – за профілем твердості та шириною ЗТВ:

серед режимів без критичних дефектів рекомендованим слід вважати той, який забезпечує:

- вищий HV_{min} у ЗТВ;
- меншу ΔHV ;
- вужчу soft zone,

за умови технологічної стабільності і повторюваності.

З урахуванням встановлених закономірностей і прогнозованих тенденцій, найбільш обґрунтованим кандидатом на рекомендований режим є pulsed MIG із помірно зниженим тепловкладенням (умовно рівень $Q \approx 0.35$ кДж/мм без η , аналог режиму №7 у матриці). Такий режим, як правило, зберігає достатній проплав (на відміну від найбільш «холодних» режимів, де підвищується ризик непровару), але одночасно зменшує ширину ЗТВ і глибину розм'якшення порівняно з базовим CV MIG. Саме це поєднання – «без дефектів + менша soft zone» – є оптимальним для тонколистової конструкції.

3.6.5. Рекомендований режим і практичні зауваги

На підставі порівняльного аналізу рекомендовано як базовий для практичного застосування:

- pulsed MIG із параметрами, що забезпечують стабільний перенос та ефективний тепловкладення нижчий за CV-базу, при цьому контролюючи:
- геометрію проплавлення (щоб уникнути непровару),
- витрату та стабільність подачі Ar,
- чистоту поверхні та мінімізацію джерел водню (волога/забруднення),

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– сталість CTWD і траєкторії ведення пальника.

Якщо технологічні умови не дозволяють стабільно реалізувати pulsed MIG (обмеження обладнання/налаштувань), альтернативою є CV MIG у «середньому» тепловому діапазоні, близькому до базового режиму, але з пріоритетом контролю дефектності та проплавлення (таблиця 3.1). У будь-якому випадку остаточне «підтвердження» рекомендованого режиму повинно спиратися на узгодження трьох блоків результатів: макрошліф (проплавлення/дефекти), мікроструктура (WM/ЗТВ), профіль HV(x).

Таблиця 3.1 – Таблиця режимів

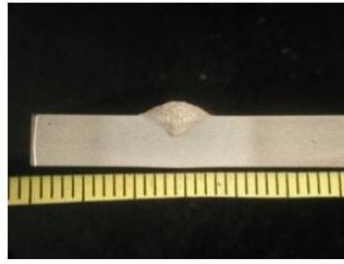
№ режиму	Режим	Q (без η), кДж/мм	Ширина на ЗТВ, мм	HV (ВМ), HV0.1	HVmi n (ЗТВ), HV0.1	ΔHV	Ширина soft zone, мм	HV (WM), HV0.1	Пористість, % площі	Несплавлення/пропали	Примітки
1	CV	0.351	2.6	85	69	16	2.0	77	0.7	ні	“холодніший” CV, менше тепла
2	CV (база)	0.400	3.2	85	65	20	2.6	76	0.6	ні	базовий режим
3	CV	0.451	3.8	85	62	23	3.0	75	0.5	ні/ризик пропалу*	вища подача → вища теплова дія
4	CV	0.500	4.5	85	58	27	3.4	74	0.5	ризик пропалу	для 2 мм верхня межа (Q)
5	CV	0.333	2.4	85	70	15	1.9	77	0.8	ризик непровару	нижче (Q), критична точність ведення
6	Pulsed	0.320	2.2	85	72	13	1.7	79	0.5	ні	Ip/Ib/f умовно; стабільніший перенос
7	Pulse d	0.350	2.5	85	68	17	2.0	80	0.4	ні	“аналог бази” з нижчим (Q)
8	Pulsed	0.283	1.8	85	74	11	1.4	80	0.6	ризик непровару	найнижчий (Q), потрібен контроль проплавлення
9–11	Повтори (CV)	0.400	3.2±0.3	85±2	65±2	20±3	2.6±0.3	76±2	0.6±0.2	ні	очікувана повторюваність

Металографічні дослідження при найвищому тепловкладенні Q=0,5 кДж/мм; 0,35 кДж/мм Pulse та 0,33 кДж/мм наведені на рисунках 3.5...3.7 відповідно.

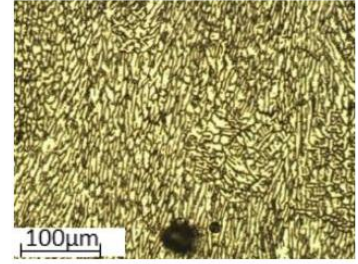
											Арк.
											47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							



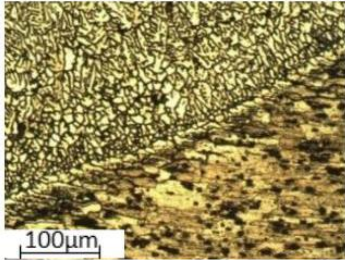
а-III



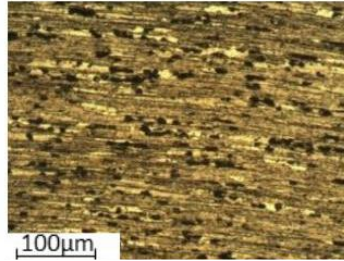
б-III



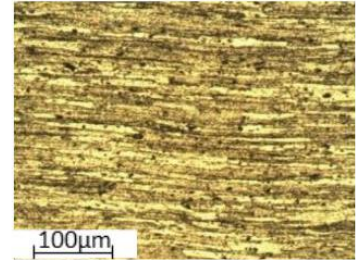
в-III



г-III



д-III



е-III

Рисунок 3.5 – продовження

РОЗДІЛ IV

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

4.1. Нормативна база

Організація безпечних умов праці під час зварювальних і металографічних досліджень (у т.ч. травлення) забезпечується комплексно: вимогами пожежної безпеки, вентиляції/мікроклімату, освітлення та інженерних систем водовідведення. Як базові будівельні норми застосовано:

- ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги»;
- ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування»;
- ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення»;
- ДБН В.2.5-64:2012 «Внутрішній водопровід та каналізація...» (як база для вимог до внутрішніх систем відведення стоків/технічних рідин у будівлях);
- ДБН В.2.5-75:2013 «Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування» (для принципів організації водовідведення на рівні майданчика/підприємства).

Потреби для загальних організаційних положень з охорони праці – ДБН А.3.2-2-2009 «Система організації охорони праці».

4.2. Вимоги безпеки до робочих місць

Робочі місця повинні бути забезпечені загальнообмінною та (за потреби) місцевою витяжною вентиляцією, щоб видаляти аерозолі/пари та підтримувати нормований мікроклімат. Вимоги до проектування вентиляції/ОВК – за ДБН В.2.5-67:2013.

Освітлення робочих зон (зварювальна дільниця, шліфувально-полірувальна зона, місце мікроскопії) має відповідати нормам

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДБН В.2.5-28:2018.

Організація приміщень/евакуаційних шляхів, розміщення первинних засобів пожежогасіння, протипожежні розриви та загальні вимоги пожежної безпеки – за ДБН В.1.1-7:2016.

Для робіт із рідинами/реактивами мають бути передбачені умивальник/водопостачання, а також коректна система внутрішньої каналізації (із запобіганням потрапляння небезпечних реагентів у мережі без попередньої підготовки). Проєктні вимоги до внутрішніх мереж – за ДБН В.2.5-64:2012, а до зовнішніх мереж – за ДБН В.2.5-75:2013.

4.3. Охорони праці під час проведення зварювальних робіт (MIG/CV та pulsed MIG)

4.3.1. Основні небезпечні та шкідливі фактори

УФ/ІЧ-випромінювання дуги; бризки розплавленого металу та шлаку; опіки від нагрітих деталей.

Аерозолі та гази зварювальної ванни (вимога до ефективної вентиляції).

Пожежонебезпека від іскор/бризок та нагріву конструкцій.

Ураження електричним струмом; травмування механізмами подачі дроту/обертівими частинами; підвищений шум.

4.3.2. Організаційні заходи

Допуск до робіт лише працівників, які пройшли інструктаж/навчання та мають відповідну кваліфікацію; ведення журналів інструктажів.

Оформлення дозволу на «вогневі роботи» (за правилами підприємства) при виконанні зварювання поза стаціонарним постом.

Встановлення зварювальних екранів/штор для захисту інших працівників від випромінювання дуги.

4.3.3 Вимоги до робочого місця та вентиляції

Робоче місце повинно бути обладнане місцевим відсмоктувачем або витяжною системою, що забезпечує видалення аерозолів/газів; параметри

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вентиляції проєктуються згідно ДБН В.2.5-67:2013.

Заборонено зварювання у замкнених/погано вентиляльованих об'ємах без спеціально організованого повітрообміну та контролю повітряного середовища.

4.3.4. Засоби індивідуального захисту

Зварювальна маска/щиток із світлофільтром (ДСТУ EN 175-2001. Габаритні розміри світлофільтрів (ДхВхШ) 110x90x3 мм. Ступінь затемнення 8-13 DIN відповідного ступеня затемнення; захисні окуляри (для підготовчих операцій).

Вогнестійкий спецодяг (куртка/штани), рукавиці (краги), закрите взуття, за потреби – нарукавники/фартух (ДСТУ EN ISO 11611:2016 Одяг захисний для використання під час зварювання та суміжних процесів (EN ISO 11611:2015, IDT; ISO 11611:2015, IDT)).

За наявності аерозольного навантаження – респіратор відповідного класу (відповідно до оцінки ризиків на підприємстві).

4.3.5. Електробезпека та технічний стан обладнання

Перевірка справності ізоляції кабелів, заземлення, надійності контактів; недопущення роботи з пошкодженими рукавами/кабелями.

Заборонено виконувати будь-які налаштування апарата під напругою без дозволених процедур виробника/підприємства.

4.3.6. Пожежна безпека

Прибрати горючі матеріали в радіусі можливого розльоту іскор; застосовувати негорючі екрани.

Тримати доступними первинні засоби пожежогасіння; загальні вимоги пожежної безпеки до об'єктів – за ДБН В.1.1-7:2016.

4.3.7. Безпечне поводження з балонами/газом

Балони з аргоном зберігати та експлуатувати вертикально з фіксацією, із захисним ковпаком під час транспортування. Аргон відповідає ДСТУ ГОСТ 10157:2019 (особливої чистоти). Сталеві балони для нього відповідають ГОСТ 949-73, мають сірий колір з написом "Аргон" (зеленим або чорним кольором) і робочий тиск близько 14,7 МПа.

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перевірка редуктора/шлангів на герметичність; заборонено використовувати мастила/жири на кисневій арматурі (якщо на дільниці є кисень).

4.4. Пункти з охорони праці під час травлення зразків хімічними реактивами та їх утилізація

4.4.1. Небезпечні фактори травлення

Корозійна дія кислот/лугів на шкіру та очі, токсичні/подразнювальні пари. Ризик реакцій із виділенням тепла, розбризкування, утворення аерозолів. Забруднення робочих поверхонь та вторинне ураження при контакті із залишками реагентів.

4.4.2. Вимоги до місця виконання робіт

Травлення виконувати в хімічній витяжній шафі або на робочому місці з ефективною місцевою витяжкою; загальні вимоги до вентиляції – ДБН В.2.5-67:2013.

Освітлення зони травлення та мийки – за ДБН В.2.5-28:2018.

На робочому місці обов'язково: доступ до води для промивання, нейтральні мийні засоби, сорбенти/матеріали для локалізації розливів; інженерні системи водопостачання/каналізації – у відповідності до ДБН В.2.5-64:2012.

4.4.3. ЗІЗ та правила поведження з реактивами

Обов'язково: захисні окуляри/щиток, лабораторний халат/фартух, хімістійкі рукавички, закрите взуття.

Реактиви зберігати у підписаній тарі з зазначенням назви, концентрації, дати приготування та відповідального; не допускати зберігання у харчовій тарі.

Приготування розчинів проводити малими порціями; не працювати наодинці; уникати нагрівання/інтенсивного перемішування, якщо це не передбачено затвердженою інструкцією лабораторії.

4.4.4. Утилізація/поведження з відпрацьованими реактивами (принципово)

Заборонено зливати відпрацьовані кислоти/лужні розчини травлення,

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

промивні води з помітним вмістом реагентів або суспензій у побутову/виробничу каналізацію без передбачених процедур підготовки стоків.

Розчини: збирати окремо за типами (кислотні/лужні; з вмістом солей металів; промивні води) у хімічно стійку марковану тару із щільною кришкою; вести облік (дата, орієнтовний склад/походження, об'єм); передавати на централізовану утилізацію/знешкодження згідно з процедурами підприємства та вимогами екологічного законодавства.

Проектні вимоги до систем відведення стічних вод забезпечуються у рамках ДБН В.2.5-64:2012 «Внутрішні мережі» та ДБН В.2.5-75:2013 «Зовнішні мережі».

Забруднені серветки, рукавички, одноразові матеріали після травлення збирати у окремі пакети в контейнерах, марковані як забруднені хімічними речовинами, та утилізувати через відповідного підрядника, який поставив відповідні реактиви чи хімічні сполуки.

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ ТА ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

В атестаційній роботі у визначеному порядку встановлено

1. У зварному з'єднанні сплаву АМг5 (Al–Mg, аналог 5xxx) товщиною 2 мм, виконаному одним проходом MIG, формується зональна неоднорідність типу ВМ–HAZ–WM, де кожна зона характеризується власним механізмом структуроутворення та відповідним рівнем локальних властивостей.

2. Метал шва (WM) формується за механізмом плавлення–кристалізації та характеризується кристалізаційною (комірково-дендритною) структурою, неоднорідність якої (разом із пористістю та оксидними включеннями) є ключовим фактором розкиду локальних властивостей у зоні шва.

3. У зоні термічного впливу (ЗТВ) закономірно формується локальна зона розм'якшення (soft zone), що проявляється мінімумом мікротвердості HVmin. Причиною є відпал деформаційного зміцнення основного металу під дією зварювального термоциклу (зниження дислокаційної густини та перебудова підструктури).

4. Зі зростанням ефективного тепловкладу спостерігається тенденція до збільшення ширини ЗТВ і поглиблення розм'якшення: зменшення HVmin, зростання ΔHV та розширення soft zone. Для товщини 2 мм підвищений тепловклад додатково збільшує ризик пропалу та деформацій.

5. За зменшення ефективного тепловкладу (зокрема, підвищення швидкості зварювання та/або зниження середнього струму) ЗТВ звужується, а “провал” мікротвердості зменшується. Однак надмірне зниження теплового впливу підвищує ризик непровару/несплавлення, що є критичним дефектом для працездатності з'єднання.

6. Пористість у зварних з'єднаннях Al–Mg залишається одним з найбільш імовірних і технологічно чутливих дефектів; її рівень значною мірою визначається якістю підготовки поверхні, стабільністю газового захисту аргоном та стабільністю переносу металу в процесі зварювання.

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В атестаційній роботі показано:

– порівняльний аналіз CV MIG і pulsed MIG свідчить, що pulsed MIG у тонкому листі (2 мм) є більш керованим з позицій переносу металу і теплового впливу, що створює передумови для зменшення ефективного тепловкладу за умови забезпечення потрібного проплавлення;

– за умов зіставної геометрії проплавлення застосування pulsed MIG є більш перспективним для обмеження ширини ЗТВ, зменшення ΔHV і стабілізації профілю мікротвердості ВМ–HAZ–WM, порівняно з базовим режимом CV MIG.

В атестаційній роботі рекомендовано

1. Як оптимальний режим для зварювання АМг5 товщиною 2 мм одним проходом рекомендовано застосовувати pulsed MIG із помірним ефективним тепловкладом (нижчим за базовий CV MIG) за обов'язкової умови: повний проплав без непровару та без ознак пропалу. Такий режим забезпечує найкращий компроміс між технологічною надійністю формування шва, мінімізацією soft zone у ЗТВ та обмеженням дефектності.

2. У випадку відсутності або нестабільності pulsed MIG рекомендовано використовувати CV MIG у середньому тепловому діапазоні, уникаючи крайніх режимів: “гарячих” (ризик пропалу та широка soft zone) і “надто холодних” (ризик непровару/несплавлення).

3. Для відтворюваного забезпечення якості незалежно від режиму (CV/pulsed) обов'язковими є:

– ретельна підготовка поверхні (очищення від оксидів/забруднень і знежирення);

– стабільний газовий захист аргоном із фіксованою витратою;

– сталість СТWD, рівномірність швидкості ведення пальника та стабільна подача дроту;

– контроль геометрії стику (зазор, прихватки) для запобігання локальному перегріву та дефектам проплавлення.

В атестаційній роботі узагальнено вплив режимних параметрів MIG-зварювання (CV та pulsed) на структуроутворення і локальні властивості

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зварного з'єднання сплаву АМг5 товщиною 2 мм. Показано, що ефективний тепловклад визначає ширину ЗТВ і глибину зони розм'якшення (HVmin у ЗТВ) внаслідок відпалу деформаційного зміцнення. Найбільш збалансованим для тонкого листа є застосування pulsed MIG із помірно зниженим тепловкладом за умови забезпечення повного проплавлення та стабільного газового захисту, що дозволяє звужити ЗТВ і зменшити ΔHV без зростання дефектності.

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kou, S. *Welding Metallurgy*, 2nd ed.; Wiley– Interscience: New York, NY, USA, 2003.
2. Davis, J.R. (Ed.). *ASM Handbook, Vol. 6A: Welding Fundamentals and Processes*; ASM International: Materials Park, OH, USA, 2011.
3. Mathers, G. *The Welding of Aluminium and its Alloys*; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2002.
4. Lancaster, J.F. *Metallurgy of Welding*, 6th ed.; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 1999.
5. Totten, G.E.; MacKenzie, D.S. *Handbook of Aluminum, Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2003.
6. Zhang, H.; Chen, J. *Friction Stir Welding of Aluminum Alloys*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2018.
7. Matsuda, F.; Nakata, K. *Welding Processes for Aluminum Alloys*; Japan Welding Society: Tokyo, Japan, 2015.
8. Kim, I.; Sato, Y.S. «Welding of Light Alloys: Advances in Japan.» *Journal of Light Metals*, 2019.
9. Hicks, J.E. *Welded Design: Theory and Practice*, 3rd ed.; Woodhead Publishing: London, UK, 2001.
10. Nakajima, S. *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*; Productivity Press: Portland, OR, USA, 1988.
11. EN ISO 9606 – 2:2017. *Qualification Testing of Welders – Fusion Welding – Part 2: Aluminium and Aluminium Alloys*.
12. EN ISO 6520– 1:2020. *Welding and Allied Processes – Classification of Welding Imperfections – Part 1: Fusion Welding*.
13. P. Kah, M. Olabode, E. Hiltunen, J. Martikainen. *Welding of a 7025 Al-alloy by a pulsed MIG welding process. ISSN 1392 - 1207. MECHANIKA. 2013 Volume 19(1). P. 96-103.*

					MP 0725.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		