

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМ. С.З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: **Дослідження процесу TIG-зварювання міді**

Виконав: студент групи Маш-62

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

Косіков Максим Олегович
(Прізвище та ініціали)

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

Львів-Дубляни 2025

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

Освітній ступінь «Магістр»

Спеціальність 133 - Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
Машинобудування
(назва кафедри)

(підпис)

професор Віталій ВЛАСОВЕЦЬ
(прізвище та ініціали)

“ ____ ” _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу студенту

Косікову Максиму Олеговичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження процесу TIG-зварювання міді

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

затверджені наказом ЛНУП від 28 лютого 2025 року №140/к-с

2. Строк подання студентом роботи до “ ____ ” _____ 20__ року

3. Вихідні дані до работ: довідкова література, характеристики зварювального обладнання та матеріалів, стандарти на виконання процесів зварювання металів, типові технології зварювання виробів з міді, методики розрахунку технологічних параметрів процесу зварювання, методики проведення експериментальних досліджень, методики контролю якості зварних швів та з'єднань, інструкції з охорони праці та інші довідкові джерела.

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

4.1. Аналіз стану питання зварювання міді плавленням; 4.2. Аналіз матеріалів для зварювання міді та її сплавів; 4.3. Аналіз технологій зварювання міді методом TIG; 4.4. Методика та результати експериментальних досліджень: 4.5 Охорона праці; Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу:

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

6. Консультанти розділів роботи

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	Аналіз стану питання зварювання міді плавленням	18.04.25	
2	Аналіз матеріалів для зварювання міді та її сплавів	20.06.25	
3	Аналіз технологій зварювання міді методом TIG	08.08.25	
4	Методика та результати експериментальних досліджень	05.09.25	
5	Охорона праці	31.10.25	
6	Оформлення пояснювальної записки	21.11.25	
7	Оформлення графічної частини	15.12.25	

Студент

(підпис)

Косіков М.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Швець О.П.

(прізвище та ініціали)

Косіков М.О. «Дослідження процесу TIG-зварювання міді». /Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С.З. Гжицького, 2025. 60 с.

Проведено аналіз процесу зварювання міді неплавкими вольфрамовими електродами в середовищі інертного захисного газу (TIG). Розглянуто основні проблеми під час зварювання міді. Проведено аналіз обладнання для TIG-зварювання та технологічних матеріалів, які застосовуються для зварювання міді. Визначено основні параметри, які впливають на ефективність процесу зварювання та якість зварних з'єднань. Підібрано комплект зварювального обладнання, підготовлено дослідні зразки, розроблено методику та проведено дослідження процесу TIG-зварювання. Проведено аналіз якості зварних швів та розроблено рекомендації щодо виконання технологічних операцій. Розглянуто питання охорони праці під час електродугового зварювання.

Табл. 8; рис. 21; бібліогр. джерел 18.

ЗМІСТ

	ВСТУП	6
1	АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ЗВАРЮВАННЯ МІДІ ПЛАВЛЕННЯМ В ТЕОРІЇ І ПРАКТИЦІ	8
1.1	Розвиток зварювання плавленням важких кольорових металів та сплавів	8
1.2	Металургійні особливості зварювання плавленням міді та низьколегованих сплавів на її основі	13
1.3	Зварюваність міді та деяких її сплавів	15
1.4	Вплив домішок та легуючих елементів на утворення тріщин при зварюванні міді	17
2	АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ МІДІ ТА ЇЇ СПЛАВІВ	22
2.1	Дроти для зварювання та наплавлення міді	22
2.2	Покриті електроди для зварювання міді	25
2.3	Зварювальні плавкі флюси та флюси-пасти	26
3	АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ЗВАРЮВАННЯ МІДІ МЕТОДОМ TIG	29
3.1	Особливості TIG-зварювання міді	29
3.2	Вимоги до зварювальних апаратів	33
3.3	Електроди для TIG-зварювання міді	36
3.4	Захисні гази для TIG-зварювання міді	37
3.5	Підготовка міді до зварювання	38
4	МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	39
4.1	Загальна характеристика експериментального обладнання	39
4.2	Методика експериментальних досліджень	43
	Результати експериментальних досліджень	44

5	ОХОРОНА ПРАЦІ	50
5.1	Основні вимоги безпеки праці під час зварювання міді	50
5.2	Моделювання процесу формування і виникнення травмонебезпечної ситуації під час зварювання	52
	ВИСНОВКИ	55
	БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	57

ВСТУП

Мідь та її сплави є важливими матеріалами в багатьох галузях промисловості, зокрема в електротехніці, хімічній промисловості, будівництві та системах охолодження, завдяки їхній високій електро- та теплопровідності, а також корозійній стійкості. Однак зварювання міді, особливо товстостінних виробів, є технологічно складним процесом через високу теплопровідність металу, що вимагає значної енергії зварювальної дуги, та схильність до утворення дефектів, таких як пористість.

Аргонодугове зварювання неплавким електродом (TIG) є одним із найбільш ефективних методів для отримання високоякісних зварних швів без бризок, що особливо важливо для відповідальних конструкцій з міді. Постійне вдосконалення технологічних процесів та режимів TIG-зварювання міді залишається актуальним завданням для забезпечення надійності та довговічності зварних з'єднань, що підтверджує практичну цінність даного дослідження.

Мета дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є дослідження технологічних параметрів та розробка рекомендацій для оптимізації процесу TIG-зварювання міді з метою забезпечення високої якості та механічних властивостей зварних з'єднань.

Основні завдання дослідження:

- провести аналіз літературних джерел та існуючих технологій TIG-зварювання міді;
- проаналізувати особливості застосування різних технологічних матеріалів для зварювання міді;
- дослідити вплив основних параметрів режиму зварювання (сила струму, вид струму, швидкість зварювання, витрата захисного газу) на якість зварного шва;
- експериментально визначити оптимальні режими TIG-зварювання для мідних пластин різної товщини;

- розробити практичні рекомендації щодо застосування TIG-зварювання міді в промислових умовах.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є технологічний процес аргонодугового зварювання неплавким електродом (TIG) міді.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є взаємозв'язок параметрів режиму TIG-зварювання та якісних параметрів зварних з'єднань з міді.

Практичне значення отриманих результатів. Результати роботи можуть бути використані на підприємствах, які займаються виготовленням та ремонтом виробів з міді, для впровадження ефективних та надійних технологій зварювання. Розроблені рекомендації дозволять підвищити якість продукції та знизити кількість дефектів зварних швів.

1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ЗВАРЮВАННЯ МІДІ ПЛАВЛЕННЯМ В ТЕОРІЇ І ПРАКТИЦІ

1.1 Розвиток зварювання плавленням важких кольорових металів та сплавів

Враховуючи особливі теплофізичні властивості міді та деяких її сплавів, як захисне середовище переважно застосування гелію і азоту, а також сумішей на їх основі, що забезпечують більш високий ефективний ККД процесу. Однак необхідно все ж таки враховувати негативний вплив азоту на пористість швів при зварюванні міді та її сплавів. Раніше існувала помилкова думка про інертність азоту по відношенню до міді. Останніми дослідженнями встановлено, що в умовах зварювального процесу можлива абсорбція азоту розплавленим металом, а виділення його при кристалізації зварювальної ванни обумовлює утворення газової пористості. Отримання щільних швів при азотно-дугового зварювання можливе лише при використанні присадних матеріалів, які легують метал нітридоутворюючими елементами.

Таким чином, необхідна якість швів при зварюванні в середовищі захисних газів досягається насамперед правильним вибором присадкового матеріалу. Численними дослідженнями встановлено, що стосовно технічних марок міді та нікелю, а також більшості сплавів на їх основі як присадкові матеріали необхідно використовувати дроти з низьколегованих (для міді та нікелю) або комплекснолегованих (для бронз та ін.) сплавів, які містять активні розкислювачі та нітридоутворюючі елементи: титан, алюміній, кремній, марганець (як для міді, так і для нікелю та їх сплавів), а також бор, фосфор та деякі інші елементи (для мідних сплавів). Однак ці рекомендації не знайшли належного використання у промисловості, оскільки випуск запропонованих нових дротів здійснюється лише в експериментальному порядку та обсяги виробництва їх недостатні. Для зварювання міді та деяких її сплавів в основному ж застосовуються дроти з легуваних сплавів типу МНЖКТ, БрКМц та інші, які дозволяють отримувати шви задовільного якості, проте

теплофізичні властивості металу часто не задовольняють умов експлуатації. Особливо велика потреба відчувається в електродних дротах малого діаметра для зварювання легованих сплавів, переважно бронз. Внаслідок низької деформаційної спроможності цих сплавів виготовлення їх зварювальних дротів становить певні труднощі. Застосовувані в ряді випадків для зварювання цих сплавів порошкові та композитні дроти дозволяють порівняно нескладно отримувати метал будь-якого необхідного складу та задовільної якості.

Новим перспективним напрямком у галузі зварювання кольорових металів є застосування флюсів-паст при зварюванні неплавним електродом. Як показали дослідження, при зварюванні важких кольорових металів флюси-пасти не тільки підвищують проплавну здатність дуги, але і дозволяють істотно покращити якість зварних швів без застосування дротів. За рахунок активного металургійного впливу на зварювальну ванну вони попереджають утворення пор у швах. Нова технологія аргонодугового зварювання з застосуванням флюсів-паст вже освоєно рядом заводів з обробки кольорових металів при укрупненні зварюванням рулонів з міді та її сплавів з метою їх наступної прокатки та є перспективна для інших галузей промисловості.

Однак зварювання в середовищі захисних газів важких кольорових металів, особливо міді, пов'язана з необхідністю застосування попереднього підігріву, а при великих товщинах ще й в процесі зварювання, що суттєво ускладнює процес. Тому на особливу увагу заслуговують нові високоефективні способи та прийоми зварювання в середовищі захисних газів: багатодугове зварювання неплавким електродом; зварювання міді плавким електродом у середовищі азоту зануреною дугою; гелієво-дугове зварювання на форсованих режимах та ін. Ці нові процеси дозволяють суттєво розширити діапазон товщин металу, зварювання яких можливе без підігріву, а також знизити температуру попереднього та супутнього підігріву, підвищити продуктивність зварювальних робіт. Великі резерви збільшення продуктивності має багатодугове зварювання неплавким електродом, що особливо перспективне

для виготовлення зварних труб та інших безперервних процесів виробництва напівфабрикатів із кольорових металів.

У зв'язку з необхідністю виготовлення зварних конструкцій з металу великих товщин і перерізів останніми роками інтенсивно удосконалювалися такі прогресивні технологічні процеси, як електродугове зварювання міді під флюсом, а також створено нові високоефективні способи зварювання міді плавленням – плазмодуговий та електрошлаковий. Основною перевагою цих процесів є можливість отримання високоякісних зварних з'єднань з міді без попереднього та супутнього підігрівів (підігріву в загальноприйнятому поданні цього процесу), що особливо важливо при зварювання металу великих товщин та виготовлення великогабаритних виробів. Початкові теплові умови стабільного процесу при цьому досягаються шляхом поєднання ряду етапів технологічного процесу чи прийомів техніки зварювання. Так, при плазмодуговому зварюванні на початку процесу поєднані етапи наведення зварювальної ванни з необхідним нагріванням виробу нерухомою плазмовою дугою. При електрошлаковому процесі необхідний нагрівання зварних кромок досягається за рахунок послідовного застосування неплавких і плавких електродів. Зварювання цими процесами зазвичай виконують за один прохід або з двох сторін з повним проваром кромок.

Створення спеціальних зварювальних матеріалів: плавленого флюсу марки АН-М13 та дроту БрХТ 0,6-0,5 - для зварювання міді під флюсом, порошкового дроту ПП-БрХТ 12-2 - для плазмодугового зварювання міді та хромової бронзи, легкоплавкого флюсу на фторидній основі марки АН-М10 та інших дозволило успішно вирішити задачу отримання високоякісних зварних з'єднань при автоматичних процесах зварювання.

Зварювання під флюсом успішно застосовується при серійному та масовому виробництві зварних конструкцій відповідального призначення з міді та її сплавів у металургійній промисловості, хімічному апаратобудуванні, суднобудуванні та інших галузях.

Основними перевагами плазмово-дугового зварювання є можливість здійснення значного тепловкладання в зварювані кромки без розплавлення присадного матеріалу, можливість зварювання різних типів з'єднань міді великих товщин без обробки кромок, мінімальний об'єм механічної обробки до зварювання та після неї.

Нова технологія електрошлакового зварювання знайшла застосування для виготовлення зварних заготовок мідних бандажів-кристалізаторів установок безперервного лиття та прокатки катанки з кольорових металів.

З інших механізованих процесів можна відзначити спосіб зварювання міді незахищеною дугою із застосуванням спеціальної комплексно легованого дроту суцільного перерізу Цей процес рекомендовано для зварювання металу завтовшки до 10 мм, причому при товщині понад 6 мм необхідний попередній підігрів. Спосіб зварювання незахищеною дугою знаходить обмежене застосування (у хімапаратобудуванні).

Поряд із механізованими способами зварювання важких кольорових металів та сплавів у промисловості застосовується і ручне зварювання покритими електродами. Цей процес також постійно вдосконалюється з метою підвищення якості зварних з'єднань та забезпечення нових експлуатаційних вимог Для ручного дугового зварювання міді розроблені спеціальні високопродуктивні електроди марки АНЦ-1. Особливістю нових електродів є те, що вони дозволяють зварювати метал завтовшки до 15-20 мм без застосування попереднього підігріву, для металу великих товщин невисокий (до 250-400 °С) підігрів. Електроди мають задовільні зварювально-технологічними властивостями і забезпечують мінімальне легування швів. Коефіцієнт наплавлення електродів складає 20-24 г/Агод. Необхідною умовою отримання якісних швів при використанні нових електродів є дотримання рекомендацій щодо режимів та техніки зварювання [6].

Водночас для важких кольорових металів ще недостатньо використовуються такі сучасні методи зварювання плавленням, як електронно-променева, імпульсно-дугова та деякі інші. Далеко не вичерпані можливості

автоматичного зварювання під флюсом і, як зазначалося, багатодугових процесів. Характерно, що ці процеси поєднує ще одна дуже цінна перевага - добрі санітарно-гігієнічні умови праці. У зв'язку з підвищеною шкідливістю робіт при зварюванні важких кольорових металів і сплавів розвиток перспективних напрямів має вестись з урахуванням вимоги забезпечення нормальних умов праці зварювальників.

Доцільно посилити також дослідження у галузі металургії зварювання важких кольорових металів та сплавів, особливо з вивчення зварюваності технічних марок міді та нікелю, нових марок сплавів, що дасть можливість регламентувати вміст домішок у них, правильно зробити вибір конструкційного матеріалу цієї групи кольорових металів. Недостатньо інтенсивно ведуться дослідження зварювання різноманітних матеріалів. Для зварних конструкцій, які застосовуються у нових галузях сучасної техніки, необхідне всебічне визначення службових характеристик металу швів та зварних з'єднань та комплексна оцінка працездатності та надійності цих виробів.

У зв'язку з розширенням обсягів випуску зварних конструкцій з важких кольорових металів та сплавів необхідна організація серійного виробництва нових високоефективних зварювальних матеріалів: дротів, електродів, флюсів, паст тощо.

Розглядаючи перспективи розвитку зварювання важких кольорових металів і сплавів, слід зазначити, що широке застосування цих металів при серійному та масовому виробництві зварних конструкцій, спеціалізація виробництва ставлять актуальними також завдання подальшої автоматизації зварювальних процесів, підвищення ефективності зварювальних робіт.

1.2 Металургійні особливості зварювання плавленням міді та низьколегованих сплавів на її основі

Актуальне завдання підвищення якості та надійності зварних конструкцій з міді та сплавів на її основі обумовлює необхідність подальшого вивчення питань металургії зварювання міді плавленням та, перш за все, дослідження причин утворення пор і тріщин та дослідження ефективних заходів для їх попередження.

На підставі аналізу літературних та експериментальних даних, а також проведених термодинамічних розрахунків показано, що найбільше ймовірною причиною пористості при зварюванні міді є утворення та виділення з металу зварювальної ванни парів води в результаті взаємодії водню із киснем. Виділення парів води визначає початкову стадію процесу утворення пор - поява газових зародків. Розміри пор та ступінь пористості швів залежать від концентрації водню у зварювальній ванні.

Дослідженнями встановлено також негативний вплив азоту на пористість швів при зварюванні міді. В умовах зварювального процесу можлива абсорбція азоту розплавленим металом, а виділення його під час кристалізації зварювальної ванни зумовлює утворення газових зародків.

Основними металургійними заходами боротьби з пористістю при зварюванні міді, враховуючи зазначені причини її виникнення, є активне розкислення металу зварювальної ванни, зв'язування водню в дузі у нерозчинні в рідкому металі сполуки, а також розведення газової фази з метою зниження парціального тиску водню та легування металу нітридотворюючими елементами для зв'язування азоту. Як приклад показано, що при зварюванні міді під флюсом суттєвий вплив на щільність швів має склад флюсу та спосіб його грануляція. Найкраща стійкість металу швів проти пористості забезпечується при використанні окисленого флюсу сухої грануляції марки АН-М13.

З метою отримання стабільної якості швів при зварюванні міді та хромової бронзи великих товщин як присадочні матеріали рекомендується застосовувати дроти, що містять активні розкислювачі. Наприклад, для зварювання під флюсом розроблена спеціальний електродний дріт марки Бр.ХТ0,6-0,5, для плазмово-дугового зварювання – порошковий дріт марка ПП-Бр.ХТ12-2, для зварювання в середовищі захисних газів використовуються дроти марок МНЖКТ5-1-0,2-0,2 та Бр,КМцЗ-1, а також запропоновані спеціальні дроти з комплексним мікролегуванням такими елементами як РЗМ, Zr, В, Ti.

Для підвищення якості швів при зварюванні неплавким електродом можуть бути рекомендовані активуючі флюси-пасти, які також містять у своєму складі розкислювачі (наприклад, флюс марки АН-М15А).

При створенні покриттів електродів для ручного зварювання міді з метою попередження пористості швів практично використовують весь комплекс металургійних заходів.

Технологічні рекомендації щодо попередження пористості в зварних швах на міді ті ж, що й інших металів. Це, перш за все, обмеження доступу водню та вологи до зони дуги, вибір роду та полярності струму, оптимальних режимів зварювання та ін.

Питання дослідження схильності міді та її сплавів до утворення тріщин при зварюванні також вивчено недостатньо. Тріщини при зварюванні міді є кристалізаційними, про що свідчить міжкристалітний характер руйнування та окислена поверхня зламів швів з тріщинами.

Загальновідомо негативний вплив на зварюваність міді та її сплавів легкоплавких домішок (вісмуту, свинцю, селену, телуру та ін.). Однак дотепер немає єдиної думки щодо механізму впливу цих домішок на утворення кристалізаційних тріщин. Можливо, шкідливий вплив легкоплавких домішок може бути пов'язаний із проявом ефекту адсорбційного зниження пластичності та міцності. Кристалізаційні тріщини утворюються у процесі деформації металу, що знаходиться у твердо-рідкому стані, тому різна адсорбційна

активність рідкої фази має надавати певний вплив на деформаційну здатність кристалізується металу. Підтвердженням цього є результати дослідів з вивчення пластичності міді та деяких її сплавів при високотемпературних випробуваннях на розтяг в контакті з поверхнево-активними елементами.

Для попередження утворення кристалізаційних тріщин при зварюванні міді та її сплавів рекомендується:

- а) обмежувати вміст шкідливих домішок в основному металі та зварювального дроту;
- б) забезпечувати, наскільки це можливо, двофазну структуру металу швів, що знижує негативний вплив легкоплавких домішок на утворення тріщин;
- в) використовувати зварювальні матеріали, леговані добавками, нейтралізують шкідливий вплив домішок.

Враховуючи негативний вплив кисню на зварюваність міді, та особливо на властивості міцності зварних з'єднань, як конструкційного матеріалу для виготовлення зварних конструкцій відповідального призначення необхідно застосовувати мідь, яка не містить більше 0,01% кисню.

1.3. Зварюваність міді та деяких її сплавів

Одним з найпоширеніших дефектів зварних швів на деталях з міді та її сплавів є кристалізаційні тріщини. Тому дослідження схильності міді та її сплавів до утворення тріщин при зварюванні представляє великий науковий та практичний інтерес.

Для оцінки зварюваності мідних сплавів використовуються стикові проби з жорстким закріпленням та таврові проби, які мають порівняно низькою чутливістю та є дуже металомісткими. Опробування для міді та низки її сплавів методики з використанням технологічної проби типу ЛТП, яка застосовується для оцінки схильності до утворенню тріщин при зварюванні

сталей, не дає позитивних результатів внаслідок підвищеної схильності міді та її сплавів до утворення кристалізаційних тріщин.

Проба «риб'ячий скелет», яка застосовується для оцінки зварюваності алюмінієвих сплавів, визначає насамперед схильність матеріалу до поширення тріщин.

Вченими розроблена спеціальна методика оцінки зварюваності міді та її сплавів. Сутність її полягає у наступному. Зразки розміром $60 \times 25 \times 3$ мм проплавляються з повним проваром на різних погонних енергіях, але за певного значення силитструму, та за критичною швидкістю зварювання, при якій з'являються у швах тріщини, за якими оцінюють схильність металу до утворення кристалізаційних тріщин. Чим більша ця швидкість, тим вища стійкість металу проти утворення тріщин. Одночасно визначається показник $K_{тр}$, який є відношенням довжини тріщини до довжини шва і виражене у відсотках. За ним оцінюється і схильність металу до поширення тріщин.

Перевагою розробленої методики оцінки зварюваності міді та її сплавів є висока чутливість і не металоємність застосовуваних зразків.

За розробленою методикою було вивчено вплив шкідливих домішок та легуючих елементів на зварюваність міді та хромової бронзи.

Існуючі дослідження показують, що найбільший вплив на схильність міді до утворення тріщин дає вісмут і у меншій мірі, свинець. Встановлено також негативний вплив фосфору на зварюваність міді.

Літературні дані щодо впливу кисню на утворення тріщин у швах при зварюванні міді суперечливі.

Досвідченим шляхом встановлено, що із збільшенням вмісту кисню в міді схильність її до утворення та поширення кристалізаційних тріщин у швах спочатку різко зростає, а потім знижується, і при вмісті кисню більше 0,06-0,08 % тріщини у швах практично відсутні. Позитивний вплив кисню можна пояснити тим, що кисень пов'язує шкідливі домішки в окислі та знижує їх поверхневу активність і цим нейтралізує їх шкідливий вплив. При

практичному використанні цього явища необхідно враховувати негативний вплив кисню на механічні властивості зварних з'єднань.

Вивченим також є вплив хрому на зварюваність міді. Зі збільшенням вмісту хрому в міді у досліджених межах (0,3-1,3 %) стійкість швів проти утворення та розповсюдження тріщин зростає. Це, мабуть, пов'язано зі збільшенням евтектичної складової на останніх етапах кристалізації та зі зменшенням відносної концентрації шкідливих домішок за межами кристалітів. Оптимальний вміст хрому у швах має бути в межах 0,6-1,0 %.

Порівняльна оцінка зварюваності різних марок хромової бронзи показала, що хромова бронза марка Бр.Х08 має найбільшу опірність до виникнення та поширення тріщин.

Таблиця 1.1 – Критична швидкість зварювання

Марка сплаву	Хімічний склад, %				Сума домішок (за ТУ)	Критична швидкість зварювання, м/год
	Cu	Cr	Ni	Ti		
Бр.Х08	Осн.	0,66	-	-	0,2	32
Бр.Х	Те ж	0,50	-	-	0,5	8
Сплав №1	Те ж	0,40	0,7	0,02	0,2	17
Примітка: Зварювання виконувалося на режимі: $I_{зв} = 300$ А, $U_d = 13$ В						

Отримані результати підтверджуються багаторічним практичним досвідом застосування хромової бронзи Бр.Х08 як конструкційного матеріалу під час виготовлення зварних виробів відповідального призначення.

1.4. Вплив домішок та легуючих елементів на утворення тріщин при зварюванні міді

У зв'язку з недостатньою вивченістю питань зварюваності міді актуальним є дослідження впливу домішок та легуючих добавок на схильність до утворення кристалізаційних тріщин при зварюванні. Як показує аналіз

літературних даних, зварюваність міді та її сплавів оцінювалася з використанням малочутливих та металоємних технологічних проб: таврової або наплавлення на пластину. В результаті цих досліджень встановлені критичні концентрації домішок є завищеними.

Оцінка низки існуючих технологічних проб показує, що найбільш чутливою є проба типу ЛТП. Методика оцінки зварюваності за допомогою цієї проби ґрунтується на зміні деформації формозміни (зовнішньої деформації) для різної жорсткості (ширини) зразків. Критерієм стійкості швів проти утворення тріщин служить ширина зразка - чим менша ширина зразка, за якої відсутні тріщини у шві, тим вище стійкість проти утворення тріщин. Ця методика випробувана при оцінці зварюваності ряду технічних марок міді. Одночасно з фіксацією наявності тріщин визначався також показник $K_{тр}$:

$$K_{тр} = l_{тр} / l_{шва} \cdot 100 \% \quad (1.1)$$

де $l_{тр}$ - довжина тріщини; $l_{шва}$ - довжина шва.

У зварювальній та металургійній літературі величини $K_{тр}$ та $l_{тр}$ використовують як критерій схильності сплаву до утворення тріщин. На наш погляд, правильніше вважати, що величини $K_{тр}$ та $l_{тр}$ визначають схильність сплаву до поширення тріщин.

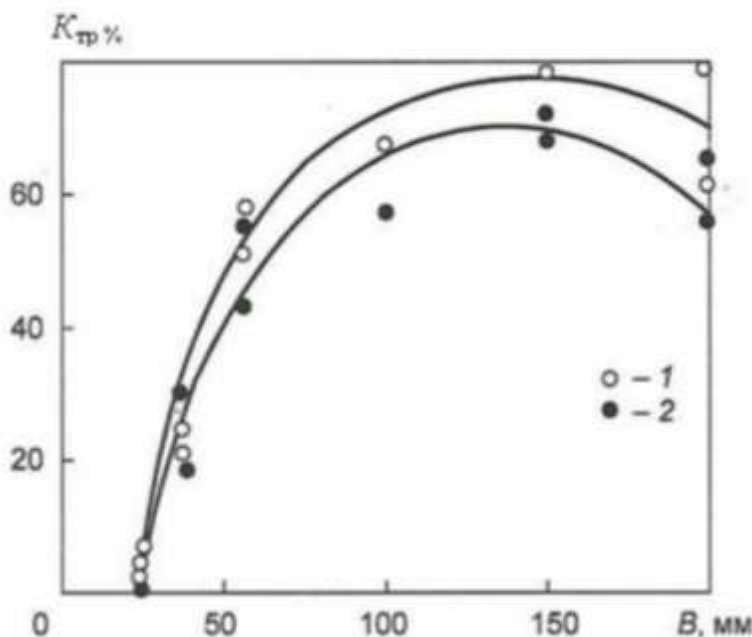


Рисунок 1.1 – Вплив ширини зразка на стійкість швів проти тріщиноутворення (мідь марки М1 р, $I_{зв} = 200$ А)

1 - $V_{зв} = 6$ м/год;

2 - $V_{зв} = 4$ м/год

Як видно з наведених на рис. 1.1 результатів випробувань, схильність до утворення та поширення тріщин зі збільшенням ширина зразків збільшується. Тріщини з'явилися у всьому досліджуваному діапазон режимів зварювання при ширині зразків більше 25 мм, тому використовувати цю методику з метою оцінки зварюваності міді недоцільно.

У той же час, як показують дослідження, при ширині зразка 25 мм, зі зменшенням швидкості зварювання до певної величини тріщини шва не утворюються.

Таким чином, зварюючи зразки постійної ширини малих розмірів на однаковому струмі та напрузі, але при різних швидкостях зварювання, які забезпечують повне проплавлення зразка, можна оцінювати схильність металу до утворення тріщин по критичній (вінімальної) швидкості зварювання, вище якої у шві з'являються тріщини. Чим більша ця швидкість, тим вища стійкість металу проти утворення тріщин. Визначаючи одночасно показник $K_{тр}$ можна оцінювати й схильність металу до поширення тріщин.

Перевагою даної методики оцінки міді та її сплавів до утворенню та поширенню тріщин у швах є висока чутливість та неметалоємність обраної технологічної проби.

Для проведення досліджень з оцінки впливу шкідливих домішок та легуючих елементів (добавок) використовуються виплавлені у вакуумній індукційній печі зливки з різним вмістом досліджуваних елементів. Як вихідний матеріал використовувалася катодна мідь марки М00. Виплавлені зливки прокочувалися на смуги товщиною 3 мм, з яких вирізалися зразки типу ЛТПМ. За ними вивчався вплив на зварюваність міді домішок, які зазвичай містяться в її промислових марках та регламентованих стандартами, та додатково Se та Ti, які зустрічаються у напівфабрикатах, що випускаються деякими заводами. Концентрації досліджуваних домішок становили: Sb, As, S, P - від 0,005 до 0,05 %; [O] - від 0,005 до 0,1 %; Bi, Pb, Ti - від 0,001 до 0,01 %; Se - від 0,0005 до 0,005 %. Враховуючи високу схильність міді до утворення

тріщин у широкому діапазоні швидкостей зварювання, оцінку зварюваності проводять за показником $K_{тр}$ при певної величини $V_{зв}$.

Проведені дослідження показали, що за характером впливу утворення тріщин домішки можуть бути поділені на три групи (рис. 1.2).

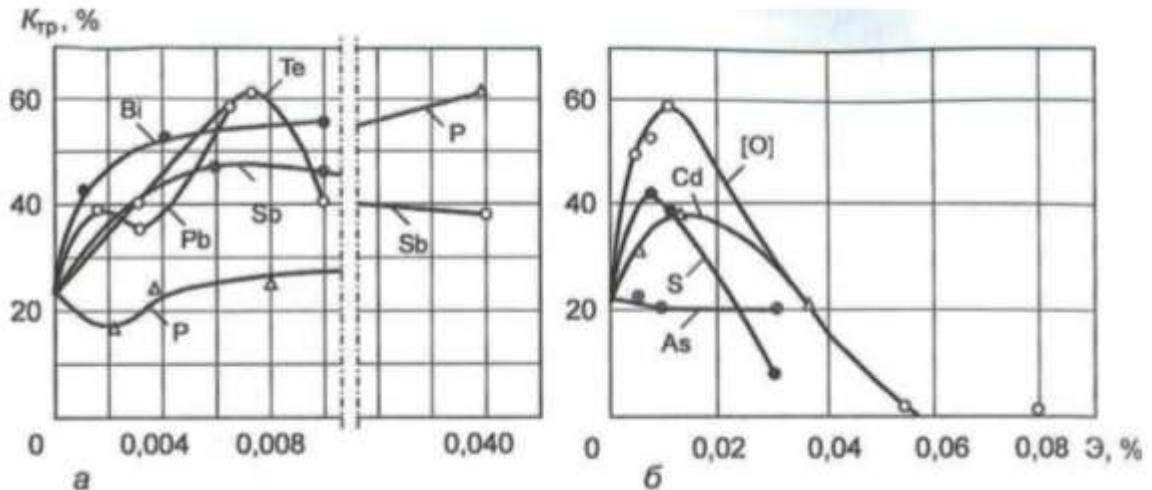


Рисунок 1.2 - Вплив домішок на зварюваність міді

1. Домішки, які підвищують схильність до утворення та поширення тріщин при зварюванні - Bi, Ti, Se, P, Pb, Sb. Вказані домішки, крім фосфору, чинять шкідливий вплив на зварюваність міді при їх концентраціях у тисячних і навіть десятитисячних частках відсотка. Істотний вплив фосфору проявляється при його вмісті в міді понад 0,01%.

2. Домішки, які надають залежно від концентрації змінний вплив на утворення та розповсюдження тріщин: при малих концентраціях ($\sim$ до 0,01%) вони збільшують схильність до утворення та поширенню тріщин, а за великих - зменшують. Такими домішками є [O], S, Cd.

Домішки, що практично не впливають на утворення тріщин (у досліджуваних концентраціях) - As.

Найбільший вплив з першої групи мають вісмут і телур. Свинець починає суттєво впливати лише за великих швидкостях зварювання (≥ 14 м/год), а при введенні його в мідь, розкислену фосфором, він навіть зменшує схильність до утворення та поширення тріщин.

Найбільш типові представники другої групи - кисень і сірка, мають сильний як негативний, і позитивний вплив. Практичне використання позитивного ефекту неможливе, оскільки, по-перше, кисень при вмісті його в міді більше 0,01% знижує механічні властивості зварного з'єднання, по-друге, кисень і сірка збільшують пористість зварних швів.

Шкідлива дія цих домішок обумовлена їх загальними фізико-механічними властивостями: обмеженою розчинністю у міді, утворенням легкоплавких евтектик, поверхневою активністю по відношенню до міді. Тому механізм впливу шкідливих домішок на схильність до утворення тріщин, з погляду, пов'язані з проявом ефекту адсорбційного зниження пластичності та міцності.

Аналіз хімічного складу різних марок міді, які випускаються виробниками показує, що причиною утворення тріщин при зварюванні міді марки МОБ може бути наявність у металі домішок - Bi, Pb, S; для міді марки М1 - Bi, Pb, S [O]; для міді марки М1р - Bi, Pb, S, P; для інших марок - кожна з досліджених домішок. Найбільш прийнятним конструкційним матеріалом для зварних виробів є мідь марки М1 із вмістом кисню $<0,01\%$.

2. АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ МІДІ ТА ЇЇ СПЛАВІВ

2.1. Дроти для зварювання та наплавлення міді

Для механізованих процесів зварювання та наплавлення міді та її сплавів як електродні матеріали використовуються дроти суцільного перерізу та порошкові дроти.

Згідно з ГОСТ 16130–90 для зварювання міді та її низьколегованих конструкційних сплавів типу хромової бронзи промисловість випускає ряд дротів: М1; М1р; МСр1; МН-ЖКТ5-1-0,2-0,2; БрХ0,7; БрКМц3-1; БрОЦ4-3. Для зварювання та наплавлення бронз у зв'язку з важкістю волочіння легованих сплавів номенклатура дротів невелика: БрКМц3-1; БрАМц9-2; БрАЖМЦ10-3-1,5; БрОЦ4-3; БрОФ6,5-0,15. З деяких високоміцних алюмінієвих бронз (типу БрАЖНМЦ, БрМЦАЖН) дроти випускаються по спеціальним технічних умовах.

Характерно, що зазначені дроти для зварювання міді, володіючи задовільними зварювально-технологічними властивостями при зварюванні під флюсом, в MIG/MAG-процесі, а також забезпечуючи отримання міцно-щільних швів, як правило не задовольняють вимоги щодо теплофізичним властивостям зварних з'єднань. Тепло- та електропровідність не перевищують 20 ... 30 % від зварюваної міді. Однак при зварюванні під флюсом із збільшенням товщини ($>15\ldots20$ мм) мідний зварювальний дріт не забезпечує необхідної щільності швів і необхідної пластичності зварних з'єднань. Кращі результати в цьому випадку досягаються при застосуванні спеціального, розробленого в інституті ім. Є. О. Патона зварювального дроту марки БрХТ0,6-0,5 [9]. Спільне легування швів хромом і титаном покращує механічні властивості металу, особливо при високих температурах, і підвищує стійкість металу швів проти утворення пор. Цей же принцип долеговування металу шва хромом і титаном покладено в основу створення спеціальної присадної

порошкової проволочи ПП-БрХТ12-2, призначеної для плазово-дугового зварювання міді та хромової бронзи. Даний присадковий порошковий дріт успішно використовується при виготовленні зварних виливків кристалізаторів електрометалургійних печей.

Для зварювання міді в середовищі захисних газів використовують дроти зі сплавів МНЖКТ і Бр Кмц. Як вже зазначалося, теплофізичні властивості зварних швів при цьому дуже низькі. Рекомендований фірмою



Рисунок 2.1 - Дріт ОК Autrod19.12

для зварювання міді

ESAB для цих цілей дріт ОК Autrod19.12, за нашими даними, також не забезпечує необхідної електропровідності з'єднань. Інститутом Патона розроблено склади ефективних зварювальних матеріалів для зварювання міді та її низьколегованих сплавів (табл. 1) [4-6].

Таблиця 2.1 – Хімічний склад зварювальних дротів для міді

Марка сплаву	Li	B	Mg	Cr	Si	Al	Сума домішок, не більше
МЛЮ,2	0,1...0,3	–	–	–	–	–	0,03
МБМг	–	0,1...0,3	0,1...0,3	–	–	–	0,03
МЛБМг	0,05...0,2	0,05...0,3	0,05...0,2	–	–	–	0,03
МЛАКБ	0,05...0,2	0,05...0,3	–	–	0,1...0,25	0,1...0,25	0,03
МЛХМг	0,1...0,25	–	0,1...0,4	0,15...0,4	–	–	0,03

Дроти зі сплавів МЛЮ,2 і МБМг рекомендовані як присадочні матеріали для зварювання неплавким електродом, забезпечують отримання щільних, добре сформованих швів з високою електропровідністю (до 90 % від міді) і мають механічні властивостями лише на рівні основного металу. Присадковий дріт зі сплаву МЛЮ,2 успішно застосовується для аргондугового зварювання шин з кисневмісної міді, а дріт зі сплаву МБМг - для укрупнення азотно-дугового зварювання мідних гарячекатаних рулонів з метою їх подальшої прокатки та використання прокату без вирубування зварних швів у споживача. Дроти зі сплавів МЛБМг, МЛАКБ і МЛХМг розроблені як

універсальні і можуть застосовуватися для зварювання міді та її низьколегованих сплавів як плавкими, так і не плавкими електродами, забезпечуючи підвищену енергетичну потужність дуги, високу якість та електропровідність зварних з'єднань. Поряд з використанням інертних газів (аргону, гелію та їх сумішей) дріт зі сплаву МЛБМг гарантує високу якість зварних швів та при зварюванні в середовищі азоту.

У зв'язку з певною складністю виготовлення цих дротів (плавка у вакуумних печах, пресування прутків, прокатка, відпал заготовок і волочіння) більш доступним присадним матеріалом для TIG-процесу є дріт марки ППАНМ1 [3]. Введення до складу сердечника порошкового дроту невеликих добавок ефективних розкислювачів забезпечує необхідну якість та теплофізичні властивості зварних сполук при гелієво-дугового зварювання товстостінних елементів різних електротехнічних виробів (двигуни, шинопроводи тощо).

Важливим завданням зварювального виробництва є також розширення застосування наплавочних технологій з метою як відновлення зношених деталей, так і виготовлення біметалічних виробів. Розвиваючи дослідження в області наплавки антифрикційних мідних сплавів (алюмінієвських і олов'яних бронз), в інституті Патона розроблений ряд марок бронзових порошкових дротів (табл. 2), які, вирішують проблему забезпечення потрібного складу наплавленого металу [6].

Таблиця 2.2 – Хімічний склад металу міді, наплавленого порошковим дротом

Марка дроту	Cu	Al	Fe*	Mn	Ni	Sn	Zn	Pb	P
ПП-БрАНМц	Основа	7,5...10,0	2,0...4,0	1,0...2,0	1,0...2,0	–	–	–	–
ПП-БрМцАН	«»»	7,5...9,0		9,0...11,0	1,0...2,0	–	–	–	–
ПП-БрОФ	«»»	–	≤ 1,0	–	–	9,0...10,0	–	–	0,4...0,8
ПП-БрОЦ	«»»	–		–	–	9,0...10,0	1,5...3,0	–	–
ПП-БрОЦС	«»»	–		–	–	5,0...6,5	5,0...6,5	2,0...4,0	–
ПП-БрОС	«»»	–		–	–	7,5...9,0	–	18,0...21,0	–

* Вміст Fe під час наплавлення на сталь.

Розроблені дроти та технології механізованої наплавки успішно впроваджені у виробництво при виготовленні біметалічних втулок,

підп'ятників та інших виробів вузлів тертя високонавантажених механізмів (гірничо-збагачувальне обладнання, відповідальна арматура, підшипникові втулки електромоторів та ін) [7].

2.2. Покриті електроди для зварювання міді

Порівняно невеликі обсяги виготовлення зварних виробів з міді та її сплавів можуть бути виконані ручним зварюванням покритими електродами. Застосовують в основному для цих цілей відомі електроди марки «Комсомолец-100» були розроблені ще у 50-х роках минулого століття і мають суттєві недоліки: надмірно легований метал шва, у тому числі марганцем та залізом (до 5 ... 6%), різко знижується його тепло-і електропровідність; низька якість зварних швів; високий попередній і супутній підігрів виробів. Для усунення цих недоліків розроблені нові високопродуктивні електроди марки АНЦ (АНЦ -1, АНЦ /ОЗМ-2, АНЦ -3М) (табл. 2.3)

Таблиця 2.3 – Властивості металу швів та зварних з'єднань міді, виконаних покритими електродами

Марка електрода	Механічні властивості			$\sum$ Cr, Si, Al, Mn, Fe в металі шва, мас. %	Електропровідність зварного шва, % від міді	Продуктивність наплавлення*, г/хв
	Метал шва	Зварне з'єднання				
		$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %			
АНЦ-1	210...240	20...25	130...180	$\leq 1,1$	40...70	110...150
АНЦ/ОЗМ-2	180...220	25...35	160...180	$\leq 0,8$	50...80	85...125
АНЦ-3М	230...260	30...33	180	$\leq 1,4$	40...60	110...150
«Комсомолец-100»	250	10	—	≤ 6	20...25	40...50

* Дані про продуктивність наплавлення наведені для електродів діаметром 5 мм.

* Дані про продуктивність наплавки наведені для електродів діаметром 5 мм.

Перевагою нових електродів є можливість виконання процесу зварювання міді без попереднього та супутнього підігрівання (для $\delta = 10 \dots 15$ мм) або з невисоким попереднім підігрівом (до $200 \dots 400$ °С) для металу великих товщин. Це досягається за рахунок застосування форсованих режимів зварювання та концентрованого тепловкладення, забезпечуваного при плавленні товстопокритого електрода.

Продуктивність зварювання новими електродами у 2...3 рази вище в порівнянні з «Комсомольцем-100» при цьому електрота теплопровідність зварних з'єднань становить 70...80 % від міді. Зварювання та ремонт виробів з застосуванням високопродуктивних електродів марки АНЦ-3 успішно освоєна на металургійних



Рисунок 2.2 – Електроди «Комсомолец-100»

заводах під час виготовлення кристалізаторів, ремонт виливків, піддонів та електродотримачів різних металургійних печей та інших виробів.

Враховуючи, що в Україні відсутнє виробництво електродів для зварювання та наплавлення бронз (алюмінієвих та олов'яних), в ІЕЗ ім. Є. О. Патона виконано комплекс науково-дослідних робіт зі створення таких електродів. В результаті розроблені спеціальні покриті електроди марок АНБА-1 - для зварювання Al-бронз та АНБО-1, АНБО-2 - для зварювання Sn-бронз (табл. 2.4) [9]. Як стрижні для електродів марки АНБА-1 використовувалася стандартний дрід БрАМц9-2, для електродів марки АНБО-1 - мідний дрід М1Т, марки АНБО-2 - бронзовий дрід БрОФ6,5-0,4.

Таблиця 2.4 – Хімічний склад металу, наплавленого бронзовими електродами, мас. %

Марка електрода	Cu	Al	Mn	Fe	Si	Sn	P	Ni
АНБА-1	Основа	7,0...8,0	1,5...2,0	≤3,0	≤0,5	—	—	—
АНБО-1	«»»	—	0,5...1,0	≤2,0	—	5,0...7,0	0,15...0,25	0,3...0,8
АНБО-2	«»»	—	0,5...1,0	≤2,0	—	8,5...10,5	0,5...0,8	—

Розроблені електроди для зварювання та наплавки бронз мають хороші зварювально-технологічні властивості, за рядом показників (відділення шлаку, стійкість проти утворення пор), перевершують зарубіжні аналоги.

2.3. Зварювальні плавкі флюси та флюси-пасти

Вже в перших роботах з автоматичного зварювання міді та її сплавів під флюсом була показана можливість використання для цих цілей ряду марок

плавких флюсів, призначених для зварювання сталей. Однак із збільшенням товщини міді (більше 20 мм) стандартні плавкі флюси навіть при ретельному дотриманні всіх технологічних рекомендацій (сушка флюсу, зачистка та знежирення зварюваних кромок, відповідна підготовка електродного дроту та ін.) не забезпечують необхідну щільність швів.

Як показали дослідження, найефективнішою мірою попередження пористості швів при зварюванні міді виявилось використання низькокремнистого



Рисунок 2.3 – Флюс-паста для зварювання міді

марганцевого флюсу сухої грануляції з підвищеним ступенем окисленості [13]. Новий флюс марки АНМ13 забезпечує отримання вакуумно-щільних швів при виготовленні кристалізаторів для печей. Завдяки створенню легкоплавкого флюсу АНМ10 на основі фторидних сполук лужно-земельних металів вперше у світовій практиці успішно здійснено електрошлакове зварювання міді великих товщин при виготовленні бандажів кристалізаторів установок неперервного лиття та прокатки катанки з кольорових металів, а також струмопідведення з товстостінних компактних перерізів [7].

Для підвищення якості швів та ефективності використання тепла дуги, а отже, і продуктивності процесу ТІГ-зварювання міді та її сплавів розроблені спеціальні флюси-пасти на основі галогенідів лужних та лужно-земельних металів (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 – Активуючі флюси для ТІГ-зварювання міді та її сплавів

Марка флюсу	Флюсова система	Застосування
АН-М15А	MgF_2-B	Зварювання технічних марок міді
АН-М17А	$MgF_2-Na_3AlF_6-B(P)$	Зварювання бронз
АН-М19А	AlF_3-MgF_2	Мікроплазмове зварювання міді малих товщин
АН-М-21А	$AlF_3-CaF_2-MgF_2$	Азотно-дугове зварювання мідних полос для наступного прокатування
АН-М23А	$AlF_3-CaF_2-MgF_2-B$	Зварювання мідно-нікелевих сплавів
АН-М25А	Cu_2O-Sn	Зварювання латуні

До переваг TIG -процесу зварювання міді слід віднести також можливість металургійного впливу на зварювальну ванну з мінімальним легуванням шва, завдяки чому зварні з'єднання з теплофізичними властивостями виявляються близькими до основного металу. При використанні флюсів-паст можуть бути значно розширено технологічні можливості TIG-зварювання - збільшений діапазон товщин, які зварюються за один прохід, підвищено швидкість зварювання [2].

Таким чином, існуючі зварювальні матеріали та вдосконалені технологічні процеси зварювання та наплавлення міді та сплавів на її основі дозволяють суттєво покращити якість зварних виробів, досягти необхідного рівня експлуатаційних властивостей зварних з'єднань та наплавленого металу, а також забезпечити подальше освоєння механізованих процесів зварювання та наплавлення цих матеріалів.

3. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ЗВАРЮВАННЯ МІДІ МЕТОДОМ TIG

3.1. Особливості TIG-зварювання міді

Зварювання міді є складним завданням через її унікальні властивості, які можуть призводити до розтріскування, деформації або скручування деталей в процесі зварювання під дією високих температур. Метод TIG-зварювання може значно допомогти контролювати температуру деталі.

Мідь сьогодні використовується в різних сферах промисловості. Однак, вона досить складний матеріалом для зварювання, оскільки вона має кілька властивостей, які можуть впливати на зварюваність. Мідь відносно ковка і може легко деформуватися без руйнування. Така властивість може призвести до деформації та викривлення матеріалу під час зварювання, що ускладнює отримання чистого та рівномірного зварного шва. Ще одна проблема полягає в тому, що мідь має високу теплопровідність. Вона швидко та легко передає тепло, а отже це викликає швидке охолодження зварного з'єднання, ніж це бажано, що призводить до неповного проплавлення та низької якості зварювання.

Крім того, мідь має низьку температуру плавлення, що може призводити до її надмірного нагрівання та швидкого згоряння під час зварювання. Це створює суттєві проблеми під час зварювання тонких мідних деталей, оскільки тепло зварювальної дуги важко контролювати.

Головною перевагою TIG-зварювання міді є висока якість зварних швів, якої досягають завдяки точному контролю параметрів зварювання, таких як розмір і форма зварювальної ванни, швидкість процесу зварювання та підведення тепла. Крім того, TIG-зварювання є дуже універсальним, оскільки його можна використовувати для різних металів і сплавів, включаючи мідь, мідні труби або мідні фітинги. Зварювання TIG можна використовувати для тонких матеріалів. Однак, воно має і свої недоліки. Це досить повільніший процес, і він вимагає більшої майстерності та досвіду. Крім того, він не

забезпечує високої швидкості наплавлення шва, тому може не підходити для великих промислових завдань у масовому виробництві.

TIG-зварювання - це процес електродугового зварювання, в якому енергія плавлення виробляється електричною дугою, яка горить між заготовкою та вольфрамовим електродом (рис. 3.1,а). Під час зварювання електрод, дуга та зварювальна ванна захищаються від шкідливого впливу атмосферного повітря за допомогою інертного захисного газу, який подається до зони зварювання через газове сопло та замінює атмосферне повітря. Зварювання TIG відрізняється від інших процесів дугового зварювання тим, що електрод не витрачається, як електроди в інших процесах, таких як MIG/MAG та MMA. Якщо необхідно використовувати присадний матеріал, його додають вручну або автоматично (рис. 3.1,б-в) [2].

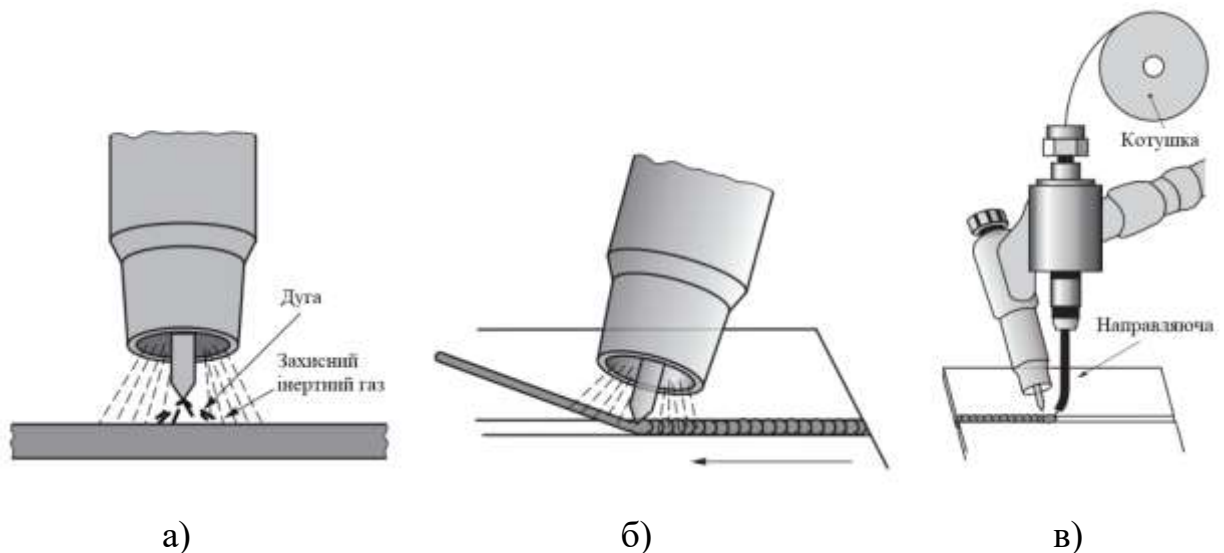


Рисунок – Принципові схеми процесу TIG-зварювання

При зварюванні на постійному струмі вольфрамовий електрод зазвичай підключений до негативної полярності, а заготовка – до позитивної. Згідно з теорією електронів, негативно заряджені електрони та позитивно заряджені іони рухаються в середині дуги. Електрони рухаються від негативного полюса до позитивного, тоді як іони рухатимуться в протилежному напрямку. Коли відбуватиметься їх виробляється теплова енергію.

Потік електронів від вершини електрода відбувається з дуже високою швидкістю, і коли вони потрапляють на заготовку, виділяється значна кількість теплової енергії (рис. 3.2,а). На електроді також виникає певна кількість теплової енергії. Загальна вироблена тепла енергія розподіляється приблизно 30% на електрод, який підключений до негативного полюса, і приблизно 70% на заготовку, підключену до позитивного полюса (рис. 3.2,б).

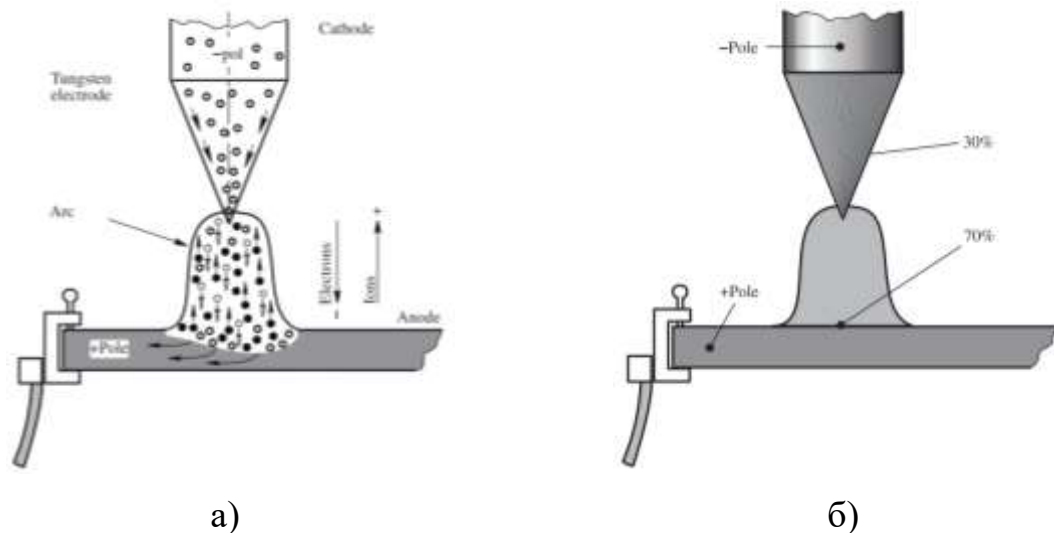


Рисунок 3.2 – Рух заряджених частинок (а) та розподіл теплової енергії (б) в електричній дузі

Змінний струм характеризується тим, що напруга змінює полярність певну кількість разів, зазвичай 100 разів на секунду.

Зварювальне обладнання TIG складається головним чином з:

- TIG-пальника, який використовується зварювальником для керування дугою;
- Джерела живлення, здатного забезпечувати необхідний зварювальний струм;
- TIG-апаратури з вбудованими системами керування, які дозволяють регулювати зварювальний струм, запалювання дуги тощо;
- Балона із захисним газом з редукційним клапаном та витратоміром.

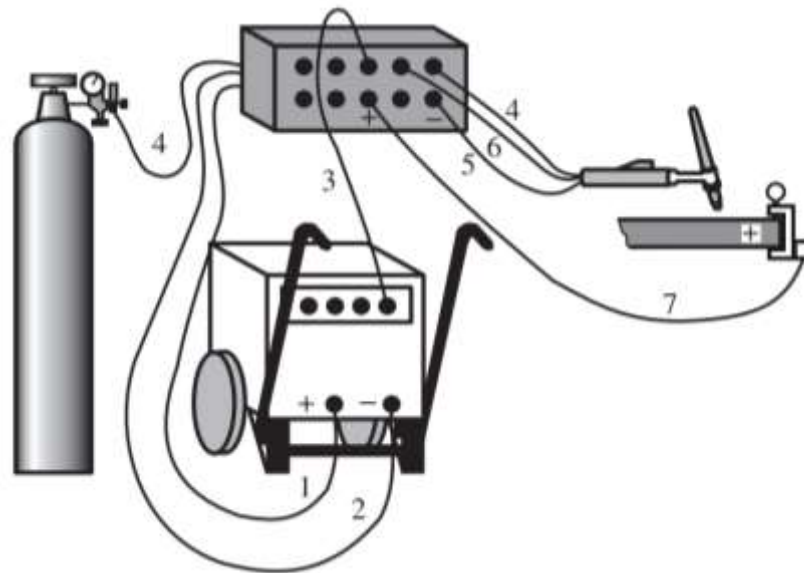


Рисунок 3.3 – Приклад конфігурації зварювального обладнання

1, 2 - кабелі для подачі зварювального струму; 3 - кабель керування для TIG-апаратури; 4 – система подачі захисного газу; 5 - рукав для зварювального кабелю; 6 - кабель керування пальником; 7 - зварювальний кабель з + полярністю

Багато зварювальних апаратів TIG сконструйовані таким чином, що джерело живлення та TIG-апаратура є одним цілим.

Для TIG-зварювання міді використовують кілька ключових компонентів. Джерело для TIG-зварювання, яке буде використовуватись для зварювання міді повинно забезпечувати вищий зварювальний струм, ніж для зварювання сталі. Це пов'язано з термічними властивостями міді.

Для зварювання мідних деталей використовують вольфрамові електроди, виготовлені з чистого вольфраму або з добавкою торію. Розмір і тип вольфрамового електрода залежатимуть від товщини зварюваної міді та сили струму зварювального апарату.

У якості захисного газу найкращим варіантом є використання 100 % гелію. Також, зварювальники дуже часто використовують чистий ргон та його суміші з гелієм (Ar+He). Це допомагає краще захищати зварний шов від забруднення та досягти бажаної температури й глибини проплавлення. Однак, зварювальнику потрібно постійно тримати присадковий матеріал у захисному

газі, щоб запобігти його забрудненню при контакті з повітрям. Після формування зварювальної ванни формування шва потрібно проводити якомога швидше і на високих струмах (близько 200 А) та довго не залишати дугу на зварному шві щоб запобігти накопиченню зайвого тепла та його поширенню через метал.

3.2. Вимоги до зварювальних апаратів

Для TIG-зварювання міді використовують зварювальні апарати, до складу яких входить джерело живлення постійного струму (DC). Зварювальні установки можуть комплектуватися ногою педаллю або ручним пультом керування.

Сила зварювального струму, необхідна для TIG-зварювання міді, залежить від товщини матеріалу. Зазвичай побутові TIG апарати мають межі регулювання струму 25...250 А. Однак, через термічні властивості мідь потребуватиме струму на 30...50 А більшого, ніж сталь такої ж товщини.

Полярність для при зварюванні міді слід встановлювати на джерелах постійного струму пряму (DCEN). Це означає, що електрод (вольфрам) має бути підключено до негативного полюса джерела живлення, а заготовка (мідь) – до позитивного. Таким чином можна отримати достатню кількість тепла та забезпечити хороше проникнення.

Зварювальні апарати можуть мати кілька спеціальних функцій, які можуть бути корисними під час зварювання міді. Наприклад, імпульсна функція може бути корисною для зварювання тонких матеріалів, оскільки вона дозволяє зменшити підведення тепла та покращити якість зварного шва. Крім того, функція пост-подачі може бути корисною для захисту зварювальної ванни від окислення. Контроль балансу дуги також може бути корисним під час зварювання міді, оскільки дозволяє користувачеві контролювати співвідношення очищення до проникнення в процесі зварювання.

Система керування TIG-обладнанням може бути як дуже простою, так і мати багато різних функцій. У найпростішому варіанті контролюється лише зварювальний струм, а захисний газ вмикається/вимикається невеликим клапаном на пальнику.

Більш складніші системи здатні контролювати захисний газ таким чином, щоб він подавався до місця зварювання до запалювання дуги, та затримувати переривання подачі захисного газу після відключення зварювального струму. Це означає, що вольфрамовий електрод та зварювальна ванна також захищені від атмосферного повітря під час періоду охолодження.

Крім того, сучасні системи мають функцію імпульсного запалювання, що дозволяє уникати пошкодження кінчика електрода. Ця функція запалювання забезпечується високочастотним блоком (HF), який збільшує частоту до 2-4 мільйона періодів за секунду, а напругу до кількох тисяч вольт. Висока частота та напруга дозволяють створити іскровий розряд між кінчиком електрода та поверхнею заготовки.

В системах з контактним запалюванням дуги інший тип керування. Ним керує вбудований блок, здатний обмежувати струм короткого замикання в момент запалювання, щоб на початку зварювання кінчик вольфрамового електрода можна було розмістити безпосередньо на заготовці без залипання. Потім керування збільшує силу зварювального струму, коли електрод піднімається від заготовки, тим самим запалюючи дугу. Цей вид керування має кілька назв (LIFTARC або LIFTIG) [7].



Рисунок 3.4 – Схема керування зварювальним струмом

В сучасних зварювальних джерелах можна дозволяє попередньо запрограмувати збільшення зварювального струму на початку зварювання та зменшення зварювального струму, коли зварювання зупиняється. Керування струмом особливо важливе в кінці зварювання, оскільки це допомагає усунути пористість та кратери на кінці зварного шва.

Пульсація струму означає, що попередньо запрограмовано два рівні зварювального струму. Це імпульсний струм та базовий струм. Базовий струм достатньо великий лише для підтримки дуги. Потім відбувається плавлення основного матеріалу, коли присутній імпульсний струм, а зварювальна ванна охолоджується, коли присутній базовий струм, але дуга підтримується.

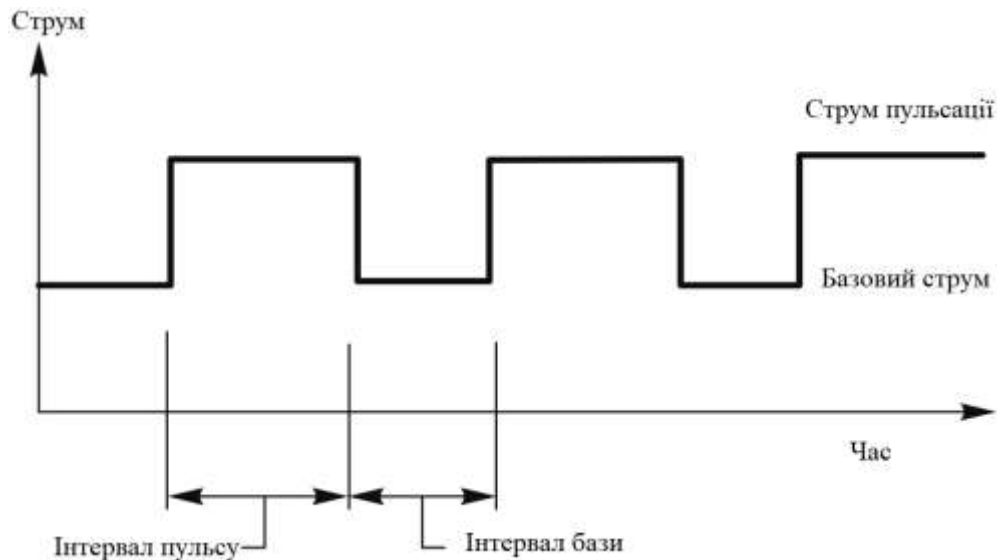


Рисунок 3.5 – Діаграма імпульсного режиму зварювання

Періоди імпульсного та базового струмів також є керованими. Коли зварювання виконується в імпульсному режимі, зварний шов є рядом точкових зварних швів, які перекриваються, залежно від швидкості зварювання.

Багато апаратів з подвійним струмом оснащені функцією керування, яка дозволяє змінювати криву змінного струму, щоб зробити її більш квадратною, а також змінювати баланс між позитивним та негативним напівперіодами. Ці можливості керування є дуже вигідними при TIG-зварюванні алюмінію, магнію та їхніх сплавів.

3.3. Електроди для TIG-зварювання міді

Найкращими вольфрамовими електродами для TIG-зварювання міді є електроди, виготовлені з торованого вольфраму. Торований вольфрам – це тип вольфраму, легований невеликою кількістю оксиду торію (ThO_2). Додавання його до вольфраму допомагає збільшити його електропровідність, що важливо під час зварювання міді. Крім того, торований вольфрам також має вищу температуру плавлення, ніж чистий вольфрам, що робить його більш стійким до зносу в процесі зварювання. Це досить важливо під час зварювання міді, оскільки вона має відносно високу температуру плавлення і може легко призвести до руйнування вольфрамового електрода під час зварювання. Торовані вольфрамові електроди також мають нижчий рівень забруднення порівняно з іншими вольфрамовими електродами, що робить їх ідеальним вибором для зварювання міді. Для якісного зварювання міді загострення електрода має бути під малим кутом (гострий кінець).



Рисунок 3.6 – Вольфрамові електроди з оксидом торію

Під час TIG-зварювання міді найкращим типом присадного прутка є кремнієво-бронзові прутки. Кремнієво-бронзові сплави відомі своєю чудовою міцністю та гарною зварюваністю. Вони також мають низьку температуру плавлення, що робить їх ідеальними для зварювання міді. Вони забезпечують чудову стійкість до корозії та добру електропровідність. Крім того, вони



Рисунок 3.6 – Присадкові прутки для зварювання міді

відносно недорогі, що робить їх економічним вибором для даного процесу. Порівняно з іншими типами присадкових матеріалів, таких як алюмінієво-бронзові або розкислені прутки, кремнієво-бронзові сплави дають чудову міцність і зварюваність. Вони також мають нижчу температуру плавлення, ніж інші присадкові матеріали, що дозволяє швидше та легше зварювати. Крім того, вони забезпечують чудову стійкість до корозії. Присадковий матеріал з голого мідного дроту ERCu можна використовувати, коли зварювана мідь має чистоту понад 98%. Альтернативою є суцільний мідний електричний дріт, який може дати відповідні результати в певних випадках.

3.4. Захисні гази для TIG-зварювання міді

Процес TIG-зварювання вимагає застосування інертних газів, які не взаємодіють і не забруднюють вольфрам або зварювальну ванну. Зазвичай для цього використовуються аргон і гелій. Чистий аргон є найкращим вибором для будь-якого TIG-зварювання товщиною менше 3 мм (1/8 дюйма). Однак аргону дещо бракує тепла, що є важливим у боротьбі з тепловими властивостями міді.

Усі мідні сплави дуже добре поглинають тепло, у 4 рази більше, ніж низьковуглецева сталь. Зварювання міді зі 100% гелієм забезпечує додаткову теплопередачу, що робить зварювання набагато швидшим, з більшим проникненням та вищим струмом. Зі 100% гелієм забезпечується можливість успішного зварювання товстої міді. Однак, чистий гелій не забезпечує достатньої стабільності дуги, він дорогий і може спричиняти розбризкування через вищу температуру. Крім того, навколо нього часто стає занадто гарячо, тому слід бути особливо обережним.

Багато хто вважає суміш захисних газів 80% гелію та 20% аргону є найкращою для TIG-зварювання міді, особливо коли товщина зварного металу перевищує 3 мм. Гелій забезпечує чудове нагрівання та проникнення при зварюванні товстого металу. Однак аргон є дешевший і допомагає стабілізувати зварювальну дугу, тому зварювальники зазвичай

використовують суміш гелію та аргону під час TIG-зварювання міді. Оскільки мідні сплави потребують суміші, багатої на гелій, їх зварювання є дорожчим. Однак, незважаючи на різні думки та особисті вподобання зварювальників, більшість з них віддають перевагу 100% аргону на тонших мідних листах.

3.5. Підготовка міді до зварювання

Підготовка зварних кромок мідних деталей до зварювання – це важливий крок, яким не слід ігнорувати. Поверхню міді слід очищати перед зварюванням, щоб видалити будь-який бруд, пил та мастила, які можуть бути присутніми на поверхні заготовок. Це робиться за допомогою дрітчастої щітки або шліфувального круга для видалення будь-яких слідів сторонніх матеріалів.

При зварюванні товстих деталей важливо якісно підготувати ділянку до зварювання, обробивши краї належним чином. Це робиться шляхом шліфування країв, щоб забезпечити їх рівність і не заважати процесу зварювання. Цей крок також допомагає забезпечити максимально міцний зварний шов і відсутність слабких місць через погану підготовку.

Правильна температура попереднього нагрівання для TIG-зварювання міді залежить від товщини матеріалу, але зазвичай вона становить від 10 до 400 °C. Попереднє нагрівання міді здійснюється через її високу теплопровідність, але його температура не повинна перевищувати максимально рекомендовану 430 °C. Елементи металевих деталей необхідно спочатку рівномірно попередньо нагріти. Це допомагає поступово розсіювати тепло, що у свою чергу, зменшує ймовірність розтріскування. Крім того, високі температури допоможуть підтримувати стабільну дугу з належним проникненням по всьому зварному шву. Якщо деталі охолонуть, мідь поглине тепло та не досягне температури плавлення, необхідної для сплавлення з іншими деталями та присадковим матеріалом.

4. МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Загальна характеристика експериментального обладнання

Для проведення досліджень процесу зварювання міді TIG методом ми застосовували зварювальний апарат Magic Wave 2200 job, обладнаний зварювальним пальником TTG 2200A, пристроєм дистанційного керування TR 2200 F, балоном з захисним газом Ar 100 % та газовим редуктором (Fronius 42.0510.0009).

Зварювальне джерело Magic Wave 2200 job - це цифрове інверторне джерелом струму для TIG зварювання, яке має мікропроцесорне керування.



Рисунок 4.1 – Загальний вигляд зварювального обладнання (замінити)

В джерелах MagicWave доступна функція імпульсного зварювання в широкому діапазоні частот. Система керування дозволяє враховувати такі

параметри, як діаметр електрода та його поточна температура. Запалювання дуги на зворотній полярності забезпечує чітке реагування на момент запалювання дуги при зварюванні на постійному струмі. В процесі зварювання джерело реагує на виявлені зміни параметрів процесу.

В залежності від сфери застосування джерело Magic Wave 2200 job може комплектуватись різним додатковим обладнанням [18]. Проста конструкція та функціональність органів керування забезпечує можливість швидкого вибору й перегляду значень основних параметрів процесу зварювання та при потребі налаштувати їх. Вбудовану пам'ять джерела Magic Wave дозволяє зберігати задані параметри процесу зварювання та при потребі відновлювати їх. Наявність стандартного роз'єму LocalNet (рис. 4.2) дозволяє поєднувати системи керування джерела живлення та інших додаткових пристроїв та машин (наприклад, блок дистанційного керування TR 2200 F).

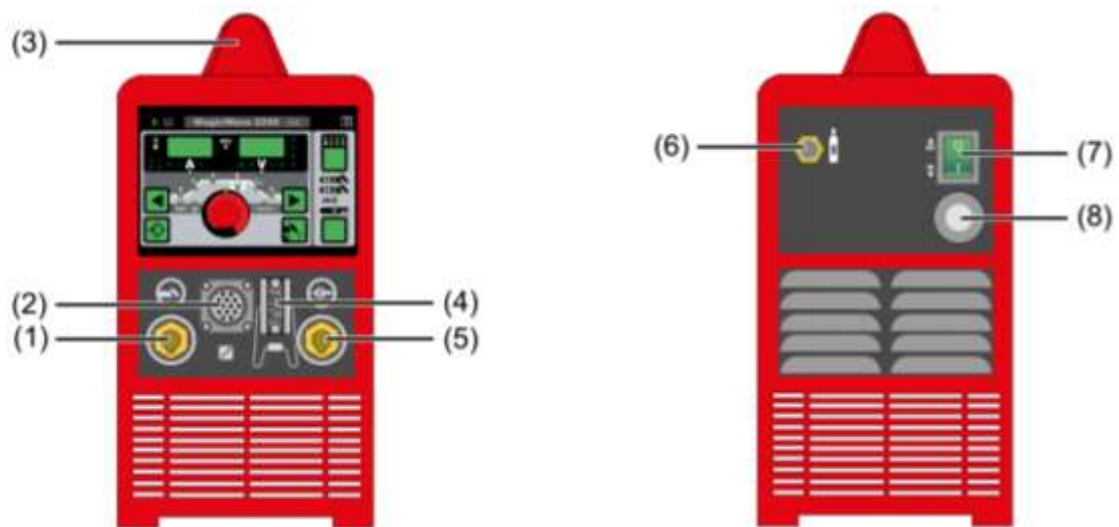


Рисунок 4.2 – Будова джерела живлення Magic Wave 2200 job

- 1 - роз'єм для підключення TIG пальника або кабелю електродотримача;
- 2 - роз'єм LocalNet для підключення додаткового обладнання; 3 - ручка; 4 - роз'єм штекера зварювального пальника або інтерфейсу автоматичних зварювальних установок та роботів; 5 - роз'єм для підключення заземлення;
- 6 - штуцер для подачі захисного газу; 7 - вимикач 8 - мережевий кабель

Завдяки наявності функції перемикання з постійного на змінний струм та регулюванню частоти струму джерело є ефективним під час зварюванням алюмінію, магнію та їх сплавів.

Блок дистанційного керування TR 2200 F дозволяє легко регулювати зварювальний струм за допомогою педалі. Руки зварювальника залишаються вільними, а це означає, що навіть при постійному коригуванні зварювального струму буде гарантовано безперебійне керування зварювальним пальником. Його можна використовувати разом із такими джерелами живлення MagicWave 1700 / 2200 та TransTig 2200.

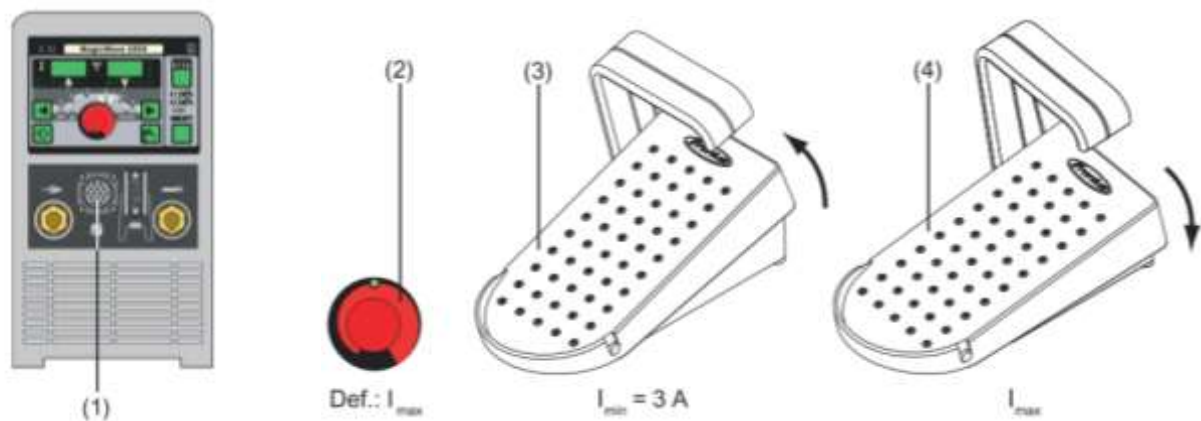


Рисунок 4.3 – Блок дистанційного керування TR 2200 F

Якщо пульт дистанційного керування підключено до роз'єму LocalNet (1) на джерелі живлення (рис. 4.3), максимальним струмом є зварювальний струм, встановлений за допомогою регулювальної ручки (2) на панелі керування джерела живлення. Загальний хід педалі відповідає діапазону від мінімального до максимального зварювального струмів. Максимальний зварювальний струм I_{max} , встановлений за допомогою регулювальної ручки (2), буде доступний лише тоді, коли педаль (4) буде повністю натиснута. Це дозволяє забезпечувати дуже чутливе регулювання, особливо за низьких зварювальних струмів.

Пальник FRONIUS TTG 2200 A/4m має повітряне охолодження та призначений для всіх процесів TIG-зварювання (DC, AC/DC) з максимальним зварювальним струмом до 250 А. Пальник має керамічну систему сопел і

підходить для зварювання нержавіючої сталі, алюмінію, магнієвих сплавів та інших матеріалів. Довжина кабелю становить 4 м, а діаметр електрода – до 5,0 мм. Головку пальника можна повертати на 90°.



Рисунок 4.4 – Зварювальний пальник TTG 2200 А

Пальник оснащувався вольфрамовий електрод WC20 2,4 x 175 мм з сірим маркуванням. Даний електрод призначений для зварювання тонких металів і орбітального зварювання. Він містить 2% церію і здатний забезпечувати зварювання при низькій силі струму. Оксид церію робить зварювальний електрод більш стійким, ніж електрод з чистим вольфрамом, але менш стійким, ніж лантанові електроди. Цей тип вольфрамових електродів використовується переважно в діапазоні середніх та низьких струмів для зварювання нелегованих, високолегованих сталей, а також алюмінію, міді, нікелю, титану та магнієвих сплавів. Їх можна використовувати як на змінному, так і на постійному струмі.

Для захисту електрода та зварювальної ванни застосовували чистий газ аргон. Це Благородний газ з низькою реакційною здатністю. Його найчастіше використовують як економічно ефективний захисний газом. Він запобігає потраплянню повітря в зону зварювання та зберігає стабільність дуги, особливо при зварюванні як алюміній, титан або нержавіючої сталі.

4.2. Методика експериментальних досліджень

Для проведення експериментальних досліджень процесу TIG зварювання міді вибирались основні технологічні параметри роботи зварювального обладнання та встановлювались межі їх варіювання. Серед усіх параметрів були вибрані наступні:

1. матеріал деталі;
2. товщина деталі, мм;
3. струм зварювання, А;

Для досліджень використовували листову мідь марки М1. Це технічно чиста мідь (мінімум 99,9% Cu) з високою пластичністю, відмінною електро- та теплопровідністю, стійкістю до корозії. Вона має високу якість, довговічність та можливість застосування у складних умовах, завдяки мінімальному вмісту домішок, таких як сірка, свинець, вісмут.

Таблиця 4.1 – Характеристика зварювального матеріалу [10]

Показник	Характеристика
Назва	Мідь листова
Марка	М1
Хімічна чистота	99,9 %
Пластичність	Висока, легко гнеться, штампується, ріжеться та зварюється
Електропровідність	Висока
Теплопровідність	Відмінно передає тепло, застосовується у теплообмінниках
Корозійна стійкість	Стійка до атмосферних впливів та води, утворює захисну патину
Термостійкість	Витримує високі та низькі температури
Механічна обробка	Добре піддається пайці, штампуванню, витяжці
Застосування	• Виробництво електротехнічних компонентів. • Системи опалення та охолодження. • Декоративні елементи та облицювання. • Будівельні матеріали та покрівля.
Густина	близько 8940 кг/м ³ .
Модуль пружності	близько 128 ГПа.

Для досліджень було обрано зразки мідних пластин товщиною 1 - 3 мм.

Струм зварювання I_z підбирали за довідковою літературою відповідно до товщини зварних зразків.

План експериментальних досліджень наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – План експериментальних досліджень

№ досліду	Товщина листів, мм	Тип шва	Зварювальний струм, А
1	1,0	стиковий	40...70
2		напускний	
3		тавровий	
4	2,0	стиковий	60...100
5		напускний	
6		тавровий	
7	3,0	стиковий	80-120
8		напускний	
9		тавровий	

Ефективність процесу зварювання оцінювали за загальним виглядом та розмірами зварних швів методом неруйнівного контролю.

4.3. Результати експериментальних досліджень

Під час дослідження процесу TIG-зварювання міді оцінювалась легкість утворення та контролю зварювальної ванни, якість формування зварних швів та утворення зварних з'єднань.

Перед кожним дослідженням налаштовували мінімальне рекомендоване значення зварювального струму і виконували пробне зварювання. Якщо обплавлення кромки мідних пластин та формування зварювальної ванни не відбувалось, то струм збільшували на 10 А і повторювали спробу знову.

На рис. 4.5, 4.7, 4.8 та 4.9 наведено фото зразків зварних з'єднань з листової міді.



а)



б)

Рисунок 4.5 – Стикове зварне з'єднання С2 листової міді М1 товщиною 1 мм
а – лицьовий бік; б – зворотній бік

Зварювання стикового з'єднання міді товщиною 1 мм виконували при струмі 60 А та напрузі 9,8 В. Для аналізу отриманих зварних швів порівнюємо лицьовий та зворотній бік зварного з'єднання (рис. 4.6).

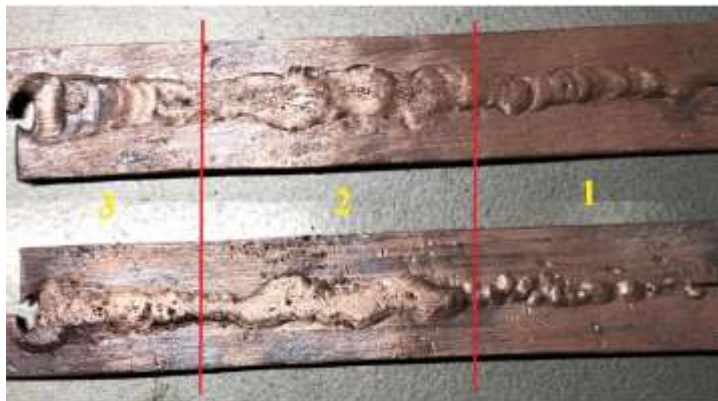


Рисунок 4.6 – Порівняльний
аналіз стикового
1 – випуклий шов;
2 – гладкий шов;
3 – провалювання шва

Отриманий зварний шов можна розділити на три, яскраво виражені частини. В зоні 1 шов був випуклий а проплавлення нерівномірне. Причиною цього є недостатнє прогрівання кромek пластин через значну теплопровідність міді.

Далі, при більшому прогріві деталі, що було видно зі зміни її кольору на червоний, шов формувався більш рівномірно (рис. 4.6, зона 2), зварювальна ванна була суцільною, метал якісно проварювався на всю глибину.

При подальшому зварюванні заготовки прогрівалися більше, зварювальна ванна ставала все рідшою та нестабільною, шов починав провалюватися (рис. 4.6, зона 3) та був пористим. В кінці шва видно місце пропалу.

Вимірявши довжину зон, позначених на рис. 4.6 можна зробити висновок, що зварювання листової міді даної товщини доцільно вести короткими швами довжиною до 50 мм з перервами між циклами 2 – 3 хв.



а)



б)

Рисунок 4.7 – Таврове зварне з'єднання Т1 листової міді М1 товщиною 2 мм

а – лицьовий бік; б – зворотній бік

Аналізуючи зразки таврових зварних з'єднань листової міді товщиною 2 мм, виконаних на струмі 80 А при напрузі зварювання 10,4 В без застосування присадкового матеріалу було відмічено якісне сплавлення деталей на початку з'єднання, чітке і рівномірне формування катета шва без підрізу вертикальної стінки (рис. 4.7). Однак, як і в попередньому випадку, після проходження 50 мм шва на вертикальній стінці почав формуватися незначний підріз, який збільшувався по мірі зварювання. При збільшенні довжини шва в двічі зварювальна ванна стає неконтрольованою, метал стікає вниз і утворюється пропал вертикальної стінки (див. рис. 4.7). Причиною цього є перегрів вертикальної стінки таврового з'єднання зварювальною дугою. Зменшення струму не давало бажаного ефекту, оскільки затруднюється утворення початку шва та сплавлювання деталей між собою.

Цю проблему можна вирішити шляхом застосування присадкових прутків. Однак, для формування якісного кутового шва при з'єднанні деталей малої товщини треба забезпечувати чітку та рівномірну подачу прутка до зварювальної ванни малих розмірів, що досить важко зробити в ручному режимі. Зразок таврового зварного з'єднання листової міді М1 товщиною 3 мм, виконаного струмом 100 А при напрузі зварювання 12,2 В із застосування присадкового матеріалу ОК Tigrod 19.49 ER CuNi ESAB наведено на рисунку 4.8.



Рисунок 4.8 – Таврове зварне з'єднання Т1 листової міді М1 товщиною 3 мм

В процесі зварювання було відмічено, що початкове сплавлювання заготовок відбувається після прогріву зварних кромок протягом 10 – 15 с. Початок зварного шва виходив нерівним з нерівномірним сплавлюванням основного та присадкового металів. По мірі прогріву заготовок гварювальна ванна ставала стабільнішою а розплав металу присадкового прутка якісно змішувався з основним металом. Шов формувався з однаковими катетами з незначним підрізом на вертикальній стінці з'єднання.

Під час виконання напускових з'єднань листової міді М1 товщиною 3 мм струмом 100 А при напрузі зварювання 12,2 В без застосування присадкового дроту були отримані досить якісні зразки зварних швів (рис. 4.9).



Рисунок 4.9 – Напускове зварне з'єднання Н1 листової міді М1 товщиною 3 мм

Даний режим зварювання забезпечував рівномірне розплавлення зварюваних кромок заготовок. Шов формувався рівномірно, сплавлювання деталей задовільне. Зварювання при менших значеннях струму вимагає попереднього підігріву деталей з акцентом на нижню пластину, оскільки торець верхньої розплавлявся швидше.

Під час зварювання стикових та напускових зварних з'єднань листової сталі до 2 мм доцільно застосовувати імпульсний режим зварювання. Частоту пульсації струму задають в межах 20-50 Hz, причому вищі значення частот слід застосовувати для менших товщин міді.

На рис. 4.10 наведені графічні залежності рекомендованих значень зварювального струму, визначених експериментальним шляхом.

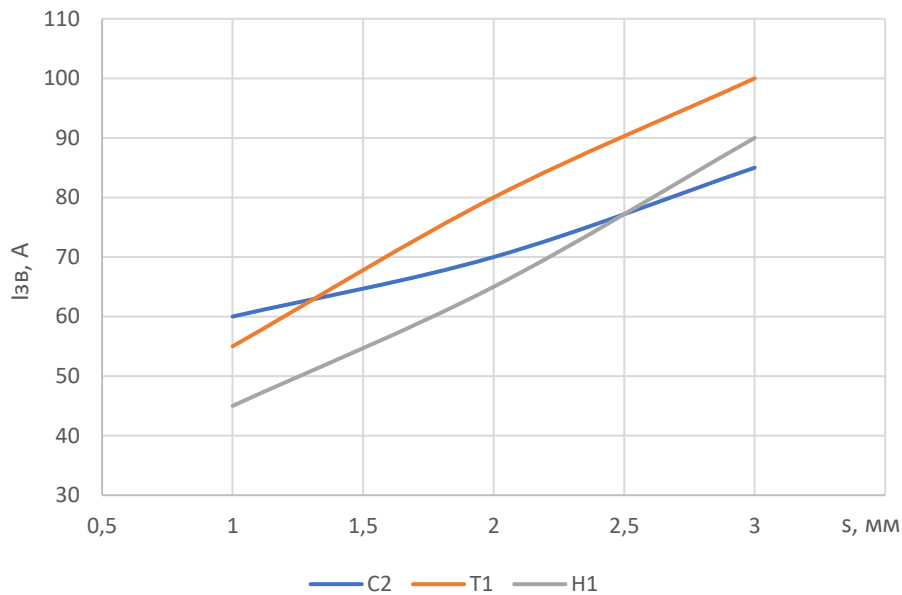


Рисунок 4.10 – Залежності струму зварювання від товщини листової міді при виконанні стикових (C2), таврових (T1) та напускних (H1) з'єднань

Аналізуючи рис. 4.10 можна зробити висновок, що виконання таврових з'єднань листової міді вимагає на 20-30 % вищих значень зварювального струму, в порівнянні з напускними з'єднаннями. Величина струму при зварюванні міді товщиною 1 мм тавровими і стиковими швами майже не відрізняються. Однак, зі збільшенням товщини до 3 мм різниця оптимальних струмів також складає 25 %.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Основні вимоги безпеки праці під час зварювання міді

Безпека праці під час зварювання міді вимагає особливої уваги через виділення токсичних газів та аерозолів оксидів металів, а також інтенсивне ультрафіолетове випромінювання. Необхідно вживати комплексних заходів захисту, включаючи адекватну вентиляцію та використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) [13].

Основні небезпеки:

- Токсичні випари та газів: при зварюванні міді та її сплавів виділяються шкідливі аерозолі, що містять оксиди міді, а також потенційно отруйні газів (оксиди азоту, монооксид вуглецю), особливо якщо використовуються флюси або присадки.
- Ультрафіолетове (УФ) випромінювання: зварювальна дуга є джерелом інтенсивного УФ-випромінювання, яке може спричинити опіки очей ("зварювання очей") та шкіри.
- Висока температура та іскри: ризик опіків від розплавленого металу та іскор.
- Ураження електричним струмом: небезпека, спільна для всіх електрозварювальних робіт.

Заходи безпеки:

1. Вентиляція робочої зони

- Примусова витяжна вентиляція: критично важлива для видалення шкідливих димів та газів.
- Локальні відсмоктувачі: повинні бути розташовані якомога ближче до місця зварювання, щоб ефективно вловлювати аерозолі.
- Вимоги до приміщення: забезпечити достатню потужність вентиляції (не менше 150 м³/год на 1 кг наплавленого металу). У замкнутих просторах потрібна особлива увага до повітрообміну.

2. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ):

- Захист органів дихання: використовувати респіратори або протигази, залежно від концентрації шкідливих речовин та умов роботи.
- Захист очей та обличчя: обов'язкове використання зварювальної маски або щитка з відповідним світлофільтром для захисту від УФ-випромінювання та іскор.
- Захист тіла: спеціальний вогнестійкий одяг, шкіряні або брезентові фартухи та краги (рукавиці) для захисту від опіків та іскор.
- Захист голови та ніг: захисні каски та спеціальне захисне взуття.

3. Організаційні заходи:

- Наряд-допуск: при виконанні робіт підвищеної небезпеки (наприклад, у замкнутих просторах) необхідно оформлювати наряд-допуск, що визначає умови безпечного виконання робіт.
- Технологічна карта: розробка технологічної карти на зварювальні роботи з детальними вказівками заходів охорони праці.
- Навчання та інструктаж: до роботи допускаються лише особи, які пройшли відповідне навчання, інструктаж з охорони праці та медичний огляд.
- Електробезпека: переконатися, що зварювальне обладнання справне, а зварювальні кабелі та тримачі електродів відповідають вимогам безпеки.

Дотримання цих правил допоможе мінімізувати ризики для здоров'я при роботі з міддю та її сплавами.

Через теплові властивості міді, попередній нагрів основного металу та використання 100 % гелію може спричинити значне тепловиділення. Крім того, мідь має високу провідність, а це означає, що вона може швидко передавати електричний струм. Як наслідок, контакт з дугою або надмірне нагрівання може призвести до серйозних опіків або ураження електричним струмом.

Також важливо переконатися, що робоче місце не містить горючих матеріалів, оскільки іскри, що утворюються під час зварювання, можуть їх запалити.

Сплави міді, такі як цинк, можуть утворювати токсичні пари міді, тому переконайтеся, що зварювання відбувається в добре провітрюваному приміщенні або використовується респіратор, якщо немає місцевої чи загальної витяжної системи.

Крім того, потрібно переконатися, що використовується відповідне джерело живлення для поточної роботи; якщо джерела живлення недостатньо для сили струму, необхідної для зварювання міді, це може призвести до пошкодження як джерела живлення, так і оператора.

4.2 Моделювання процесу формування і виникнення травмонебезпечної ситуації під час зварювання

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

Вивчаючи модель процесів формування та можливого виникнення травмонебезпечних та аварійних ситуацій, з якої починається небезпечний процес і до виникнення небезпечних наслідків. Якщо провести дослідження то обов'язково можна знайти подію (явище), що є причиною травмонебезпечних та аварійних ситуацій [1].

Розглянемо випадок виробничого травматизму під час електродугового зварювання. У даному випадку може відбутися травма працівника, внаслідок ураження електричним струмом, отруєння шкідливими газами чи отримання опіку. Головну подію розміщують у верхній частині аркуша паперу і зверху

донизу розміщують інші події. У побудованій моделі базові події мають форму круга. Нерозкриті базові події зображують у вигляді ромба, прямокутник подія, що виникає як результат дії фактора.

Математичну обробку побудованої моделі починають з крайньої лівої гілки, події якої пронумеровані знизу у верх починаючи з базових подій і закінчуючи головною. Значення подій вказуємо безпосередньо на символи зображення події. Ймовірності виробничих подій визначаємо за даними виробництва. Наприклад, базова подія “охорона праці”. Для визначення ймовірності ми повинні встановити наскільки (%) від ідеального рівня здійснюється відповідний контроль на об’єкт. Якщо буде встановлено, що такий рівень контролю становить 12 або 20%, то ймовірність відповідно становить 0,15 і 0,2. При відсутності контролю ймовірність “не здійснення контролю” становитиме 1, якщо контроль ідеальний, то відповідна ймовірність дорівнює 0. Для виконання математичних обчислень ймовірностей випадкових подій логіко-імітаційної моделі застосовують складені формули відповідно до положень.

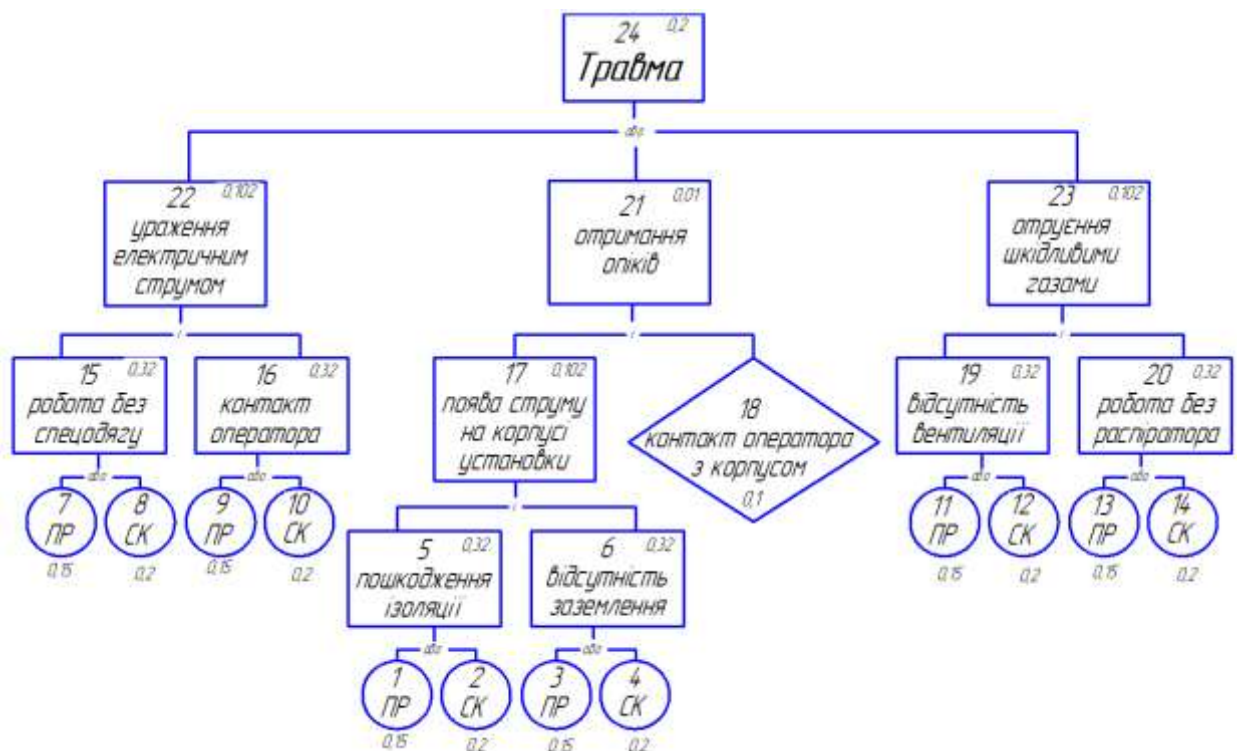


Рисунок 4.1 - Модель процесу формування та виникнення травми

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

Ймовірність події P_5 визначаємо наступним чином

$$P_5 = P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2 = 0,15 + 0,2 - 0,15 \cdot 0,2 = 0,44 \quad (4.1)$$

Ймовірність подій P_6 , P_{15} , P_{16} , P_{19} і P_{20} буде рівною події P_5 , оскільки базові події для них є однаковими.

Ймовірність події P_{17}

$$P_{17} = P_5 \cdot P_6 = 0,32 \cdot 0,32 = 0,102 \quad (4.2)$$

Ймовірність події P_{21}

$$P_{21} = P_{17} \cdot P_{18} = 0,102 \cdot 0,1 = 0,01 \quad (4.3)$$

Ймовірності подій P_{22} і P_{23} будуть рівною події P_{17} , оскільки події P_5 , P_6 , P_{15} , P_{16} рівні між собою.

Ймовірність події P_{24}

$$P_{24} = P_{21} + P_{22} + P_{23} - P_{21} \cdot P_{22} - P_{21} \cdot P_{23} - P_{22} \cdot P_{23} \quad (4.4)$$

$$P_{24} = 0,01 + 0,102 + 0,102 - 0,01 \cdot 0,102 - \\ - 0,01 \cdot 0,102 - 0,102 \cdot 0,102 = 0,2$$

Таким чином, на робочому місті під час зварювання рам вантажних причепів для зварювання в середовищі захисних газів за наявності і можливості виникнення існуючих небезпек та небезпечних дій на 100 робочих місць ймовірність виникнення травмонебезпечної ситуації становить 0,2 (20 %).

ВИСНОВКИ

Зварювання міді, особливо товстостінних виробів, є технологічно складним процесом через високу теплопровідність металу, що вимагає значної енергії зварювальної дуги. TIG-зварювання є одним із найбільш ефективних методів для отримання високоякісних зварних швів без бризок, що особливо важливо для відповідальних конструкцій з міді.

Головною перевагою TIG-зварювання міді є висока якість зварних швів, якої досягають завдяки точному контролю параметрів зварювання, таких як розмір і форма зварювальної ванни, швидкість процесу зварювання та підведення тепла. Крім того, TIG-зварювання є дуже універсальним, оскільки його можна використовувати для різних металів і сплавів, включаючи мідь, мідні труби або мідні фітинги.

Для TIG-зварювання міді використовують зварювальні апарати постійного струму (DC). Через термічні властивості мідь потребує значень зварювального струму на 30...50 А більшого, ніж сталь такої ж товщини. Полярність при зварюванні міді має бути прямою (DCEN). Це дозволяє отримати достатню кількість тепла та забезпечити хороше проникнення.

Зварювання листової міді товщиною 1-2 мм без застосування присадкових матеріалів доцільно вести короткими швами довжиною до 50 мм з перервами між циклами 2 – 3 хв.

Зварювання таврових з'єднань з листової міді товщиною 2 мм на струмі 80 А без застосування присадкового матеріалу дозволяє отримати якісне сплавлення деталей на початку з'єднання, чітке і рівномірне формування катета шва без підрізу вертикальної стінки.

З'єднання листової міді М1 товщиною 3 мм в напуск струмом 100 А забезпечує рівномірне розплавлення зварюваних кромок заготовок. Шов формувався рівномірно, сплавлювання деталей задовільне.

Виконання таврових з'єднань листової міді вимагає на 20-30 % вищих значень зварювального струму, в порівнянні з напусковими з'єднаннями. Величина струму при зварюванні міді товщиною 1 мм тавровими і стиковими швами майже не відрізняються. Однак, зі збільшенням товщини до 3 мм різниця оптимальних струмів також складає 25 %.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Городецький І. В, О. Тимочко. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях: методичні рекомендації до виконання розділу у роботах ОКР "Магістр" студентами факультету механіки та енергетики. Львів: Львівський НАУ, 2011. 16 с.
2. Гуменюк І.В. Іваськів О.В., Гуменюк О.В. Технологія електродугового зварювання: Підручник. Київ: Грамота, 2006. 512 с.
3. Дріт суцільний для міді та її сплавів. <https://nisa-svarka.com.ua/ua/g101039408-provoloka-sploshnaya-dlya>
4. ДСТУ 2456-94. Зварювання дугове і електрошлакове. Вимоги безпеки. [Чинний від 1995-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1994. 48 с.
5. ДСТУ EN ISO 14171:2015 Зварювальні матеріали. Дроти електродні суцільні й порошкові та комбінації дріт електродний/флюс для дугового зварювання під флюсом нелегованих та дрібнозернистих сталей. Класифікація (EN ISO 14171:2010, IDT; ISO 14171:2010, IDT): http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page?id_doc=82838.
6. Ілюшенко В. М., Лук'янченко Е. П. Зварювання та наплавлення міді та сплавів на її основі. Київ: Міжнар. асоціація «зварювання», 2013. 396 с.
7. Квасницький В. В. Спеціальні способи зварювання. Навчальний посібник. Миколаїв: УДМТУ, 2003. 437 с.
8. Пістун І.П., Березовецький А.П., Городецький І.М. Охорона праці на автомобільному транспорті: Навчальний посібник. Львів: «Тріада плюс», 2009. 320 с.
9. Розробка електродних матеріалів для зварювання та наплавки складнолегованих бронз / В. М. Ілюшенко, В.А. Аношин, А. Н. Бондаренко та ін / Зб. тез. стенд. доп. міжнар. конф. «Зварювання та споріднені технології – сьогодення та майбутнє». Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2013. с. 72–73.

<https://metalelit.com.ua/ua/mid.html>

11. Elangovan S, Prakasan K, Jaiganesh V (2010) Optimization of ultrasonic welding parameters for copper to copper joints using design of experiments. *Int J Adv Manuf Technol* 51:163–171.

12. Modenesi PJ, Apolinario ER, Pereira IM. TIG welding with single-component fluxes. *J Mater Process Technol* 2000;99:260-265.

13. Harikrishna Rana, Vishvesh Badheka, Parth Patel, Vivek Patel, Wenya Li, Joel Andersson. Augmentation of weld penetration by flux assisted TIG welding and its distinct variants for oxygen free copper. *journal of materials research and technology* 2021; 10: 138 – 151.

14. H. Yang, X. Tang, C. Hu, S. Liu, Y. Fan, Y. Xiao, G. Lu, Q. Wang, G. Chen, P. Xing, H. Tan, Z. Guo, Z. Niu, Study on laser welding of copper material by hybrid light source of blue diode laser and fiber laser, *J. Laser Appl.* 33 (2021), 032018, <https://doi.org/10.2351/7.0000386>.

15. H. von Lintel, P. Böhlke, H.-G. Wobker, W. Michels, U. Krupp, K. Jahns. Laser beam welding of deoxidized copper: microstructure investigation and thermodynamic consideration. *Materialwiss. Werkstofftech.* 2021 , 52, 1161–1172. doi.org/10.1002/mawe.202100003.

16. How To TIG Weld Copper – Techniques, for Successful Copper TIG Welds. <https://weldingpros.net/how-to-tig-weld-copper/>

17. Rafael Nunes, Koen Faes, Sylvia De Meester, Wim De Waele, Andrzej Kubit. Influence of welding parameters and surface preparation on thin copper–copper sheets welded by ultrasonic welding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2022) 123:373–388. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10164-9>.

18. TransTig 2200/2500 Comfort, TransTig 3000/4000 Comfort, TransTig 5000 Comfort, MagicWave 2200/2500 Comfort, MagicWave 3000/4000 Comfort, MagicWave 5000 Comfort. Джерело живлення WIG. Інструкція з експлуатації. URL: <https://www.fronius.com>.