

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

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему «Дослідження процесу MIG-пайки конструкційної сталі»

Виконав: студент групи Маш-61

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування  
(шифр і назва)

Голубець Руслан Андрійович

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

Дубляни 2024

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри  
Машинобудування  
(назва кафедри)

\_\_\_\_\_

(підпис)

професор Віталій ВЛАСОВЕЦЬ  
(прізвище та ініціали)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

## З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу студенту

Голубцю Руслану Андрійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження процесу MIG-пайки конструкційної сталі»

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

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

2. Строк подання студентом роботи до “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

3. Вихідні дані до работ: довідкова література, інструкції з експлуатації зварювального обладнання для MIG-зварювання, каталоги зварювального обладнання, витратних матеріалів та газів, типові технологічні процеси

зварювання, методики оцінки якості зварних з'єднань, інструкції з охорони праці.

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

4.1. Загальні відомості про процес MIG-паяння; 4.2. Теоретичний аналіз процесу MIG-паяння; 4.3. Методика та результати експериментальних досліджень; 4.4. Охорона праці; 4.5. Економічна оцінка вартості впровадження технології MIG -паяння.

5. Перелік графічного матеріалу:

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

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	Загальні відомості про процес MIG-паяння;	27.09.24	
2	Теоретичний аналіз процесу MIG-паяння	15.10.24	
3	Методика та результати експериментальних досліджень;	25.10.24	
4	Охорона праці	01.11.24	
5	Економічна оцінка вартості впровадження технології MIG -паяння	15.11.24	
6	Оформлення пояснювальної записки	29.11.24	
7	Оформлення графічної частини	11.12.24	

Студент \_\_\_\_\_  
( підпис )

Голубець Р. А.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
( підпис )

Швець О.П.  
(прізвище та ініціали)

## УДК 621.791

**Голубець Р. А.** «Дослідження процесу MIG-пайки конструкційної сталі». /Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет природокористування, 2024. 53 с.

Проведено аналіз технологічного процесу механізованого MIG-паяння плавким твердим припоєм в середовищі захисних газів. Проаналізовано основні особливості роботи обладнання для MIG-паяння та визначено можливі способи виконання технологічних операцій. Здійснено теоретичний аналіз та проведено експериментальні дослідження процесу MIG-паяння конструкційної сталі в синергетичному, імпульсному та СМТ процесах роботи джерела живлення. Визначено вплив технологічних параметрів роботи зварювального обладнання на форму зварних швів та встановлено рекомендовані межі регулювання параметрів процесу зварювання. Розглянуто питання охорони праці під час виконання операцій MIG-паяння металоконструкцій та визначено показники економічної ефективності впровадження даної технології на виробництві.

Табл. 8; рис. 17; бібліогр. джерел 25.

## ЗМІСТ

	ВСТУП	6
1	ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПРОЦЕС MIG-ПАЯННЯ	7
1.1	Тенденції розвитку процесів паяння у машинобудуванні	7
1.2	Вплив нових конструкційних матеріалів на розвиток процесі паяння твердим припоєм	8
1.3	Загальні вимоги до обладнання для MIG-паяння	9
1.4	Технологічні особливості процесу MIG-паяння	10
	Висновки за розділом	14
2	ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ MIG-ПАЯННЯ	15
2.1	Основні відмінності процесу MIG-паяння від MIG/MAG зварювання	15
2.2	Характеристики струму під час MIG-паяння струмом змінної полярності	17
2.3	Матеріали для процесу MIG-паяння	18
2.3.1	Дроти для MIG-паяння та їх характеристики	18
2.3.2	Захисні гази для MIG-паяння та їх характеристики	22
2.4	Аналіз досліджень впливу енергії процесу MIG-паяння на параметри паяних швів	24
	Висновки за розділом	28
3	МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	29
3.1	Опис експериментального обладнання	29
3.2	Налаштування апарата на необхідний режим роботи	30
3.3	Результати дослідження впливу режиму наплавлення на форму та якість процесу MIG-паяння	33
3.4	Результати дослідження параметрів процесу MIG-паяння з врахуванням синергетичного ефекту роботи зварювального джерела живлення	34

3.5	Результати дослідження режимів MIG-паяння на параметри швів	35
3.6	Вплив параметрів MIG-паяння на коефіцієнти форми та опуклості шва	37
3.7	Результати MIG-паяння різних видів з'єднань	38
	Висновки за розділом	40
4	ОХОРОНА ПРАЦІ	41
4.1	Аналіз потенційних небезпе	41
4.2	Моделювання процесу формування і виникнення травмонебезпечної ситуації під час зварювання	43
	Висновки за розділом	45
5	ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ВАРТОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ MIG-ПАЯННЯ	46
5.1	Розрахунок капітальних вкладень	46
5.2	Кошторис витрат за виконання робіт	47
5.3	Розрахунок показників економічної ефективності	49
	Висновки за розділом	50
	ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ	51
	БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	52

## ВСТУП

У багатьох галузях промисловості використовують тонкі листи з покриттям і без нього товщиною від 0,7 мм і 3,0 мм. Ця тенденція створює значний попит для високоякісних з'єднань, виготовлених, наприклад, з тонких листів конструкційної та оцинкованої сталі. Це в свою чергу тягне за собою забезпечення використання ефективних методів зварювання з належною якістю з'єднань без шкоди для антикорозійних властивостей основних металів.

Використання звичайних методів MIG/MAG зварювання пов'язано з надмірним підведенням тепла до з'єднання, що призводить до деформацій зварних елементів і, у випадку використання листів з оцинкованим покриттям, до випаровування та окислення цинку. Це призводить до втрати антикорозійних властивостей основного металу, а також розвиток дефектів з'єднань, таких як газові пори та відсутність або неповні провару.

Процес MIG-пайки твердим припоєм на основі міді дозволяє зменшити підведення тепла, не допускає пошкодження антикорозійних покриттів, що притаманне стандартному дуговому MIG/MAG зварюванню.

Методи зварювання-паяння мідним припоєм забезпечує найкращі якісні та естетичність з'єднання в режимах CMT, ColdArc тощо. Вони дозволяють максимально обмежити тепловкладення і отримати високу стабільність процесу зварювання. В результаті деформації та пошкодження захисних покриттів менші, а завдяки зменшенню бризок, підвищується естетичність стиків.

Ефективність процесу MIG-пайки також залежить від термічного захисного газу, електропровідність якої пов'язана з часткою інертних газів у суміші. Крім запобігання проникненню атмосферних газів до зварювальної ванни, захисний газ впливає на змочуваність матеріалу, плавлення, а також на геометрію та стан поверхні паяного швів. Тому дослідження процесу MIG-паяння конструкційної сталі є актуальним питанням галузі машинобудування.

## 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПРОЦЕС MIG-ПАЯННЯ

### 1.1. Тенденції розвитку процесів паяння у машинобудуванні

Технологічний процес з'єднання конструкційних матеріалів паянням, який був популярний у минулому, через появу нових та вдосконалення існуючих альтернативних методів з'єднання металів почав втрачати свою популярність. Незважаючи на те, що в машинобудівному виробництві процесом паяння часто розглядався як погана альтернатива зварюванню, новітні марки сталей не рекомендується зварювати за допомогою звичайних процесів електродугового зварювання через можливість протікання в них змін, викликаних металургійними процесами в середині металу, які можуть призвести до його послаблення. Оскільки міцність, довговічність і естетичність були традиційними перевагами процесів паяння, то не маловажним є той факт, що процес з'єднання відбувається при температурах, набагато нижчих, ніж ті, які необхідні для зварювання, а отже, таких проблем, як деформація та крихкість металу у зоні термічного впливу на деталь можна уникнути [9].

З розвитком сучасних технологій зварювання, таких як MIG, TIG, лазерне та електронно-променеве зварювання, деякі сфери машинобудівного виробництва зовсім відмовилися від застосування процесів паяння. Тим не менш, існує маса виробів, під час виготовлення яких виробники змушені застосовувати паяні з'єднання. До них відносяться трубопроводи побутової техніки, системи кондиціонування, деталі машин з кольорових та корозійностійких матеріалів. На користь процесів паяння говорить той факт, що припої здатні утворювати міцний металургійний зв'язок з основними металами без необхідності дотримання вимоги, коли матеріали, з яких формується з'єднання, були одного сорту або навіть однієї марки.

За останні роки у виробників відновився інтерес до процесів пайки твердим припоєм як високоміцного методу з'єднання. Його почали



застосовувати при роботі зі сталями останнього покоління, які пропонуються для конструкцій машин.

## 1.2. Вплив нових конструкційних матеріалів на розвиток процесі паяння твердим припоєм

З метою зменшення ваги та досягти кращої міцності виробів виробники почали використовувати сорти сталі з підвищеною міцністю та меншою товщиною зварних елементів. Так, наприклад для виготовлення деталей всередині конструкції кузова автомобіля почали застосовувати різні марки високоміцних сталей (AHSS) та надвисокоміцної сталі (UHSS). Двофазні сталі (DP) рекомендується використовувати для конструкцій, які мають поглинати енергію, тоді як сталі з метастабільним аустенітним складом (TRIP) використовується для елементів, до яких також висуваються вимоги щодо високої пластичності конструкції.

Високоміцні, низьколеговані сталі (HSLA) забезпечують поєднання високої міцності та хороших показників зварюваності. Їх рекомендують використовувати для конструктивних елементів, де потрібно забезпечити посилення. Для підсилення таких ділянок вибирають мартенситні сталі, які мають надзвичайно високу міцність. Також в сучасних конструкціях машин зустрічаються борна і марганцево-борна сталь, які теж мають свої особливості зварювання [6].

Високі фізичні характеристики матеріалу сталей останнього покоління отримують в результаті виконання процесів їх термічної обробки. Звідси випливає, що такі сталі легше піддаються тепловому впливу, а отже існує проблема їх легкого зварювання методом плавлення. Крім того, тенденція використання оцинковування сталевих конструкцій означає, що високі температури, які виникають під час електродугового зварювання, випалюють цинкове покриття та негативно впливають як на міцність з'єднання, так і на корозійну стійкість сталі. Все це сприяє відродженню інтересу до процесів

паяння. Для забезпечення процесу зварювання потрібно підвищувати температуру деталі до точки плавлення основного металу, а процес паяння твердим припоєм відбувається при нижчих температурах, що мінімізує пошкодження цинкового покриття та не змінює металургічні властивості високо- та надвисокоміцних сталей [8].

### 1.3 Загальні вимоги до обладнання для MIG-паяння

Популярним сьогодні способом виконання з'єднань конструкційних матеріалів методом паяння є використання обладнання для MIG зварювання. Завдяки схожості джерел живлення, систем керування та пальника, які використовуються для MIG зварювання, дане обладнання можна застосовувати і в автоматизованих виробничих середовищах та ручних операціях MIG-паяння. За останні роки процеси ручного MIG-паяння знайшли широке застосування в майстернях кузовного ремонту автомобілів, де важливим є уникати використання традиційних методів зварювання високоміцних та надвисокоміцних сталей.

Як правило, для процесу MIG-паяння в якості плавкого електрода застосовують мідно-кремнієвим дріт, який не потребує застосування флюсу. Такий матеріал присадки має свою особливість переоснащення зварювального обладнання під процес паяння. Суть переобладнання полягає в тому, що механізми подачі дроту зварювальних апаратів, які використовуються для такого процесу потрібно обладнати роликami з канавками та без насічки. Систему подачі дроту також потрібно обладнати направляючою з м'якою вставкою в шлангопакеті, що з'єднує механізм подачі та пальник.

Для підтримки стабільної дуги в якості захисного газу здебільшого використовується чистий аргон ( $Ar = 100\%$ ). Крім того, на відміну від процесу зварювання, під час складання зварних конструкцій перед їх паянням необхідно залишати невеликий зазор між з'єднувальними кромками деталей

для того, щоб розплав твердого припою мав змогу через капілярну дію проникнути до всіх поверхонь з'єднання [25].

Практика показала, що найкращих результатів MIG-паяння виробники досягають за допомогою використання синергетичних зварювальних апаратів, які мають можливість працювати імпульсному режимі. Це дозволяє забезпечити поєднання високої швидкості процесу, міцності з'єднань, та виключає потребу правки форми шва. На світовому ринку виробники зварювального обладнання активно рекламують зварювальні апарати, які можуть виконувати процес MIG-паяння. Наприклад, агрегат ESAB Tradesmig 140-1, який працює від однофазної мережі 230 В, можна використовувати для пайки мідним дротом в середовищі аргону, а також для зварювання звичайними суцільними та самозахисними порошковими дротами. Значний вклад у розвиток виробництва зварювальних апаратів, здатних виконувати процес MIG-паяння зробила компанія Fronius. В цілій лінійці зварювальних апаратів цієї фірми закладені програмні налаштування для зварювальних дротів на основі міді та її сплавів.

#### 1.4 Технологічні особливості процесу MIG-паяння

Процес MIG-паяння виконується зварювальними апаратами для MIG/MAG зварювання мідно-кремнієвим зварювальним дротом. Вони можуть бути звичайними трансформаторними зварювальними установками або ж інверторними джерелами живлення з функцією імпульсного зварювання, які працюють з синергетичним ефектом.

Зварювальні дроти для MIG-паяння все частіше використовується в сучасному машинобудуванні для з'єднання конструкцій, де використовується AHSS, UHSS і оцинкована сталь. Загальна теорія його застосування полягає в тому, що він має нижчу температуру плавлення, ніж сталевий дріт, а тому його розплав не змінює молекулярну структуру сталевих деталей під час їх з'єднання. Ще одною його перевагою є той факт, що в процесі паяння він не

призводить до випаровування гальванічного шару навколо зварювальної ванни, тому забезпечує збереження антикорозійного покриття у з'єднанні.

Температура плавлення зварювальних дротів з мідно-кремнієвих сплавів становить близько 900 градусів за Цельсієм, що майже на 1000 градусів нижче від температури плавлення сталі. Тому його використання в процесах MIG-паяння не призводить до зміни молекулярної структури сталі з одночасним утворенням міцного з'єднання тонких сталевих листів без теплових деформацій та бризок розплавленого металу. В процесі паяння захисне покриття (наприклад цинк) залишається неушкодженим в зоні з'єднання чим зберігається збереження захисту конструкції від іржі. Крім того виникає можливість з'єднання в одну металоконструкцію різнорідних матеріалів.

Основними типами спеціальних дротів, які використовуються для MIG-паяння є дроти на основі міді  $\text{CuSi}_3$  та  $\text{CuSi}_3\text{Mn}_1$ . Це найпопулярніші види дротів, рекомендовані до використання в процесах зварювання металоконструкцій з оцинкованої сталі. Для з'єднання листової сталі товщиною до 3 мм, коли джерело живлення працює в імпульсному режимі, виробники рекомендують використовувати дроти товщиною 0,8 та 1,0 мм [8].



а)



б)

Рисунок 1.1 – Зразки зварних з'єднань, виконаних дротом  $\text{CuSi}_3$  товщиною 0,8 (а) та 1,0 (б) мм

Через те, що дроти для MIG-паяння мають нижчі теплові характеристики порівняно зі сталевим дротом, то в процесі зварювання вони потребують менших струмів та напруги зварювання.

Трансформаторні джерела живлення дуже часто не мають можливості працювати на низьких струмах. Для них напруга зварювання для дроту 0,8 мм може коливатися в межах 10...16 В. При такій напрузі температура зварювання буде вищою, що може призвести до перегріву паяльного дроту та значного збільшення його вигарання. Тому використання зварювальних трансформаторів в процесах MIG-паяння дещо ускладнене. Одним зі способів налаштування трансформаторних зварювальних апаратів на процес паяння, коли напруга зварювання становить близько 15 В, є мінімізація теплоти зварювальної ванни за рахунок зменшення швидкості дроту та збільшення швидкості зварювання.

Оскільки дроти для MIG-паяння мають більший діапазон регулювання струму дуги порівняно зі сталевим зварювальними дротами, джерела живлення мають мати можливість регулювання струму на дузі від 30 до 100 ампер, чого не обов'язково дотримуватися під час зварювання сталевими дротами.

Чистий захисний газ аргон визначений як стандартний газ, який рекомендований для процесів MIG-паяння, оскільки він дозволяє зварювальній ванні утворюватися без додаткового нагрівання газу. Чистий аргон також потрібен, якщо зварювання відбувається в імпульсному режимі з синергічним ефектом керування зварювального інвертора.

Для MIG пайки також можна використовувати аргон з додаванням до 5% вуглекислого газу. Це забезпечує введення частини трохи CO<sub>2</sub> і кисню в зварювальний шов, роблячи його гарячішим та більш бочкоподібним. Такі гази ідеально підходять для зварювання деталей встик, але не рекомендуються для зварювання внапуск, з значним зазором або імпульсного зварювання.

Виконання стикових з'єднань пластин методом MIG-паяння має свої особливості. По-перше, перед початком зварювання необхідно переконатися в тому, що зазор між деталями є вдвічі більший за розмір зварювального дроту, оскільки це дозволяє зварювальній ванні проникнути на всю товщину пластин. Зварюйте виконують на короткій дузі, оскільки це полегшує утворення та

керування зварювальною ванною. Зварювати потрібно точковими або дуже короткими швами. Зварні точки слід розташовувати одна біля одної. Це дозволить забезпечити якісне капілярне з'єднання окремих зварювальних ван.

Інтервал між окремими точками рекомендується збільшити, щоб зменшити надходження тепла до деталей і звести до мінімуму їх деформацію [7].

Якщо для стикового зварювання використовувати аргон з додаванням 5% вуглекислого газу, то зазор і зварний шов можна виконати точно так само, як і при зварюванні сталевим дротом. Додаткове тепло, яке утворюється в зварювальному шві від газу, дозволить йому легше проникати та надходити до задньої частини пластини.

На рисунку показано переріз напускового з'єднання, виконаного методом MIG-пайки. Воно утворене завдяки капілярній дії розплаву присадкового металу, який проникає в зазори між деталями.



Рисунок 1.2 – Схема розташування точок під час MIG-пайки пластин стиковим швом



Рисунок 1.3 – Макро-фото стикового шва, виконаного методом MIG-пайки

Як ви можна бачити з наведеного вище фото, сталь у з'єднанні не плавиться. Розплавлений припой обтікає з'єднання, що надає йому міцності. Також можна побачити, що сталь у з'єднанні не змінила своєї форми та структури під дією нагріву, зберігаючи таким чином свою молекулярну структуру та міцність.

### Висновки за розділом

Виконаний аналіз показав, що процес MIG-паяння конструкційних, легованих та покритих антикорозійних сталей знаходить все більше застосування в різних галузях машинобудування. Стимулом до його впровадження є виробництво та застосування нових високоміцних та антикорозійних металів, для яких звичайні процеси електродугового зварювання є небажаними через значні термічні впливи, що призводять до зміни структури та властивостей металу в зоні зварного шва та біляшовній зоні.

Виробниками на ринку пропонується широкий спектр обладнання для MIG/MAG зварювання, здатного виконувати операції паяння твердими припоями на основі мідних сплавів. Однак, нами не знайдено чітких рекомендацій щодо налаштування такого обладнання на потрібні режими MIG-паяння. Тому виконання запланованих досліджень є актуальним питанням сьогодення.

## 2. ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ MIG-ПАЯННЯ

### 2.1 Основні відмінності процесу MIG-паяння від MIG/MAG зварювання

Процес дугового MIG-паяння твердим припоєм суттєво відрізняється від методу звичайного MIG/MAG зварювання [9]. У ньому використовуються присадкові метали, температура плавлення яких нижча, ніж у основного металу. Фізико-хімічні процеси, якими супроводжується утворення з'єднань подібні до паяння, а операції з підготовка кромки з'єднуваних деталей, форма з'єднання, техніка виконання і пристрої, що використовуються в даному процесі, подібні до дугового зварювання [8]. Процес MIG-паяння схематично представлена на рисунку 2.1.

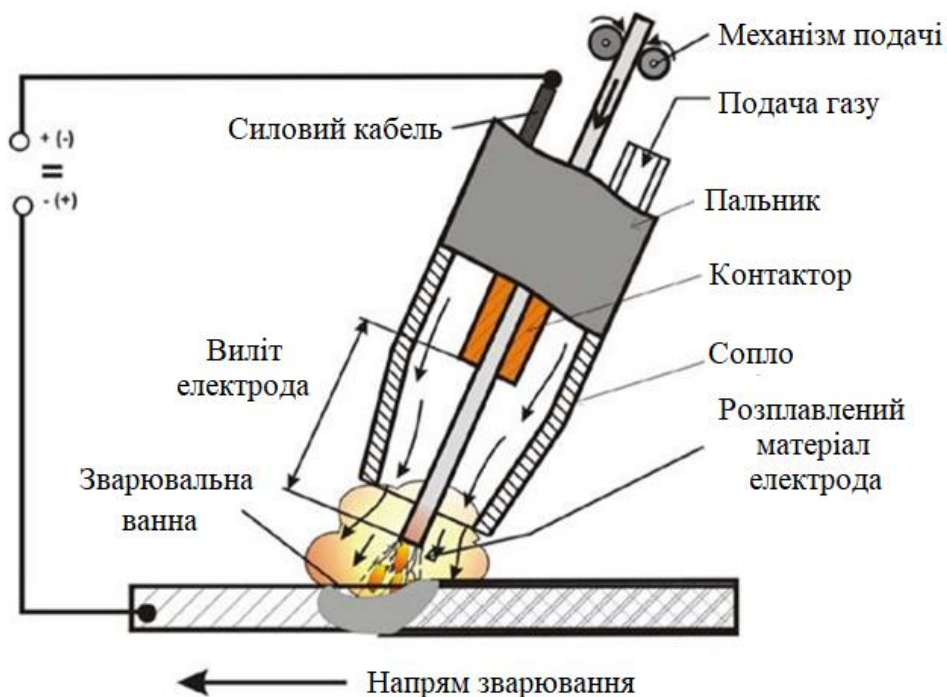


Рисунок 2.1 – Схема процесу MIG-паяння

Процес MIG-паяння є альтернативою електродуговому MIG/MAG зварюванню під час з'єднання тонких листів нелегованої сталі та листової



сталі з різними захисними покриттями. У порівнянні зі зварюванням характерними особливостями зварювання твердим припоєм є наступні [21]:

- низька тепловіддача, що особливо важливо при з'єднання тонких листів (значно менші деформації);
- збереження антикорозійного покриття основного металу під час зварювання листів із захисним покриттям;
- стабільне горіння дуги і мінімальна кількість бризок;
- можливість запобігання від плавлення країв з'єднуваних елементів;
- висока ефективність процесу та відповідна міцність з'єднань;
- естетичний вигляд зварних з'єднань та їх легка механічна обробка;
- можливість з'єднання різнорідних матеріалів і важкозварюваних металів;
- значно менші викиди диму при паянні, ніж при зварюванні, особливо під час з'єднання листів з оцинкованим покриттям.

Процеси MIG-паяння дедалі частіше включають так звані «низькоенергетичних процесів MIG/MAG зварювання», у яких підведення тепла обмежується за допомогою розширеної контролю напруги дуги і параметрів струму зварювання. Такий точний підхід до контролю вольт-амперних параметрів дозволяє отримати дуже хорошу якість при паянні оцинкованих елементів, а також можливість приєднання алюміній зі сталлю [18, 20, 21 ].

## 2.2. Характеристики струму під час MIG-паяння струмом змінної полярності

У методах зварювання з низьким енергоспоживанням із використанням імпульсного струму змінної полярності, форми струму та напруги є

циклічними [21]. На діаграмах, представлених на рисунку 2.2 представлені типові форми сигналів струму та напруги, які використовуються під час MIG-паяння зі змінною полярністю – імпульсним змінним струмом.

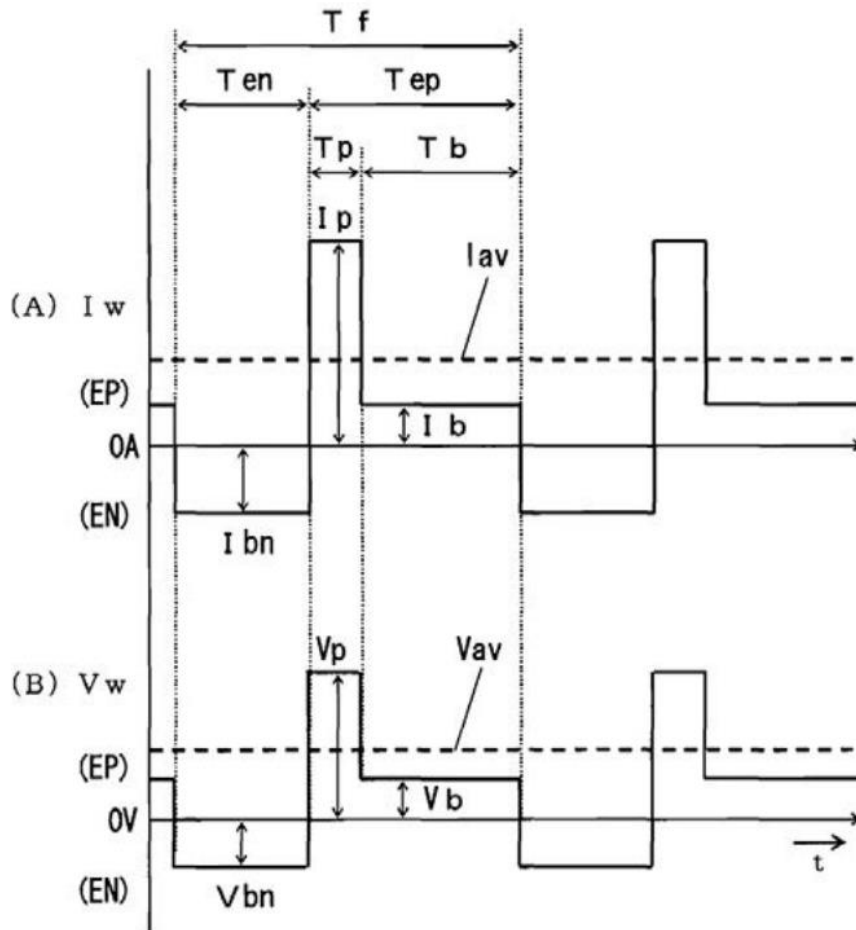


Рисунок 2.2- Сигнал струму (A) і сигнал напруги (B) під час зварювання змінної полярності – AC Pulse

У період негативної поляризації на електроді ( $T_{en}$ ) значення основного струму ( $I_{bn}$ ) нижче критичного значення струму, при якому спосіб перенесення металу змінюється від крапельного до дрібнокрапельного, що перешкоджає утворенню краплі на кінчик електродного дроту. Критичне значення струму залежить від типу захисного газу. Зміна поляризації дуже коротка і відбувається в період, коли висока напруга в кілька сотень вольт прикладається між дротом і основним металом, запобігає згасанню дуги й позитивний період поляризації електрода ( $T_{ep}$ ) ділиться на два етапи. Під час першої стадії ( $T_p$ ) в

пікові значення струму дають можливість формування і передачі краплі, тоді як під час другої стадії ( $T_b$ ) основні значення струму і напруги запобігають формування краплі [21].

Технічні рішення, що застосовуються в даний час у джерелах зварювання, включають, серед інших процеси AC Pulse, Cold Process і CMT Advanced. Ці методи допомагають зменшити бризки і деформації нагрітих елементів, а також дозволяють поліпшити механічні властивості елементів з'єднання і обмежити викид шкідливих газів, що утворюються під час процесу зварювання. Використання таких методів у промисловій практиці дозволяє підвищити ефективність за рахунок зменшення кількості проведених операцій з видалення бризок. Можливість застосування цих методів у виробництві забезпечується завдяки сучасному цифровому обладнанню точне регулювання та контроль параметрів дуги [21].

## 2.3 Матеріали для процесу MIG-паяння

### 2.3.1 Дроти для MIG-паяння та їх характеристики

Дріт CuSi3 ER CuSi-A – це універсальний зварювальний дріт на основі кремнієвої бронзи. Він призначений для зварювання різних сплавів на основі міді, таких як низьколеговані мідні сплави, латуні з низьким вмістом цинку, кремнієві, нікель-срібні та інші типи бронз, а також для наплавлення антифрикційних поверхонь, дугового паяння сталевих листів із захисним гальванічним цинковим покриттям.

Основною сферою його застосування є дугова MIG-пайка оцинкованих кузовних деталей в автомобільній промисловості. Також його застосовується в електротехнічній і хімічній промисловості, виробництві теплообмінників та калориферів. Під час зварювання виробів з мідних сплавів значної товщини рекомендується виконувати попереднє підігрівання кромки деталей до  $300^{\circ}\text{C}$ .

Зварювання рекомендується виконувати режим MIG-puls. Виготовляється в перерізі 0,8; 0,9; 1,0; 1,2; 1,6 та 2,4 мм і поставляється виробниками в катушках D200 вагою 5,00 кг та KS300 вагою 15,00 кг

Зварювальний дріт CuAl8 ER CuAl7 – присадковий матеріал на основі алюмінієвої бронзи, яка практично не застосовується для зварювання сплавів на основі міді. Основною сферою його застосування є наплавлення на сталеві поверхні антикорозійних покриттів, стійких до впливу солоної морської води та кислот, дугова металізація, а також дугове паяння сталевих листів із захисним гальванічним цинковим покриттям. В основному його застосовують під час виробництва обладнання для хімічної промисловості, суднобудуванні та процесах дугової пайки оцинкованих кузовних деталей.

Хімічний склад дротів, придатних до MIG-паяння наведені в тал. 2.1 [3].

Таблиця 2.1 - Хімічний склад дротів для MIG-паяння

Марка дроту	Хімічний склад										
	Al	Mn	Pb	Si	Zn	Sn	Ni	P	Fe	Asi	Інші
CuSi3 ER CuSi-A	0,01	0,75- 1,5	0,02	2,8- 4,0	0,2	0,2		0,02	0,3		0,4
CuAl8 ER CuAl7	6,0- 8,5	0,5	0,02	0,2	0,2						0,4
CuSn ER Cu	0,01	0,1- 0,5	0,01	0,1- 0,5		0,5- 1,0	0,05	0,02	0,03	0,03	
SF-CuAl8Ni2	7,5- 9,5	1,0- 2,5	0,02	0,2	0,2		1,8- 3,0		1,5- 2,5		0,4
CuMn13Al7 ER Cu MnNiAL	7,5- 8,3	12,0- 14,0	0,02	0,05	0,15	0,05	2,0- 2,5		2,0- 3,0		0,4
CuAl8Ni6	8,5- 9,5	1,0- 2,0	0,02	0,2	0,2		4,0- 6,0		3,0- 4,0		0,4
CuAl9Fe ER CuAl-A2	8,5- 11,0	1,0					1,0		0,5- 1,5		
CuSn6 ER CuSn-A	0,01		0,02		0,1	4,0- 6,0		0,1- 0,35	0,1		0,4

Дріт CuSn ER Cu – це низьколегований мідний дріт, призначений для зварювання чистої міді і низьколегованих мідних сплавів, коли основними вимогами до металу шва є забезпечення його висока електро- та теплопровідності. Незначне легування матеріалу дроту оловом підвищує розрідження зварювальної ванни.

Низьколегований мідний дріт SF-CuAl8Ni2 призначений для зварювання чистої міді і низьколегованих мідних сплавів. До нього ставляться тіж вимоги, що і для дроту CuSn ER Cu.

Механічні властивості дротів, придатних до MIG-паяння наведені в тал. 2.2 [3].

Таблиця 2.2 – Механічні властивості дротів для MIG-паяння

Марка дроту	Механічні властивості			
	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\Delta$ , %	НВ
CuSi3 ER CuSi-A	130	350	40	90
CuAl8 ER CuAl7	175	420	40	100
CuSn ER Cu	75	220	30	75
SF-CuAl8Ni2	-	430-540	30	130-140
CuMn13Al7 ER Cu MnNiAL	-	800-900	10	200-240
CuAl8Ni6	380	500	20	150
CuAl9Fe ERCuAl-A2		390-450	45	80-110
CuSn6 ER CuSn-A	150	300	20	120

Комплексний алюмінієво-бронзовий дріт CuMn13Al7 ER Cu MnNiAL із високими механічними властивостями має високу корозійну стійкість. Він відрізняється високими зварювально-технологічними характеристиками. Наплавлений ним метал має гладку поверхню, добре обробляється, тріщиностійкий та стійкий до утворення пор, має хороші механічні властивості та відмінну корозійну стійкість в кислих середовищах. Дріт

використовується для зварювання та наплавлення відновлювальних шарів на комплексні алюмінієві бронзи, особливо з високим вмістом марганцю, а також на сталі та сірій чавун. Завдяки високій стійкості до впливу солоних рідин та хорошій корозійній стійкості, цей матеріал застосовується в кораблебудуванні, хімічній та трубобудівній промисловості. Високий фрикційний коефіцієнт визначає ефективність використання даного матеріалу для наплавлення на вали, штампи, пресформи, пуансони, тертьові поверхні тощо. Перед зварюванням чи наплавленням поверхня деталі повинна бути очищена від іржі, окалини та мастил. Найкращі результати досягаються при зачистці поверхні у напрямку наплавлення. Це дозволяє покращити змочування основного металу. Товсті зварні кромки понад 5мм повинні мати V-подібну обробку. Масивні робочі поверхні слід підігрівати до 150-250°C.

CuAl8Ni6 – це дріт суцільного перерізу для зварювання мідно-алюмінієвих сплавів, а також сплавів нікель-алюміній-бронза. Матеріал дроту володіє високою стійкістю до корозії та зношування. Його застосовують в кораблебудуванні, під час виготовлення обладнання для нафтової галузі, ремонті рухомих установок та трубопроводів.

Дріт для зварювання мідно-алюмінієвих (Cu-Al) та мідних (Cu-Cu) сплавів застосовується зварювальний дріт CuAl9Fe ERCuAl-A2. Його також можна використовувати в процесах наплавлення нелегованих та низьколегованих сталей.

Зварювальний мідний дріт SF-CuSn6 – витратний матеріал, призначений для зварювання та ремонту виробів зі сплаву олов'янистої, литої та кованої бронзи, зварних з'єднань деталей, виготовлених з бронз, які мають високий вмістом олова, з деталями, зробленими з низьковуглецевих конструкційних сталей. Також вони придатні для наплавлення антифрикційних покриттів на сталеві та чавунні поверхні, а також зварювання деталей з чистих і низьколегованих безкисневих мідних сплавів.

Під час зварювальних робіт дріт має захищатися чистими інертними газами Ar, He або їх сумішами. При цьому слід враховувати, що застосування гелію призводить до суттєво збільшується температура провару. В такому випадку такий дріт можна застосовувати для роботи з товстостінними виробами. Дріт формує рівний, пластичний зварний шов з мінімальним утворенням бризок.

### 2.3.2 Захисні газы для MIG-паяння та їх характеристики

У процесах MIG-паяння найпопулярнішим захисним газом є аргон або його суміші з активними газами, що мають окисні властивості, наприклад вуглекислий газ або кисень. В активних сумішах вміст вуглекислого газу становить від 1% до 3%, тоді як кисень становить від 1% до 2% [3]. Рекомендації до застосування захисних газів з різними дротами для MIG-паяння наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 - Рекомендації до застосування захисних газів в процесах MIG-паяння

Марка дроту	Захисний газ
1	2
CuSi3 ER CuSi-A	I1 (Ar 100%) I2 (He 100%) I3 (Ar + 5...95% He) M13 (98%Ar + 2%O2)
CuAl8 ER CuAl7	I1 (Ar 100%) I2 (He 100%) I3 (Ar + 5...95% He) M13 (98%Ar+ 2%O2)
CuSn ER Cu	I1 (Ar 100%) I2 (He 100%) I3 (Ar + 5...95% He)

## Закінчення таблиці 2.3

1	2
SF-CuAl8Ni2	Ar 100% (Аргон, I1) He 100% (Гелій, I2) Ar + (5-95)% He (I3) Ar + 30%He (I3, H3) Ar + 50%He (I3, H5) Ar + 75%He (I3, H2) Ar + 1%O2 (M13) Ar + 2%O2 (M13)
CuMn13Al7 ER Cu MnNiAL	Аргон: DIN 32526 I1 Витрати газу: 14-18 л/хв.
CuAl8Ni6	I1 (Ar 100%) I2 (He 100%) I3 (Ar + 5...95% He)
CuAl9Fe ERCuAl-A2	Аргон: DIN 32526 I1 Витрати газу: 14-18 л/хв.
CuSn6 ER CuSn-A	I1 (Ar 100%) I2 (He 100%) I3 (Ar + 5...95% He)

Захист розплавленого припою від доступу повітря за допомогою інертного газу запобігає небажаним хімічним реакціям з матеріалом електрода і рідким металом у зварювальній ванні. Створення захисної зони активними газами, є вирішальним аспектом для перенесення присадкового матеріалу. Підвищена змочуваність матеріалу разом із покращенням здатності припою до розтікання допомагає отримати кращу естетичність паяного шва. Ці газы також додатково збільшують стабільність горіння дуги, однак вони є причиною зниження пластичних властивостей з'єднання. Стабільність дуги в поєднанні з нижчим значенням струму при низькоенергетичних методах підвищує якість і



зовнішній вигляд шва, а також розкислює цинковий шар у зоні з'єднання [16, 21-24].

#### 2.4 Аналіз досліджень впливу енергії процесу MIG-паяння на параметри паяних швів

На процес формування паяного шва суттєвий вплив мають значення погонної енергії процесу зварювання. Величину погонної енергії процесу механізованого зварювання розраховують за формулою:

$$Q = \frac{q}{V} = \frac{\eta \cdot I \cdot U}{V}, \text{ Дж/см} \quad (2.1)$$

де  $q$  – ефективна теплова потужність, Дж/с;

$\eta$  – ефективний ККД процесу нагріву деталей в середовищі аргону;

$U$  – падіння напруги дуги, В;

$I$  – сила зварювального струму, А;

$V$  – швидкість MIG-паяння, см/с.

Вимірювання параметрів паяних швів, які зварних проводять відповідно до схеми, представленої на рис. 2.3.

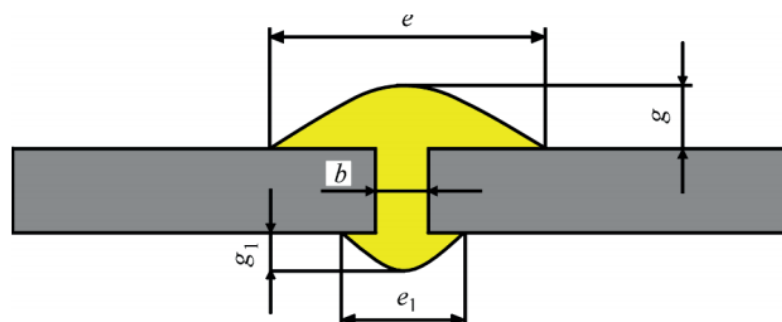


Рисунок 2.3 - Схематичне зображення параметрів паяного шва

$e$  – ширина лицьового посилення;  $e_1$  – ширина зворотного посилення;

$g$  – висота лицьового посилення;  $g_1$  – висота зворотного посилення;

$b$  – величина паяльного зазору

Зовнішній вигляд зразків оцинкованої сталі, отриманих із застосуванням MIG зварювання свідчив про низьку якість формування зварних швів (рис. 2.4, *a*), наявність пористості, обумовленої випаровуванням цинку з поверхні основного металу.

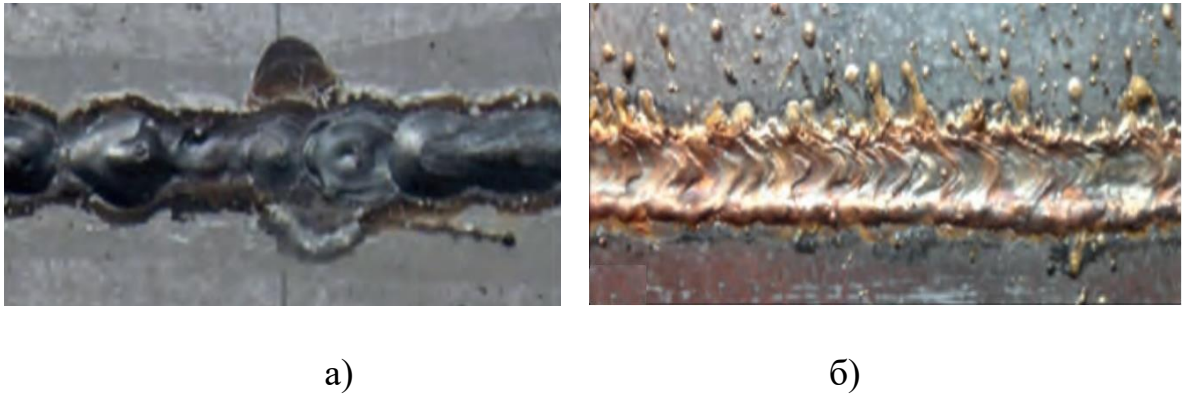


Рисунок 2.4 - Зовнішній вигляд стикового шва оцинкованої сталі, отриманого MIG-зварюванням (*a*) та MIG-паянням (*б*)

В процесі MIG-паяння може відбуватися розбризування присадкового матеріалу зумовлене вигорянням та випаровуванням цинку, що є суттєвим недоліком даного процесу (рис. 2.4, *б*).

При MIG-паянні стикових швів нержавіючої сталі спостерігається формування щільних паяних швів без пор дефектів і майже без розбризування припою (рис. 2.5).

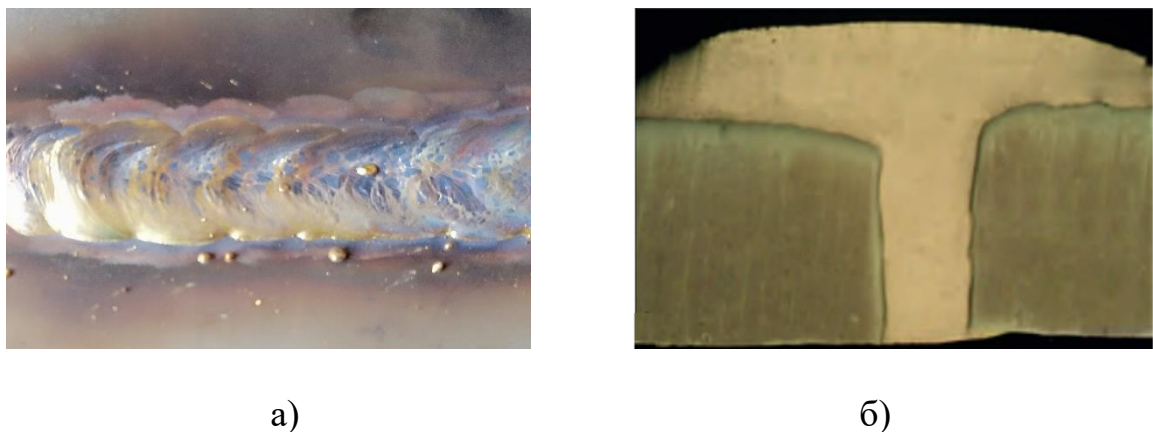


Рисунок 2.5 - Зовнішній вигляд (*a*) та макроструктура (*б*) паяного стикового з'єднання нержавіючої сталі, отриманого з застосуванням MIG-паяння

В машинобудуванні широко використовуються напускні зварні з'єднання. Як показали попередні експериментальні дослідження, отримання таких з'єднань потребує незначного коректування процесу паяння. Так, пальник розміщується під кутом до вертикальної поверхні пластин основного металу.

Оскільки вертикальне положення пальника приводить до відхилення дуги в сторону верхньої пластини, на відпрацьованому режимі спостерігається хороше формування напускного з'єднання з формуванням повної галтельної ділянки (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 - Лицьова сторона паяного напускного з'єднання конструкційної сталі

Результати досліджень впливу погонної енергії на геометричні параметри паяних швів показали, що висота посилення  $g_1$  зворотного шва плавно зростає при збільшенні погонної енергії (рис. 2.7, *a*). Це призводить до збільшення об'єму металу зі зворотної сторони шва і негативно впливає на витрати присадкового матеріалу (рис. 2.7, *a*).

Інші результати спостерігається для висоти лицьового посилення  $g$ , яке зменшується з підвищенням погонної енергії. В той же час ширина лицьового посилення  $e$  спочатку зростала до 4,5 мм. Це тривало до значень погонної енергії в межах 590...750 Дж/см, після чого значення посилення почало знижується, а починаючи з 916 Дж/см його значення стабілізується [7].

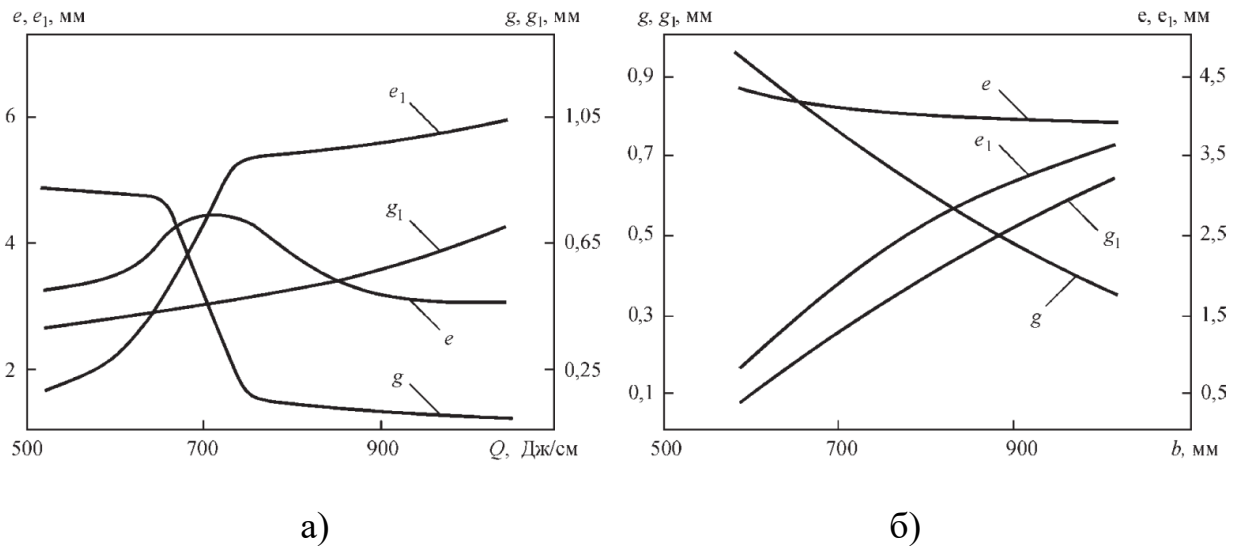


Рисунок 2.7 - Залежність геометричних параметрів паяного шва від погонної енергії (а) та величини зазору (б): ширина  $e_1$  і висота  $g_1$  зворотного посилення; ширина  $e$  та висота  $g$  лицьового посилення

Проведені дослідження з впливу погонної енергії на формування паяних стикових з'єднань показують, що якісні шви з оптимальним посилення формуються при погонній енергії в межах 520...590 Дж/см. При паянні напускових швів величину погонної енергії необхідно коректувати з урахуванням геометричних параметрів з'єднань [7].

В процесі паяння деталей без зазору існує ймовірність часткового заповнення капілярного зазору припоєм. Проведеними дослідженнями з впливу величини зазору на якість формування паяних стикових з'єднань встановлено, що зазор відіграє значну роль не тільки для формування шва, а й на витрату присадкового металу та теплові вкладення в основний метал. Експерименти проводили для з'єднань із зазором в межах 0,2...0,6 мм. З отриманих результатів випливає, що при сталих значеннях  $I, U, V$  та швидкості подачі дроту зі збільшенням зазору ширина лицьового посилення  $e$  дещо зменшується, а зворотного  $e_1$  – різко збільшується (рис. 7, б). Це призводить до зменшення висоти лицьового посилення  $g$  і збільшення висоти зворотного посилення  $g_1$ .

## Висновки за розділом

Теоретичний аналіз процесу MIG-паяння свідчить про його значну схожість зі звичайними процесами MIG/MAG. Основна різниця полягає у використанні латунних і бронзових присадкових матеріалі на основі міді. Ще однією відмінністю процесу паяння від зварювання є застосування інертних захисних газів, або їх сумішей в спеціальних пропорціях.

Також теоретичні дослідження свідчать, що для процесів MIG-паяння паяння потрібна менша погонна енергія, яка вводиться в шов. Це пояснюється нижчою температурою плавлення мідних дротів та кращою теплепередачею.

### 3. МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1. Опис експериментального обладнання

Для експериментальних досліджень використовували зварювальний півавтомат Trans Puls Synergic (TPS) 2700 СМТ інверторного типу фірми Fronius з мікропроцесорним керуванням та вбудованим 4-роликівим механізмом подачі зварювального дроту.



Рисунок 3.1 – Установка для виконання процесу MIG-паяння

Апарат був оснащений пальником Fronius PullMig з додатковим механізмом подачі дроту. З основним механізмом подачі дроту він з'єднаний шланговим пакетом Pull Mig Job Master з демпферним пристроєм. Зварювання виконували в захисному середовищі чистого аргону (Ar 100 %) в автоматичному режимі за допомогою зварювальної колони APS, призначеної для лінійного переміщення пальника зварювального автомата відносно зони зварювання (виконання лінійних зварних швів) [13-14].

### 3.2 Налаштування апарата на необхідний режим роботи

Для налаштування параметрів роботи зварювального апарату, необхідних для зварювання, потрібно за допомогою кнопки «Метод зварювання» (1) вибрати потрібний метод зварювання.



Рисунок 3.2 – Панель керування зварювального півавтомата TPS 2700 CMT

Присадковий матеріал та захисний газ вибирають за допомогою кнопки «Тип матеріалу» (3). Для процесів MIG-паяння доступні наступні види присадкових матеріалів:

- 6 ER CuSi-A CuSi 3
- 7 ER CuAl-A CuAl 9
- 15 ER CuSi-A CuSi 3

Якщо вибрати інші присадкові матеріали або захисні гази зварювальний апарат всеодно буде виконувати процес зварювання, однак налаштування параметрів процесу будуть не точними, що може відобразитися на якості процесу MIG-паяння.

Натискаючи на кнопки «Режим роботи» (2) вибирають потрібний режим роботи апарата (2-тактний, 4-тактний, спеціальний 4-тактний або точкове зварювання). Після цього за допомогою кнопки «Діаметр дроту» (4) налаштовують потрібний діаметр дроту [25].

За допомогою кнопки (5) «Вибір параметра» вибирають параметр, через який буде задаватися потужність зварювання: товщина зварювальної деталі, струм зварювання або швидкість подачі дроту. Потрібне значення вибраного параметра налаштовують за допомогою регулятора 9. Значення товщини деталі, струму зварювання, швидкості подачі дроту та напруги зварювання відобразатиметься на розташованому над ним цифровому дисплеї (6). Однак, для режиму Standard швидкість подачі дроту задається автоматично зі значенням від 0,5 м/хв (19.69 ірм.) до 22,0 м/хв (866.14 ірм.). Зварювальна напруга може змінюватися в межах 10,0 – 34,0 В. Дійсні значення параметрів роботи зварювального апарата відобразатимуться на дисплеях безпосередньо під час виконання зварювання.

В налаштуваннях зварювального апарата доступна також функція корекції динаміки короткого замикання в момент переходу крапель металу.

Залежно від обраного присадного матеріалу та діаметра дротяного дроту корекція динаміки дуги дозволяє регулювати різні значення:

- налаштування додаткового струму для керування тепловим впливом на матеріал:

-5 мінімальний додатковий струм

0 нейтральний додатковий струм

+5 максимальний додатковий струм

Потреба корекції підвищення виникає у разі застосування присадкових матеріалів CuSi 3/100% Ar/0,8 мм, CuSi 3/100% Ar/1,0 мм та CuSi 3/100% Ar/1,2 мм [25].

- корекція динаміки використовується для зміни динаміки короткого замикання в момент переходу крапель металу:

-5 більш жорстка та стабільна дуга



0 нейтральна дуга

+5 м'якша дуга з меншою кількістю бризок

Потреби в корекції динаміки виникає у разі застосування дротів на основі міді немає.

- пульсування дуги при гарячому старті:

-5 - 0 імпульсів

+5 - 100 імпульсів

Потреби корекції пульсування при гарячому старті в режимі MIG-паяння немає.

- час гарячого старту налаштовують в межах:

-5 час гарячого старту = 0

+5 час гарячого старту = 200 мс

Потреба корекції пульсування при гарячому старті виникає у разі застосування присадкового матеріалу CuAl 5 Ni 2/100% Ar/1,0 мм.

- корекція імпульсу для плавного регулювання сили відриву крапель може встановлюватись як:

-5 невелика сила відриву крапель

0 нейтральна сила відриву крапель

+5 підвищена сила відриву крапель

Потреба корекції імпульсу виникає у разі застосування присадкових матеріалів CuAl 8/100% Ar/1,0 мм <sup>2)</sup> та CuSi 3/100% Ar/1,0 мм <sup>2)</sup>.

Індекс 2 означає про задану комбінацію графічної характеристики СМТ та імпульсної графічної характеристики.

Для налаштування параметрів корекції дуги, як і для інших способів слід за допомогою кнопки (8) (рис. 3.2) «Вибір параметра» вибирають потрібний параметр. Далі за допомогою регулятора (9) налаштовують потрібне значення вибраного параметра. Це значення відображається на розміщених над ним цифровому дисплеї 8.

### 3.3 Результати дослідження впливу режиму наплавлення на форму та якість процесу MIG-паяння

Для вирішення поставленого в роботі завдання на першому етапі проводили наплавлення валиків спеціальним мідно-кремнієвим дротом  $\text{CuSi}_3$  діаметром 1,2 мм. Наплавлення здійснювали на пластині товщиною 3 мм зі сталі 09Г2С.

В процесі досліджень валики наплавляли в чотирьох різних режимах роботи джерела живлення:

Standard – стандартний;

Synergic – синергетичний;

Pulse Synergic – пульсуючий синергетичний;

Cold Metal Transfer – холодне перенесення металу [16, 25].

Джерело живлення налаштовувалось на струм зварювання  $I_{зв} = 155 \text{ А}$ , а швидкості зварювання (швидкості переміщення пальника) забезпечувалась зварювальною колоною на рівні  $V_{зв} = 2,5 \text{ м/хв}$ . Загальний вигляд отриманих наплавлених валиків наведено на рис. 3.3.



Рисунок 3.3 - Наплавлені валики методом MIG-паяння в режимах: CMT – Cold Metal Transfer; PS – Pulse Synergic; S – Synergic; St – Standard

Як бачимо з рисунка 3.3 найкраща якість формування паяного валика була отримана під час наплавки в режимі «Synergic». Дуга при цьому горіла стабільно, без розбризування розплавленого металу електродного дроту.

Під час наплавлення валиків в режимах CMT і Pulse Synergic спостерігалось незначне розбризування розплавленого металу та несплавлення валиків з основним матеріалом.

Найгірша якість валиків була отримана при MIG-паянні в режимі Standard. Дуга горіла нестабільно з обривами, метал розбризувався, шов був нерівномірний з підрізами та місцями не сплавлявся з основним металом.

### 3.4 Результати дослідження параметрів процесу MIG-паяння з врахуванням синергетичного ефекту роботи зварювального джерела живлення

Джерело живлення TPS 2700 CMT, як і більшість сучасних зварювальних півавтоматів, здатне забезпечувати ефект синергетичного керування. Цей ефект (синергетика) базується на використанні мікропроцесорних систем (мікроконтролерів) для вибору та забезпеченню оптимальних величин, параметрів імпульсів і виду зварювального струму, з урахуванням марки, товщини та властивостей металу виробу, а також особливостей зварювальних матеріалів: діаметра та марки зварювального дроту, виду та складу захисного газу тощо. Синергетика дозволяє користувачу змінювати всі налаштування зварювального апарата, змінюючи лише один з параметрів процесу зварювання. Якщо, наприклад, змінити на апараті товщину зварюваних деталей, це спричинить зміну зварювального струму та напруги, швидкості подачі дроту і вплине на індуктивність дуги і кількість імпульсів в ланцюзі змінного струму [2, 6].

Другий етап досліджень полягав у визначенні впливу синергетики на параметри процесу MIG-паяння. В налаштуваннях джерела живлення задавалась постійна товщина зварюваної деталі та визначали значення струму зварювання  $I_{зв}$ , швидкості подачі дроту  $V_d$ , та напруги зварювання  $U_{зв}$  на різних

режимах роботи півавтомата. Отримані результати досліджень наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Параметри процесу MIG-паяння металу товщиною 3 мм на різних режимах роботи зварювального півавтомата TPS 2700 CMT

Режим MIG-пайки	Товщина деталі $\delta$ , мм	Струм зварювання $I_{зв}$ , А	Швидкості подачі дроту $V_d$ , м/хв	Напруги зварювання $U_{зв}$ , В
Synergic	3	158	5,0	14,7
Pulse Synergic		89	2,9	19,6
Cold Metal Transfer		225	9,6	20,5
Standard*		-	0-22	17,5

\* для режиму Standard джерело живлення Fronius TPS 2700 CMT відображає поточні значення зварювального струму та швидкості подачі дроту під час запалювання і горіння дуги.

В результаті досліджень встановлено, що задаючи постійне значення товщини зварюваних деталей на різних режимах роботи мікропроцесорна система джерела живлення TPS 2700 CMT задає різні значення інших параметрів процесу зварювання. За сталої швидкості зварювання це призводить до отримання зварних швів з різними геометричними параметрами.

### 3.5 Результати дослідження режимів MIG-паяння на параметри швів

Як вже згадувалось в п. 3.4, режим роботи джерела живлення може впливати на форму та параметри паяних швів. Тому дослідженнями передбачалось визначення геометричних параметрів наплавлених валиків з мідного сплаву на поверхні конструкційної сталі, виконаних на різних режимах роботи джерела живлення.

Розміри наплавлених валиків вимірювали електронним штангенциркулем з точністю до 0,01 мм (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 - Вимірювання розмірів зварного шва

Середні значення результатів вимірювання ширини та висоти наплавлених валиків наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 - Параметри зварних валиків, отриманих методом MIG-паяння на конструкційній сталі товщиною 3 мм на різних режимах роботи зварювального півавтомата TPS 2700 СМТ

Режим MIG-пайки	$q$ , мм	$e$ , мм	Вигляд шва
Synergic	1,58	6,34	
Pulse Synergic	2,21	8,28	
Cold Metal Transfer	2,27	12,88	
Standard	2,38	9,93	

В результаті досліджень встановлено, що синергетичний ефект керування працює тільки в межах обраного режиму. Встановлені межі регулювання джерела живлення для виконання процесу MIG-паяння наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Параметри процесу MIG-паяння зварювальним півавтоматом  
TPS 2700 CMT

Режим MIG-пайки	Товщина деталі $\delta$ , мм		Струм зварювання $I_{зв}$ , А		Швидкості подачі дроту $V_d$ , м/хв		Напруги зварювання $U_{зв}$ , В	
	min	max	min	max	min	max	min	max
Synergic	0,8	5,3	58	270	2,0	8,9	12,4	25,2
Pulse Synergic	0,6	5,9	17	270	1,0	10,2	15,8	25,8
Cold Metal Transfer	0,6	2,9	23	225	0,8	9,6	6,5	20,5
Standard**	-	-	-	-	0,5	22	17,2	

\*\* в режимі Standard для джерела живлення Fronius TPS 2700 CMT можна регулювати тільки швидкість подачі дроту. Інші параметри можна визначити тільки під час горіння дуги.

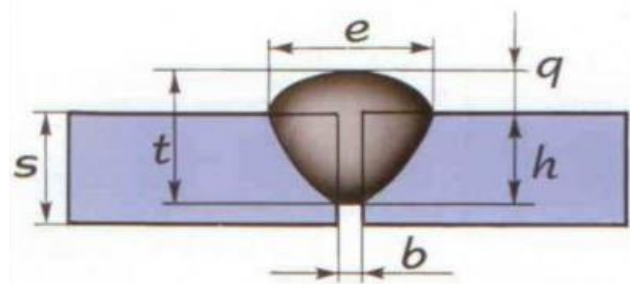
З отриманих результатів можна зробити висновок, що при постійній товщині деталей на різних режимах зварювання необхідно додатково корегувати параметри струму, подачі дроту та швидкості зварювання.

### 3.6 Вплив параметрів MIG-паяння на коефіцієнти форми та опуклості шва

Оскільки, одним з основних завдань технологічного процесу MIG-паяння є отримання з'єднань деталей необхідної якості, яка характеризується властивостями металу шва та деталей в біляшовній зоні, а також їх геометричними параметри, то одними з основних характеристик паяного шва, які визначаються його геометричними параметрами є коефіцієнт форми шва  $K_\phi = e/t$  та коефіцієнт опуклості шва  $K_o = e/q$  (див. рис. 3.5).

Шляхом зміни параметрів процесу паяння (наприклад полярності або динаміки дуги) можна забезпечити зменшення ширини шва зі збільшенням глибини проплавлення і навпаки. В першому випадку це призведе до зменшення коефіцієнтів форми та опуклості, а в іншому - до їх збільшення.

Збільшення сили струму буде призводити до збільшення глибини проплавлення  $h$  і зменшення підсилення шва



$q$ . В результаті це забезпечує зниження коефіцієнта форми  $K_f$  та коефіцієнта опуклості шва  $K_o$ . Регулюванням величини зварювального

Рисунок 3.5 - Геометричні параметри стикового зварного шва

$b$  – зазор в стику;  $s$  – товщина деталі;  
 $e$  – ширина шва;  $t$  – товщина шва;  $h$  – глибина проплавлення  
 $q$  – підсилення шва

струму змінюють глибину проплавлення основного металу. Вища швидкість зварювання дає меншу ширину шва, що в свою чергу призводить до зменшення коефіцієнта форми та збільшення коефіцієнта опуклості.

### 3.7 Результати MIG-паяння різних видів з'єднань

Як вже було згадано раніше, в процесі MIG-паяння температура плавлення присадкового дроту значно менша ніж температура плавлення сталі. Матеріал зварюваних деталей не розплавляється, а розплав електрода лягає зверху не змішуючись з ним. З'єднання відбувається на молекулярному рівні, а його міцність буде залежати від площі контакту припою з кромками деталі та якості його проникнення в технологічні зазори.

Зразки поперечних перерізів зварних швів пластин з конструкційної сталі, виконаних методом MIG-паяння представлені на рис. 3.6.

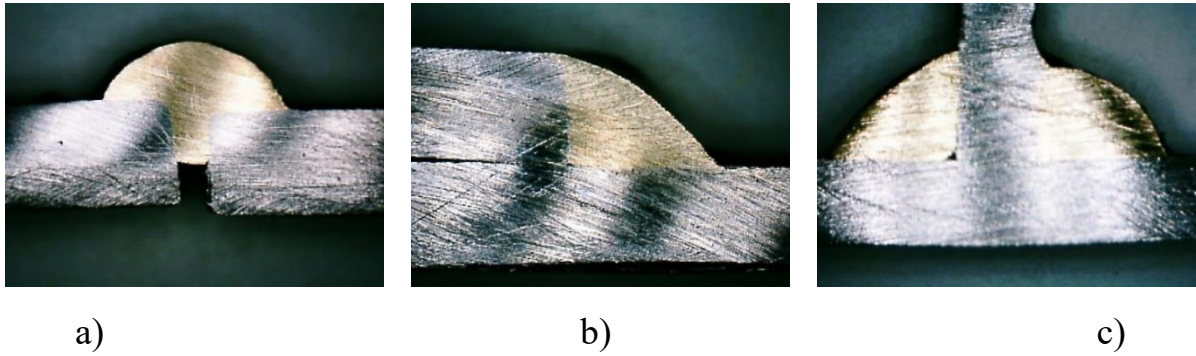


Рисунок 3.5 - Поперечні перерізи зварних швів

a – стиковий; b – напускний; c – тавровий

Як бачимо, метал розплавленого електродного дроту формує шов не змішуючись з основним металом деталі. Оскільки основний метал не досягає температури плавлення, то його структура та властивості не змінюється, а ризик пропалювання тонкого листового матеріалу зменшується. Крім того, при відсутності змішування металів електрода і деталі під час зварювання деталей встик без зазору з аналізу геометричних параметрів шва можна виключити глибину проплавлення  $h$ , а товщина шва  $t$  буде рівна величині його підсилення  $q$  ( $t = q$ ).

При порівнянні режимів MIG-паяння чітко видно, що в режимах Synergic та СМТ зварюванні валик шва є більш однорідними і рівномірними без слідів розбрикування.

Аналіз розмірів наплавлених валиків (рис. 3.3 і 3.4), виконаних на різних режимах, показав, що підсилення шва  $q$  для режиму СМТ суттєво збільшується в порівнянні з іншими режимами на нижчих струмах зварювання. Також аналіз показав, що зі збільшенням струму зварювання ширина шва збільшується. Характер зміни цієї величини однаковий для всіх режимів MIG-паяння. Аналогічна залежність спостерігається і для швидкості зварювання. Зі зростанням швидкості переміщення пальника ширина шва зменшується. Однак, для забезпечення рівномірності поверхні шва та зниження розбрикування для режимів СМТ і Standard швидкість зварювання має бути в 1,5-2 рази вищою, ніж для режимів Pulse Synergic і Synergic при тих же параметрах процесу.



## Висновки за розділом

В результаті проведених досліджень встановлено, що процес MIG-паяння сталі за допомогою зварювального півавтомата апаратом Fronius TPS 2700 СМТ має певні особливості налаштування технологічних параметрів на різних режимах його роботи. Синергетика джерела живлення дозволяє задавати основні параметри процесу в таких межах:

- товщина зварюваних деталей – 0,6...6 мм;
- струм зварювання – 17...270 А;
- напруга зварювання – 6,5...25,8 В;
- швидкість подачі дроту – 0,5...22 м/хв.

Найкраща якість MIG-паяння досягається при роботі зварювального півавтомата в режимах Synergic та СМТ. Для зварювання листової сталі товщиною 1...3 мм на цих режимах струм зварювання слід задавати в діапазоні 90...160 А при швидкості подачі дроту 3...5 м/хв відповідно.

На геометричні параметри швів також впливає швидкість зварювання. Зі збільшенням швидкості переміщення пальника ширина шва зменшується, а отже опуклість шва зростає. Тому для отримання методом MIG-паяння з'єднань необхідної якості слід забезпечувати сталу швидкість зварювання.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Аналіз потенційних небезпек

При роботі на напівавтоматі в суміші захисних газів з метою попередження нещасних випадків необхідно дотримуватися ряду заходів, передбачених законами про охорону праці та чинними правилами та інструкціями.

Ураження електричним струмом, опіки, отруєння газами - найбільш характерні випадки травматизму при зварюванні в суміші захисних газів.

Ураження електричним струмом - найбільш частий вид травматизму при зварюванні. Причинами поразки струмом є дотик до голих струмоведучих частин електроустаткування, відсутність або недоброякісність захисних засобів і заземлюючих пристроїв.

В напівавтоматах, включаючи джерела живлення, повинна бути виключена можливість випадкового дотику до частин, що знаходяться під напругою вище допустимого для зварювального ланцюга, і виключена можливість появи небезпечної напруги на частинах, нормально знаходяться без напруги (корпусу джерел живлення, шаф, верстатів). Для цього необхідно ізолювати дроти, в першу чергу підводять струм до зварювального обладнання від силової мережі 220 або 380 В. Затискачі для приєднання проводів від силової мережі повинні бути ізолювані від корпусу і прикриті кришкою або козирком [11].

У випадку пробою ізоляції обмоток, з'єднаних з силовою мережею, під високою напругою можуть виявитися корпуси зварювального обладнання, тому вони повинні бути заземлені.

При пошкодженні ізоляції між обмотками зварювального трансформатора його вторинна обмотка буде з'єднана з силовою мережею через первинну обмотку. Щоб уникнути можливого при цьому ураження електричним струмом, затискачі вторинної обмотки джерела живлення, від

якого йде провід до зварюваного виробу, повинні бути заземлені. Необхідно також заземлювати зварюваний виріб.

Здійснювати перемикання, приєднання або від'єднання в електротехнічних ланцюгах установок можна тільки після вмикання загального рубильника або пускача. При ремонті й усуненні несправностей зварювальне обладнання повинно бути від'єднати від мережі живлення. Пересувні джерела зварювального струму під час їх пересування необхідно від'єднати від мережі. Забороняється користування зварювальними дротами з пошкодженою ізоляцією. З'єднання зварювальних дротів повинно проводитися паянням, зварюванням або з'єднувальними муфтами з ізолюючою обмоткою.

При роботі в особливо небезпечних приміщеннях, а також у відсіках суден, резервуарів джерела живлення повинні бути оснащені пристроєм автоматичного від'єднання напруги холостого ходу або пристроєм, понижуюча напруга в зварювального ланцюга до 12 В. Робота в закритих ємностях повинна проводитися не менше ніж двома особами, причому одна особа повинна мати кваліфікаційну групу з техніки електробезпеки не нижче III і знаходитися зовні.

Опіки тіла при напівавтоматичному зварюванні можуть бути викликані бризками розплавленого металу. Місця зварювальних робіт повинні бути очищені від горючих матеріалів у радіусі не менше 5 м. В процесі зварювання виділяється велика кількість газів, пилу і парів металу, що може призвести до захворювання дихальних шляхів зварника. Для уникнення цього необхідно постачати автомати газовідсмоктувачі, розташованими поблизу дуги. При зварюванні в закритих приміщеннях необхідно застосовувати витяжну вентиляцію [11].

## 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.

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 вгору починаючи з базових подій і закінчуючи головною. Значення подій вказуємо безпосередньо на символи зображення події. Ймовірності виробничих подій визначаємо за даними виробництва. Наприклад, базова подія "охорона праці". Для визначення ймовірності ми повинні встановити наскільки (%) від ідеального рівня здійснюється відповідний контроль на об'єкт. Якщо буде встановлено, що такий рівень контролю становить 20 або 30%, то ймовірність відповідно становить 0,2 і 0,3. При відсутності контролю ймовірність "не здійснення

контролю” становитиме 1, якщо контроль ідеальний, то відповідна ймовірність дорівнює 0. Для виконання математичних обчислень ймовірностей випадкових подій логіко-імітаційної моделі застосовують складені формули відповідно до положень.

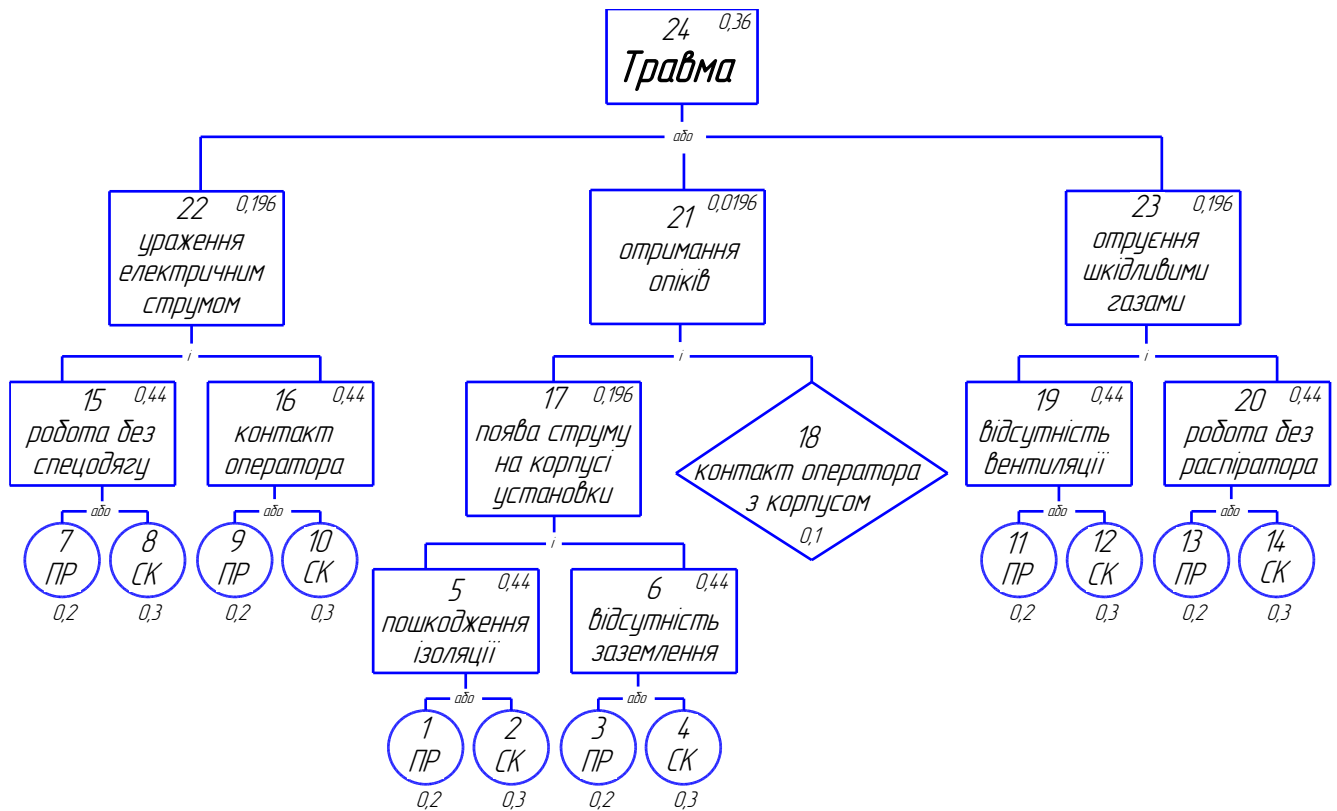


Рисунок 4.1 - Модель процесу формування та виникнення травми

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

Ймовірність події  $P_5$  визначаємо наступним чином

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

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

Ймовірність події  $P_{17}$

$$P_{17} = P_5 \cdot P_6 = 0,44 \cdot 0,44 = 0,194 \quad (4.2)$$

Ймовірність події  $P_{21}$

$$P_{21} = P_{17} \cdot P_{18} = 0,194 \cdot 0,1 = 0,0194 \quad (4.3)$$

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  $P_{24}$

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

$$P_{24} = 0,0194 + 0,194 + 0,194 - 0,0194 \cdot 0,194 - \\ - 0,0194 \cdot 0,194 - 0,194 \cdot 0,194 = 0,36$$

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 діяч на 100 робочих місць ймовірність виникнення травмонебезпечної ситуації становить 0,36 (36 %).

#### Висновки за розділом

В розділі проаналізовано основні потенційні небезпеки, які можуть виникати під час виконання зварювальних робіт в процесі ремонту рам вантажних причепів. Можливість виникнення небезпечних умов роботи становить 36 %.

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

## 5 ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ВАРТОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ MIG-ПАЯННЯ

### 5.1 Розрахунок капітальних вкладень

До складу капітальних вкладень на впровадження технологічного процесу MIG-паяння включаються витрати на придбання, доставку, монтаж нового обладнання, будівельні роботи, тощо:

$$K = C_{об} + C_{дм} + C_{тр} + C_{буд}, \quad (5.1)$$

де  $C_{дм}$  - витрати на монтаж та демонтаж обладнання, грн.;

$C_{буд}$  - вартість будівельних робіт,  $C_{буд} = 0$  грн;

$C_{об}$  - вартість обладнання, яке планується придбати, грн.;

$C_{тр}$  - витрати на транспортування обладнання, грн.;

Витрати на монтаж обладнання приймаються рівними 4 % від вартості обладнання, грн.

$$C_{дм} = 0,04 \cdot C_{об}, \quad (5.2)$$

Якщо планується встановлювати обладнання від фірми FRONIUS, то слід врахувати, що воно змонтоване на візках, має живлення від стандартної трифазної мережі змінного струму 380 В та використовує балони із захисним газом, то монтажні роботи не передбачаються, а отже  $C_{дм} = 0$  грн.

Прийнявши середню вартість зварювального апарата FRONIUS з можливістю виконання процесу MIG-паяння 7500 €, що в перерахунку на курс НБУ 43,7 грн/€ становитиме 327750 грн матимемо:

Витрати транспортування приймаються 2,5 % вартості устаткування, грн.

$$C_{тр} = 0,0025 \cdot C_{об}, \quad (5.3)$$

$$C_{тр} = 0,0025 \cdot 327750 = 819,38 \text{ грн}$$

Капітальні вкладення, грн.

$$K = 327750 + 819,38 = 328569,38 \text{ грн.}$$

Як бачимо, сумарні капіталовкладення на впровадження технології MIG-паяння, а саме придбання нового зварювального обладнання становитимуть 328569,38 грн.

## 5.2 Кошторис витрат за виконання робіт

Кошторис витрат на виконання робіт визначає загальну суму витрат виробничого підрозділу на плановий період та необхідний для розрахунку собівартості робіт підрозділу. У проектах з виготовлення металоконструкцій кошторис зазвичай складається за економічними елементами: заробітна плата робітників, нарахування на соціальне страхування, матеріали, запасні частини, накладні витрати.

До фонду заробітної плати включаються фонди основної зарплати. Він в свою чергу включає всі види оплати праці за фактично відпрацьований час.

Для розрахунку приймемо кількість робітників, зайнятих на дільниці зварювання - слюсарі 6 розряду в кількості 1 чол., та зварювальники – 1 людина

Заробітна плата робітників складатиме:

$$Z_o = C_{\text{год}} \cdot T \quad (5.4)$$

де  $C_{\text{год}}$  - годинна тарифна ставка робочого відповідного розряду, грн. Для розрахунків приймаємо  $C_{\text{год}} = 150$  грн.

$T$  - річний обсяг робіт, люд.год.

$$T = t_{\text{зм}} \cdot K_{\text{зм}} \cdot D \cdot n, \quad (5.5)$$

де  $t_{\text{зм}}$  – триволість зміни, год;

$K_{\text{зм}}$  – коефіцієнт використання часу зміни,  $K_p = 80\%$  [12];

$D$  – кількість робочих днів в році, ( $D = 259$  днів);

$n$  – кількість зварювальників, грн.

Тоді

$$T = 8 \cdot 0,8 \cdot 259 \cdot 1 = 1657,6 \text{ люд.год.}$$

Затрати на основну заробітну плату робітника тоді становитимуть:

$$Z_o = 150 \cdot 1657,6 = 248640 \text{ грн.}$$

Нарахування на зарплатню визначимо за формулою:



$$H_3 = Z_0 \cdot P_{пз} / 100, \quad (5.6)$$

де  $P_{пз}$  - відсоток нарахування на заробітну плату, грн. При утриманні із зарплат працівників податки 18% податку на доходи фізичних осіб (ПДФО) та 1,5% військового збору (ВЗ) для розрахунків можемо записати:

$$H_3 = 248640 \cdot 0,18 + 248640 \cdot 0,015 + 248640 \cdot 0,22 = 103185,6 \text{ грн}$$

Середньомісячна заробітна плата робітників, грн.

$$Z_{міс} = Z_0 / (n \cdot 12), \quad (5.7)$$

$$Z_{міс} = 248640 / (1 \cdot 12) = 20720 \text{ грн.}$$

Під час розрахунку роботи крім прямих виробничих витрат, необхідно враховувати також накладні витрати.

Вартість силової електроенергії на рік визначається за формулою:

$$C_e = W_e \cdot C_e, \quad (5.8)$$

де  $W_e$  - потреба в силіній електроенергії. При споживанні зварювальним апаратом  $w_e = 12,2 \text{ кВт} \cdot \text{год}$  матимемо

$$W_e = w_e \cdot D \cdot t_{зм} \cdot K_{зм} = 12,2 \cdot 259 \cdot 8 \cdot 0,3 = 4655,52 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

$C_e$  – вартість 1 кВт·год. силової електроенергії,  $C_e = 4,6 \text{ грн.}$

Тоді

$$C_e = 4655,5 \cdot 4,6 = 21415,39 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт обладнання можна прийняти 5% від його вартості, а виробничих будівель 3% вартості будинків [12]. Тоді

$$C_{тро} = 0,05 \cdot C_{об}, \quad (5.9)$$

$$C_{тро} = 0,05 \cdot 327750 = 16387,5 \text{ грн.}$$

Для визначення загального кошторису виконання робіт всі результати розрахунків зводимо в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – Основні статті затрат

Статті затрат	Сума, грн
Основна заробітна плата	248640
Нарахування на заробітну плату	103185,6
Вартість електроенергії	21415,39
Вартість обслуговування і ремонту нового обладнання	16387,5
Всього	389628,49

### 5.3 Розрахунок показників економічної ефективності

Передбачуваний прибуток підрозділу з урахуванням всіх відрахувань, визначимо за формулою:

$$\Pi = T_o \cdot C_{\text{год}}, \quad (5.10)$$

де  $C_{\text{год}}$  - мінімальна вартість нормогодини роботи для клієнта, грн.  $C_{\text{год}} = 350 \dots 810$  грн;

$$\Pi = 1657,6 \cdot 580 = 961408 \text{ грн.}$$

Чистий прибуток визначається за формулою:

$$\Pi_{\text{ч}} = \Pi - Z_{\text{н}}, \text{ грн} \quad (5.11)$$

де  $Z_{\text{н}}$  - накладні затрати, грн;

$$\Pi_{\text{ч}} = 961408 - 389628,49 = 571779,51 \text{ грн.}$$

Рентабельність капітальних вкладень становитиме:

$$P = \frac{100 \cdot \Pi_{\text{ч}}}{K}, \quad (5.12)$$

де  $K$  - капітальні вкладення, грн;

$$P = \frac{100 \cdot 571779,51}{328569,38} = 174 \%$$

Термін окупності капітальних вкладень, років

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{\Pi_{\text{ч}}} = \frac{328569,38}{571779,51} = 0,57 \text{ роки} \quad (5.13)$$

Техніко-економічні показники представлені у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 - Техніко-економічні показники

Показники	Значення
Трудомісткість робіт, люд год.	1657,6
Кількість робітників, осіб.	1
Середньомісячна заробітна плата, грн/міс.	20720
Накладні витрати, грн	389628,49
Орієнтовний дохід, грн	961408
Чистий дохід, грн	571779,51
Капітальні вкладення, грн	328569,38
Термін окупності, років	0,57

### Висновки за розділом

В результаті проведеного економічного розрахунку впровадження запропонованої технології, що заміна зварювального обладнання на більш продуктивне з можливістю виконання процесів MIG-паяння обійдеться підприємству в 328569,38 грн. При річному завантаженні обладнання 1657,6 люд.год. ці капіталовкладення окупляться за 0,57 року.

## ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

Процес MIG-паяння конструкційних, легованих та покритих антикорозійних сталей знаходить все більше застосування в різних галузях машинобудування. Стимулом до його впровадження є виробництво та застосування нових високоміцних та антикорозійних металів, для яких звичайні процеси електродугового зварювання є небажаними через значні термічні впливи, що призводять до зміни структури та властивостей металу в зоні зварного шва та біляшовній зоні.

Теоретичний аналіз процесу MIG-паяння свідчить про його значну схожість зі звичайними процесами MIG/MAG. Основна різниця полягає у використанні латунних і бронзових присадкових матеріалів на основі міді. Ще однією відмінністю процесу паяння від зварювання є застосування інертних захисних газів, або їх сумішей в спеціальних пропорціях.

В результаті проведених досліджень встановлено, що процес MIG-паяння сталі за допомогою зварювального півавтомата апаратом Fronius TPS 2700 СМТ має певні особливості налаштування технологічних параметрів на різних режимах його роботи. Синергетика джерела живлення дозволяє задавати товщина зварюваних деталей в межах 0,6...6 мм, струм зварювання в проміжку 17...270 А, напругу зварювання від 6,5 до 25,8 В, а швидкість подачі дроту – в межах 0,5...22 м/хв.

Найкраща якість MIG-паяння досягається при роботі зварювального півавтомата в режимах Synergic та СМТ.

На геометричні параметри швів також впливає швидкість зварювання. Зі збільшенням швидкості переміщення пальника ширина шва зменшується, а отже опуклість шва зростає. Тому для отримання методом MIG-паяння з'єднань необхідної якості слід забезпечувати сталу швидкість зварювання.

Впровадження запропонованої технології потребує сумарних капіталовкладень 328569,38 грн, які окупляться за 0,57 року.

## 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 дрів 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](http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page?id_doc=82838).
6. Квасницький В. В. Спеціальні способи зварювання. Навчальний посібник. Миколаїв: УДМТУ, 2003. 437 с.
7. Максимова С.В., Зволінський І.В., Юрків В.В. Геометричні параметри паяного шва та його структура при плазмовому паянні оцинкованої сталі. Автоматичне зварювання, №6, 2020. С. 35-39. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.06.06>
8. Матвієнків О.М. Збереження захисного покриття при з'єднанні оцинкованих труб дуговим паянням. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ: всеукр. наук.-техн. журн. Івано-Франківськ: Факел, 2016, № 4. С. 7-14.
9. Матвієнків, О. М. Напружено-деформований стан MIG-паяних з'єднань оцинкованих труб. Науковий вісник Івано-Франківського

національного технічного університету нафти і газу, (1(54). І. Франківськ: ІФНТУНГ, 2023. с. 23–30.

10. Методичні вказівки до практичних занять і самостійної роботи з дисципліни «Методи випробувань і досліджень металу шва і зварних з'єднань» для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» (перевидання) / Татарин Б.П., Підгурський М.І., Мариненко С.Ю. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2016. 109 с.

11. Пістун І.П., Березовецький А.П., Городецький І.М. Охорона праці на автомобільному транспорті: Навчальний посібник. Львів: «Тріада плюс», 2009. 320 с.

12. Польшаков В.І, Сахно Є.Ю. Економіка організація та управління технічним обслуговуванням і ремонтом машин. Київ: «Центр навчальної літератури», 2004. 328 с.

13. Швець О. П., Березовецький С. А., Коруняк П. С. Вплив параметрів режиму MIG-пайки на формування зварного шва. Perspectives of contemporary science: theory and practice. Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference. SPC "Sci-conf.com.ua". Lviv, Ukraine. 2024. Pp. 341-344.

14. Швець О., Березовецький С., Коруняк П., Баранович С., Шеремета Р. Вплив режимів MIG-паяння на параметри зварних швів з врахуванням синергетичного ефекту роботи зварювального півавтомата. Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія «Агроінженерні дослідження». 2024. № 28. с. 25-31.

15. Швець О.П. Вивчення обладнання для механізованого зварювання в середовищі захисних газів (MIG/MAG): методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи з дисципліни «Технології та обладнання зварювання металів і пластмас» студентами ОС «Бакалавр» спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування», 208 «Агроінженерія», 274 «Автомобільний транспорт», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Львів: ЛНАУ, 2018р. 19 с.

16. Швець О. П. Технології та обладнання зварювання металів і пластмас. Методичні рекомендації до виконання практичної роботи на тему «Вивчення конструкції та органів керування зварювального апарата Trans Puls Synergic 2700 СМТ» студентами ОС «Бакалавр» спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування», 208 «Агроінженерія», 274 «Автомобільний транспорт», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Дубляни: ЛНУП, 2023. 15 с.

17. Berczeli, M., Weltsch, Z. (2018) “Experimental Studies of Different Strength Steels MIG Brazed Joints”, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 46(2), pp. 63–68.

18. Miklós Berczeli<sup>1</sup>, Zoltán Weltsch. Experimental studies of different strength steels MIG brazed joints. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. 46(2), pp. 63-68, 2018.

19. MIG/MAG. Навчальні документи. [Електронний ресурс]: Режим доступу: [https://www.fronius.com/~/downloads/Perfect%20Welding/Training%20Documents/PW\\_TD\\_MIG\\_MAG\\_RU.pdf](https://www.fronius.com/~/downloads/Perfect%20Welding/Training%20Documents/PW_TD_MIG_MAG_RU.pdf).

20. Muthuraju K and Abburi Lakshman Kumar. Experimental studies of different thick steel sheets and variable clearance in MIG brazing. *Materials Science and Engineering* 912 (2020) 032078 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/912/3/032078

21. Piękna J., Pfeifer T., Mendakiewicz J. Influence of the shielding gas on the properties of VP MIG/MAG braze-welded joints in zinc coated steel sheets. *BIULETYN INSTYTUTU SPAWALNICTWA* No. 1/2014. P.p. 35-41.

24. Trans Synergic 4000/5000 Trans Puls Synergic 2700 Trans Puls Synergic 3200/4000/5000 TIME 5000 Digital CMT 4000 Advanced. Джерела струму MIG/MAG. Інструкція з експлуатації. URL: <https://www.fronius.com/~/downloads/Perfect%20Welding/Operating%20Instructions/42%2C0426%2C0114%2CRU.pdf>

25. Vinas J., Kascak L., Abel M. Mig brazed hot-dip galvanized sheets. *Lebanese Science Journal*. 2010. Vol. 11, Issue 2. P. 75–85.