

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ І УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ЗАОЧНОЇ ТА ПІСЛЯДИПЛОМНОЇ ОСВІТИ  
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему «**Дослідження втрат електродів під час ручного  
електродугового зварювання**»

Виконав: студент групи Маш-71з

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування  
(шифр і назва)

Глухой Василь Васильович

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

Дубляни 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ І УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ЗАОЧНОЇ ТА ПІСЛЯДИПЛОМНОЇ ОСВІТИ  
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

\_\_\_\_\_

Глухой Василь Васильович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження втрат електродів під час ручного електродугового зварювання»

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

затверджені наказом ЛНУП від 08 березня 2024 року №171/к-с

2. Строк подання студентом роботи: до 10 грудня 2024 року

3. Вихідні дані до работ: довідкова література, технічні характеристики каталоги зварювального обладнання, типові технологічні процеси зварювання та металевих конструкцій, методики розрахунку режимів зварювання, інструкції з охорони праці, технічні характеристики зварювальних апаратів та додаткової оснастки.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 4.1. Характеристика процесу ручного електродугового зварювання та електродів для нього; 4.2. Теоретичний аналіз технологічного процесу ММА-зварювання; 4.3. Методика та результати експериментальних досліджень; 4.4. Охорона праці.

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	Характеристика процесу РДЗ	27.09.24	
2	Теоретичний аналіз процесу ММА-зварювання	18.10.24	
3	Методика та результати експериментальних досліджень	08.11.24	
4	Охорона праці	18.11.24	
6	Оформлення пояснювальної записки	29.11.24	
7	Оформлення графічної частини	11.12.24	

Студент \_\_\_\_\_  
( підпис )

Глухой В.В.  
(прізвище та ініціали)

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

Швець О. П.  
(прізвище та ініціали)

**УДК 621.791**

**Глухой В. В.** «Дослідження втрат електродів під час ручного електродугового зварювання». / Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет природокористування, 2024. 76 с.

Проведено аналіз технологічного процесу ручного електродугового зварювання. Проаналізовано основні види та параметри покритих електродів для ручного електродугового зварювання.

Розроблено методику та проведено дослідження втрат електродів на різних режимах зварювання. Здійснено оцінку найбільш поширених електродів за комплексним показником якості. Встановлено залежності коефіцієнтів розплавлення, наплавлення та втрат електродів від зварювального струму, форсування дуги (напруги) та довжини дуги.

Розглянуто питання охорони праці під час виконання операцій ручного електродугового зварювання.

Табл. 22; рис. 12; бібліогр. джерел 22.

## ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСУ РУЧНОГО ЕЛЕКТРОДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТА ЕЛЕКТРОДІВ ДЛЯ НЬОГО	7
1.1 Загальні відомості про процес ручного електродугового зварювання	7
1.2 Загальні відомості про зварювальні електроди для ручного дугового зварювання (РДЗ)	10
1.3 Види та склад покриття зварювальних електродів	12
1.4 Класифікація та маркування електродів для РДЗ за ДСТУ	14
1.5 Аналіз деяких марок електродів та їх призначення	16
1.5.1 Електроди для зварювання вуглецевих та низьколегованих сталей	16
1.5.2 Електроди для нержавіючої сталі	16
1.5.3 Електроди для зварювання та наплавлення чавуну	18
1.5.4 Електроди для зварювання кольорових металів	19
1.6 Показники ефективності процесу дугового зварювання	20
Висновки за розділом	22
2 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ММА-ЗВАРЮВАННЯ	23
2.1 Технологія зварювання сталі штучними покритими електродами	23
2.2 Полярність підключення електродів	25
2.3 Вибір діаметра електрода і сили зварювального струму	26
2.4 Особливості роботи зварювальним апаратом при малому і великому струмі	29
2.5 Положення електроду при зварюванні	29
2.6 Особливості контролю зазору між електродом і металом	30
2.7 Прийоми формування зварного шва	31
Технічні та технологічні характеристики покритих електродів	32

2.9	Вибір техніки виконання швів	35
2.10	Визначення режиму ручного дугового зварювання	37
	Висновки за розділом	40
3	МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	41
3.1	Опис зварювального обладнання	41
3.2	Підготовка апарата до використання	45
3.3	Характеристики електродів, які використовувались в експериментальних дослідженнях	49
3.4	Методика зварювальних властивостей електродів	52
3.5	Методика та результати досліджень технологічних характеристик процесу РДЗ покритими штучними електродами	54
	Висновки за розділом	62
4	ОХОРОНА ПРАЦІ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ РОБІТ	63
4.1	Санітарно-гігієнічні характеристики зварювального виробництва	63
4.2	Вимоги до освітлення робочої зони	64
4.3	Аналіз впливу шумів і вібрації	64
4.4	Характеристика мікроклімат і вентиляції робочої зони	65
4.5	Електробезпека під час зварювального виробництва	67
4.6	Пожежна безпека під час зварювання труб	69
4.7	Моделювання процесу формування і виникнення травмонебезпечної ситуації під час зварювання	70
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	73
	БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	74

## ВСТУП

Дуговим електрозварюванням зветься процес утворення нероз'ємного з'єднання металів під дією електричної дуги. Сутність її полягає у тому, що під впливом електричної дуги, що має високу температуру (до 5000...7000°C), металеві деталі в місці їх з'єднання розігрівають до розплавленого стану та вводять присадковий матеріал, яким може бути і сам електрод. При спільній кристалізації основних та присадкових матеріалів утворюється зварний шов. Існують різні способи дугового електрозварювання, застосування яких обумовлюється конкретними технологічними умовами.

Ручне дугове зварювання плавким електродом складається у тому, що електрична дуга, що горить між основним матеріалом та електродом, розплавляє кромки основного металу та кінець електроду. Розплавлений метал заповнює зазор між кромками з'єднувальних деталей та після застигання утворює зварний шов. Усі електроди для цього способу зварювання мають спеціальне покриття, яке сприяє стійкому горінню дуги та забезпечує захист розплавленого металу від шкідливого впливу кисню та азоту, що входять до складу повітря.

Показниками ефективності процесу електродугового зварювання є продуктивність зварювання, яка залежить від значень зварювального струму та напруги на дузі. Ці параметри характеризують швидкість розплавлення електрода. Однак, при неправильному підборі параметрів процесу зварювання можуть відбуватися втрати електродів на розбризування та угар. Обсяг можливих втрат оцінюють за коефіцієнтом втрат. Однак, не всі виробники електродів надають чітку інформацію щодо можливості виникнення втрат електродів на різних режимах зварювання. Наші дослідження направлені на вирішення цієї проблеми, а отже тема кваліфікаційної роботи є актуальною.

# 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСУ РУЧНОГО ЕЛЕКТРОДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТА ЕЛЕКТРОДІВ ДЛЯ НЬОГО

## 1.1 Загальні відомості про процес ручного електродугового зварювання

Ручне дугове зварювання штучними покритими електродами (ММА - Manual Metal Arc, або SMAW - shielded metal arc welding) – найбільш поширений та універсальний метод з'єднання металевих деталей. Через простоту виконання цей ефективно використовують як початківці, так і досвідчені зварювальники. Саме з він дає уявлення про те, як працюють зварювальні системи, а також про взаємодію металів з електричним струмом. Майже всі матеріали можна зварювати за допомогою електродів. В промисловості даний процес широко використовують для зварювання сталевих конструкцій та трубопроводів як на величезних суднобудівних підприємств так і на звичайних виробничих цехах і невеликих домашніх ремонтних майстернях. Ручне дугове зварювання покритим електродом дає змогу отримувати зварні шви різних в будь-якому просторовому положенні. Крім того, зварювальник не залежить від наявності захисних газів і може легко працювати на вулиці навіть за несприятливих погодних умов, таких як вітер чи дощ [2, 4, 16].

У процесі ММА-зварювання застосовують покритий електрод, який складається з металевого стержня, на який нанесено шар спеціального покриття. Електрична дуга горить між кінцем електрода і деталлю. На початку зварювання дуга запалюється дотиканням кінця електрода до деталі. Під дією її тепла електрод плавиться і краплинки його розплаву переносяться дугою до розплавленої зварювальної ванни, де утворюється зварний шов.

Головною особливістю цього методу є поступове вкорочування електрода під час зварювання. Тому для підтримання постійної відстані між електродом і зварювальною ванною (довжини дуги), зварювальник повинен постійно подавати електродотримач у напрямку деталі. Ще однією особливістю зварювання покритим електродом є те, що його покриття плавиться та захищає



метал зварювальної ванни від шкідливого впливу атмосферного повітря, а також насичує зварювальний шов легуючими елементами. В завершенні процесу розплавлений метал твердне, утворюючи на поверхні шва шар шлаку, який необхідно видалити.

Для ММА-зварювання застосовують зварювальні апарати, які здатні генерувати необхідний зварювальний струм. Зварювальне обладнання має забезпечувати ефективну, безпечну і комфортну роботу. Для ручного дугового зварювання потрібні низька напруга та висока сила струму. Зварювальне джерело живлення перетворює доступну напругу мережі в значно нижчу зварювальну напругу. Водночас вона забезпечує високу силу струму, яка дає змогу розплавляти електроди різних діаметрів.

Для ручного дугового зварювання стержневим електродом сила струму є найважливішим параметром, який впливає на можливість утворення та якість зварного з'єднань. Тому рівень сили струму має залишатися незмінним, навіть якщо змінюється довжина дуги.

Щоб забезпечити цю вимогу, джерела живлення для ручного дугового зварювання покритими електродами мають спадаючу вольт-амперну характеристику (рис. 1.1) [4, 20].

Для утворення зварювальної дуги необхідно розірвати контур між електродом і деталлю. Під час ручного дугового зварювання металевим електродом контур розривають шляхом контактного підпалювання. Зварювальна дуга запалюється під час торкання електрода до деталі.

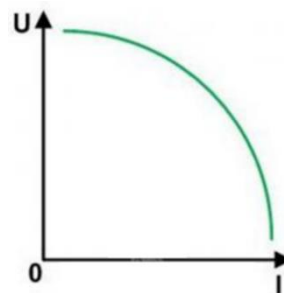


Рисунок 1.1 – Спадаюча вольт-амперна характеристика джерела для РДЗ



Рисунок 1.2 – Процес утворення зварювальної дуги

Для утворення плазми зварювальної дуги стержень і покриття електрода мають розплавитися або випаруватися під впливом високого струму короткого замикання. Крім того, значення напруги в зоні катода, анода та по всій довжині дуги мають бути достатньо високими для утворення зварювальної дуги. Необхідне значення струму і напруги підбирають в залежності від діаметра та покриття електрода.

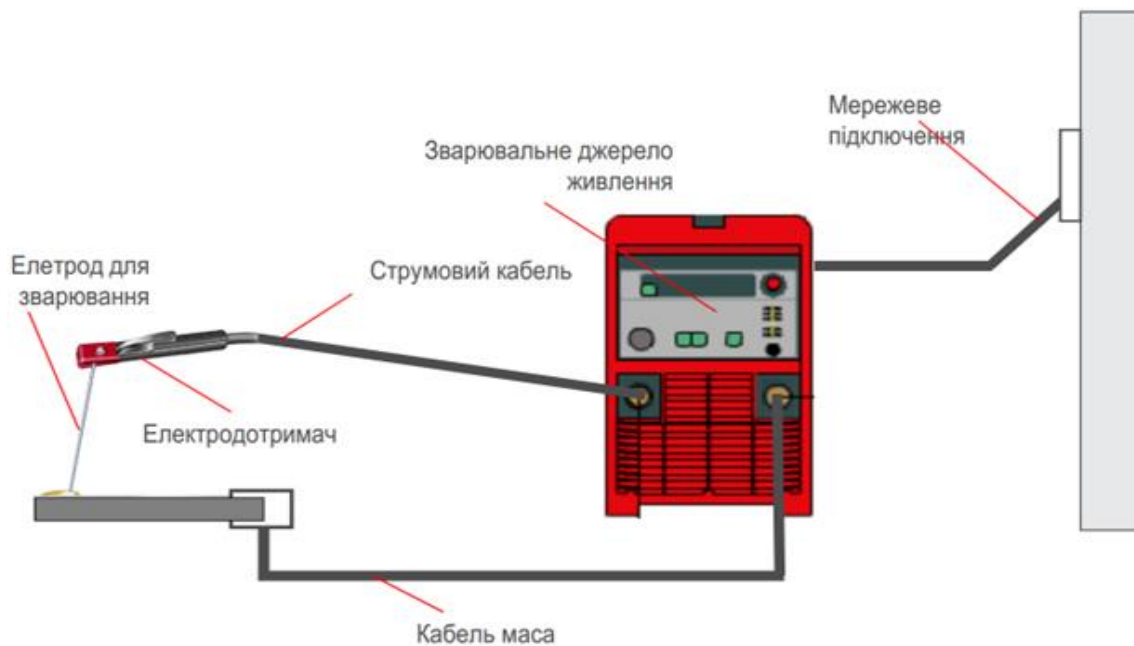


Рисунок 1.3 – Структура системи для ММА зварювання

Зварювання стержневим електродом має численні переваги порівняно з процесами MIG/MAG та TIG. До переваг можна віднести [22]:

- простоту у використанні;
- універсальність у застосуванні;
- невибагливість до навколишнього середовища;
- легкість у освоєнні;
- низький рівень шуму;
- низьку вартість;
- формування шлаку для захисту зварних швів;
- стійкість до забруднення іржею, окалиною, мастилом;
- можливість зварювання майже всіх металевих матеріалів;

- висока якість зварювальних швів і хороші їх механічні властивості.

До недоліків відносять:

- низьку швидкість зварювання;
- утворення великої кількості диму;
- відхилення зварювальної дуги;
- утворення кратерів в кінці шва;
- залежність діаметра електрода від товщини зварних кромок і положення зварювання;
- довге налаштування та простої (заміна електродів);
- неможливість механізації процесу.

## 1.2 Загальні відомості про зварювальні електроди для ручного дугового зварювання (РДЗ)

Зварювальні електроди для ручного дугового зварювання (РДЗ) - це стрижні, виготовлені з струмопровідного матеріалу. Вони можуть бути без покриття або мати на собі спеціальну обмазку з різних хімічних компонентів, яка визначає їх характеристики та покращує якість зварного шва. Основне призначення електрода – підведення зварювального струму до деталей зварних конструкцій.

Зварювальні електроди складаються з трьох основних елементів [1]:

- металевого чи неметалічного стрижня;
- покриття або обмазування (у деяких марках може бути відсутнім);
- контактної наконечника.

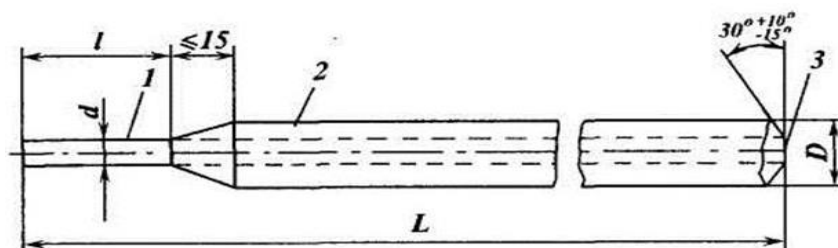


Рисунок 1.4 – Будова зварювального електрода

Основою для виготовлення зварювальних електродів є холодноотягнутий дріт суцільного перерізу від 0,3 до 12 мм [6]. Для різних стрижнів можуть використовуватися сталі трьох різних категорій:

- вуглецева - для зварювання вуглецевої та низьколегованої сталі;
- легована - для зварювання деталей з легованої, конструкційної та жароміцної сталі;
- високолегована - для зварювання нержавіючої сталі, хромонікелевих та хромистих сплавів.

В процесі зварювання стержень розплавляється, заповнюючи зварену ванну розплавленим металом. Одночасно плавиться і його обмазка, покриваючи тонким шаром розплавлений метал і створюючи захисну газову хмару, яка перешкоджає доступу кисню в зону зварювання.

Від типу зварювальних електродів залежить глибина прогріву металу, швидкість його розпалювання, стабільність горіння електричної дуги. Зварювальні електроди повинні забезпечувати утворення якісного шва з необхідним хімічним складом, підтримувати стабільне горіння дуги протягом усього робочого циклу, захищати розплав зварювальної ванни від доступу кисню, мати мінімальне розбризкування розплавленого металу, забезпечувати легке відділення та видалення шлаку з поверхні шва, забезпечувати високу міцність та ударну стійкість зварного з'єднання. Крім того в процесі зварювальних робіт електроди повинні виділяти мінімальну кількість токсичних газів.

Основним параметром зварювального електрода є діаметр його стержня. Його вибір залежить від товщини кромки зварюваних заготовок та параметрів зварювального обладнання.

Таблиця 1.1 - Опосередковані дані щодо відповідності діаметрів електродів, зварювальних струмів та товщини заготовок

Діаметр стрижня, мм	Зварювальний струм, А	Товщина заготовки, мм
1,6	25-50	1-2
2	40-80	2-3
2,5	60-100	2-3
3	80-160	3-4
4	120-200	4-6
5	180-250	6-8
6	220-320	10-24
6-8	300-400	30-60

Як бачимо, що чим товстіший метал необхідно зварювати, тим більшим повинен бути діаметр електрода.

Виробниками випускають електроди довжиною від 150 до 450 мм. Довжина зварювального електрода важлива тоді, коли переривання процесу зварювання є небажаним, наприклад під час ремонту герметичних трубопроводів під тиском.

### 1.3 Види та склад покриття зварювальних електродів

Покриття (обмазка) наноситься на металевий стрижень у вигляді гомогенізованої маси з різних хімічних компонентів. Завданням покриття є забезпечення безперебійного горіння дуги та надання певних властивостей звареному з'єднанню. Розглянемо його різновиди.

Кисле покриття складається з оксидів марганцю, заліза та кремнію. Воно призначене для зварювання виробів із низьковуглецевих сталей, переважно у горизонтальному положенні. Електроди з таким покриттям добре працюють навіть з іржавим металом. Кисле покриття забезпечує утворення стабільної дуги, а електроди можуть використовуватись для зварювання на змінному та постійному струмах. До його недоліків відноситься токсичність, висока текучість металу шва, недостатня чистота та підвищена концентрація водню у зварювальній ванні.

Основне покриття складається з фтористих сполук та карбонатів. Такі електроди застосовуються для дугового зварювання товстих заготовок та конструкцій з високовуглецевих легованих сталей, які працюють при високих знакозмінних та динамічних навантаженнях. Вони підходять для роботи у всіх просторових положеннях, утворюють механічно міцні, чисті від хімічних домішок шви, які мають високу пластичність, ударну в'язкість і стійкість до тріщиноутворення. До недоліків електродів з основним покриттям можна віднести утворення короткої нестабільної дуги, складності з відділенням шлаку, складнощі зберігання.

Основними компонентами рутилового покриття є мінерал рутил, феромарганець, кремнезем, карбонат кальцію або магнію. Рутилові електроди підходять для зварювання будівельних конструкцій та виробів із низьколегованих маловуглецевих сталей у будь-яких просторових положеннях. Вони забезпечують високу якість шва, легке відділення шлаку та мінімальне розбризування металу. Недолік рутилових електродів проявляється у високій текучості, низькій хімічній чистоті шва, підвищеній концентрацією водню у зварювальній ванні.

Целюлозне покриття має у складі обмазки натуральну целюлозу, феросплави та органічні смоли. Такі електроди забезпечують гарний провар на постійному струмі. Зварювання ними на змінному струмі потребує додаткового обладнання. Завдяки утворенню невеликої кількості щільного та в'язкого шлаку, одностороннє зварювання целюлозними електродами можливе у будь-якому просторовому положенні, у тому числі у важкодоступних місцях. До недоліків електродів з целюлозним покриттям відноситься висока концентрація водню, що знижує пластичність зварного шва і велика витрата, пов'язана з сильним розбризуванням металу.

Крім розглянутих вище існують також змішані типи покриттів зварювальних електродів. Їх позначення згідно стандартів ДСТУ та ISO наведено в таблиці 1.2 [6, 8].

Таблиця 1.2 – Позначення типів покриттів електродів

Покриття	Позначення ДСТУ	Позначення ISO
Основні покриття		
Кисле	А	А
Основне	Б	В
Рутилове	Р	R
Целюлозне	Ц	С
Змішані покриття		
Кисло-рутилове	АР	AR
Рутилово-основне	РБ	RB
Рутилово-целюлозне	РЦ	RC
Рутилове з залізним порошком	РЖ	RR
Інші (змішане)	П	S



Рисунок 1.5 – Компоненти покриття електродів для РДЗ

За рахунок складу обмазки електрода досягається стійкість до вібрацій або перепадів температур, стійкість до силових навантажень тощо.

#### 1.4 Класифікація та маркування електродів для РДЗ за ДСТУ

Виробництво металевих електродів для ручного електродугового зварювання та наплавлення сталей регламентується ДСТУ EN ISO 2560:2014. За

цим стандартом електроди поділяються на групи за різними параметрами. Залежно від сфери застосування (за призначенням) електроди маркуються різними літерами:

"У" - для з'єднання заготовок з вуглецевих і низьковуглецевих матеріалів, опір на розрив яких становить не більше 600 МПа;

«Л» - для роботи із заготовками з конструкційних та легованих сталей, з опором на розрив, який не перевищує 600 МПа;

"Т" - для зварювання виробів з термостійкої легової сталі;

«В» - для зварювання високолегованого металу, що має особливі властивості;

"Н" - для наплавлення.

За родом струму зварювання покритими електродами може виконуватись на постійному або змінному струмі. Перевага постійного струму полягає в економії матеріалів за рахунок кращої якості зварного шва, високої продуктивності процесу та низького рівня розбризкування. Недоліком є вища вартість обладнання. Перевага зварювання на змінному струмі полягає меншій вартості зварювальних трансформаторів. До мінусів відносять меншу стабільність дуги та більші витрати матеріалів.

Товстіші заготовки слід зварювати на струмі прямої полярності, тоді як при роботі з тонкими металевими листами потрібно застосовувати струм зворотної полярності, щоб запобігти пропалюванню матеріалу.

За товщиною покриття електроди поділяються на чотири групи та відповідно маркуються:

"М" – електроди з тонким покриттям;

"С" – електроди із середньою товщиною покриття;

"Д" – електроди з товстим покриттям;

"Г" – електроди особливо товстим покриттям.

Товщину покриття електродів визначають з відношення зовнішнього діаметра електрода  $D$  до діаметра його стержня  $d$ .

Залежно від просторового положення зварних деталей електроди



маркуються цифрами:

"1" - зварювання в будь-якому положенні;

"2" - будь-яке положення зварного шва, крім "зверху-вниз";

"3" - робота у вертикальному, в тому числі «знизу-вгору», горизонтальному та в нижньому положенні;

"4" - зварювання в нижньому положенні, в тому числі способом "у човник".

Також електроди поділяють за видом джерела живлення (родом струму), полярністю струму та інших параметрів. Так, наприклад електроди з індексом в марці "0" призначені для зварювання тільки на постійному струмі. Остання цифра в маркуванні електрода від 1 до 9 означає, що вони підходять для зварювання як на змінному, так і на постійному струмі, при чому більші значення відповідають електродам, які призначені для використання з джерелами живлення більшої потужності.

## 1.5 Аналіз деяких марок електродів та їх призначення

### 1.5.1 Електроди для зварювання вуглецевих та низьколегованих сталей

Особливістю вуглецевих та низьколегованих сталей є низька теплостійкість та низький опір на розрив, яка становить не більше 500 МПа. Для з'єднання виробів з таких сталей вибирають електроди з рутиловим, основним та змішаним покриттям. Найбільш поширеними марками таких електродів АНО-4, АНО-6, МР-3, МР-3С, ОЗС-6, УОНІ 13/45, УОНІ 13/55 [18].

### 1.5.2 Електроди для нержавіючої сталі

Нержавіючий метал високоміцний та стійкий до корозії. Але він має один істотний недолік, а саме погану зварюваність.

Для зварювання нержавіючої сталі використовують спеціальне обладнання та електроди. Зварювання нержавіючої сталі можна виконувати на постійному

струмі зворотної полярності або змінному струмі. Постійний струм зворотної полярності застосовують в основному для зварювання тонкостінних виробів. На упаковці електродів для зварювання вказуються значення рекомендованої сили струму.

До електродів для зварювання нержавійки належать:

ЦЛ-11 - електроди діаметром 3 мм для зварювання виробів, які експлуатуються в агресивному середовищі при температурі до 450 °С;

НЖ-13 - електроди з високим коефіцієнтом наплавлення. Рекомендуються для зварювання ємностей із хромонікелемолібденової харчової сталі, призначених для транспортування та зберігання харчових продуктів в умовах підвищених температур;

НИИ-48Г - електроди для з'єднання високомарганцевих і аустенітних хромонікелевих жаростійких сталей, що експлуатуються в умовах агресивного середовища.

Перед початком робіт виробники рекомендують проводити прокалювання електродів протягом години при температурі 320-350 °С.

При використанні змінного струму застосовуються такі марки електродів по нержавійці:

ЛЕЗ-8 - комбіновані стрижні з рутилової обмазкою для зварювання конструкцій з хромонікелевих сплавів на змінному та постійному зварювальному струмі;

ОЗЛ-14 - рутилові електроди для роботи з нержавіючими хромонікелевими сплавами без особливих вимог до якості металу шва;

ОЗЛ-14А - електроди з рутиловою обмазкою для зварювання на постійному струмі зворотної полярності, але допускається використання на змінному струмі. Утворюють шов, що має стійкість до міжкристалітної корозії та підвищену стійкість до високих температур, до 650 °С.

ЦТ-50 - рутилові електроди для зварювання змінним або постійним струмом високолегованої нержавіючої сталі з підвищеною стійкістю до фтористих сполук і кислот.

Н-48 – електроди з основним покриттям для зварювання конструкцій, що експлуатуються в умовах неокислювальних агресивних середовищ при температурі не вище 300 °С;

АНВ-36 - електроди з основним покриттям для зварювання металу, який експлуатується за температури до 500 °С.

### 1.5.3 Електроди для зварювання та наплавлення чавуну

Завдяки високому вмісту вуглецю чавун має високу твердість, пористість і крихкість, низьку ударну в'язкість і пластичність. Через наявність у структурі металу великих вкраплень графіту чавун погано піддається зварюванню та вимагає ретельного підбору присадок. Вони повинні забезпечувати мінімальну товщину шва, хорошу змішуваність металу шва з матеріалом заготовки, меншу різницю в температурному усадженні.

Для зварювання чавуну застосовують електроди таких марок [1]:

МНЧ-2 - електроди з нікелю, міді, марганцю та заліза для зварювання, наплавлення, заварювання дефектів будь-якого типу чавунних виробів на постійному струмі зворотної полярності. Вони володіють легким запалюванням, мають стабільне горіння дуги, швидке відділення шлакової кірки, утворюють міцний шов, стійкий до корозії та не вимагають прокалювання.

ОЗЧ-4 - універсальні електроди для холодного зварювання та наплавлення будь-якого виду чавуну в нижньому та вертикальному положенні на постійному струмі зворотної полярності. Утворюють міцний шов з високою опірністю до стирання.

ОК 92-18 - універсальні електроди з основним покриттям, яке має високий вміст графіту. Призначені для роботи на знижених постійних та змінних струмах. Підходять для заварювання дефектів та пошкоджень корпусів насосів, коробок передач, деталей двигунів.

ЦЧ-4 - електроди з основним покриттям для гарячого та холодного зварювання сірого, ковкого та високоміцного чавуну, наплавлення та

зварювання дефектів.

ОЗЧ-2 - мідні електроди з кислим покриттям для роботи тільки з ковким та сірим чавуном. Підходять для комплексного багат шарового наплавлення, коли перші шари виконуються електродами МНЧ-2 або ЦЧ-4, а наступні - електродами ОЗЧ-2.

Електроди марок МНЧ-2, ОЗЧ-4, ОЗЧ-2 підходять для зварювання без попереднього прогріву металу. Електродами марок ОК 92.18, ЦЧ-4 виконують зварювання гарячим методом і вимагають попереднього прожарювання чавуну при температурі +500...+600 °С.

#### 1.5.4 Електроди для зварювання кольорових металів

Зварювання кольорових металів відрізняється від зварювання сталі через суттєві відмінності у показниках температури плавлення, теплопровідності, інших технічних характеристик. Для кожного кольорового металу розроблено спеціальні витратні матеріали.

Відмінна риса алюмінію в тому, що на його поверхні є щільна та тугоплавка оксидна плівка, яка перешкоджає формуванню зварного шва. Запобігти утворенню непроварів здатні електроди з обмазкою, яка має у своєму складі лужноземельні метали, хлористі та фтористі сполуки, які сприяють видаленню оксидної плівки та забезпечують стабільне горіння дуги. До таких електродів відносяться [1]:

ОЗАНА-1, ОЗА-1, ОК 96.10 є електроди для зварювання та наплавлення чистого алюмінію;

ОЗАНА-2 та ОЗА-2, ОК 96.50 - електроди для роботи з алюмінієвими сплавами.

Зварювання слід виконувати на постійному струмі зворотної полярності.

Особливості нікелю, як і сплавів з ним, у значній чутливості до домішок та схильності до тріщиноутворення. Для отримання якісного зварювання слід використовувати електроди високої чистоти. До них відносяться:

Н-10, НП1, Н-37 - електроди зварювання чистого нікелю;

УОНИ-13/45 - електроди для зварювання нікелю та мідно-нікелевих сплавів;

ЦТ-28, ИМЕТ-4, ИМЕТ-7, ИМЕТ-4П - електроди для зварювання хромонікелевих сплавів;

ОЗЛ-17У - електроди для зварювання залізонікелевих сплавів.

Мідь та її сплави мають високу електро- і теплопровідність, підвищену плинність розплаву, активну взаємодію з киснем і воднем, що може провокувати утворення тріщин у процесі зварювання. Уникнути цих проблем допоможе ретельне зачищення зварюваних елементів і прожарювання електродів. Найбільш підходящими є марки електродів ОМЗ-2, ОМЗ-3, ОМЗ-4.

#### 1.6 Показники ефективності процесу дугового зварювання

Основним показником ефективності процесу дугового зварювання є його продуктивність. На неї впливають низка факторів, серед яких [19]:

1. рід зварювального струму;
2. величина зварювального струму;
3. коефіцієнт розплавлення, який показує, скільки електродного металу розплавляється під дією зварювального струму за одиницю часу;
4. коефіцієнт наплавлення, який зазвичай є меншим за коефіцієнт розплавлення, так як не весь розплавлений електродний метал переходить в зварний шов (частина його вигорає та розбрискується);
5. кваліфікація зварювальника.

Величина втрат металу на угар і розбрикування, а також значення коефіцієнтів розплавлення і наплавлення залежать від зварювального струму. Збільшення зварювального струму призводить до підвищення температури зварювальної дуги, а отже й до інтенсивності розплавлення електрода. Як наслідок, зі збільшенням зварювального струму коефіцієнти розплавлення і наплавлення збільшуються, але на різні величини, оскільки збільшення

температури дуги призводить до збільшення кількості утворених газів, підвищення їх тиску на краплини металу, які ними переносяться, а отже, до підвищення втрат на вигорання і розбризування.

На величину вищезгаданих коефіцієнтів, а також на втрати від вигорання і розбризування впливає кількість домішок в металі та покритті електрода.

Температура стрижня електрода також впливає на коефіцієнти розплавлення і наплавлення. У початковий момент зварювання швидкість плавлення електродного металу низька. По мірі розігріву електрода швидкість його плавлення може збільшитися в 2 рази. При цьому буде збільшуватися коефіцієнти розплавлення і наплавлення, а втрати на угар і розбризування практично не змінюються. Нормальна якість зварного шва буде забезпечуватись, коли швидкість розплавлення електрода на початку буде відрізнятися від аналогічної швидкості в кінці процесу не більш, ніж на 30 %.

Покриття електродів також істотно впливає на коефіцієнти розплавлення, наплавлення та коефіцієнт втрат. Так, коефіцієнт розплавлення електродів з товстим покриттям значно менший в порівнянні з коефіцієнтом розплавлення електродів з тонким покриттям за рахунок того, що певна кількість теплоти дуги витрачається на плавлення, випаровування та розкладання покриття, хоча прямої залежності цих показників немає.

Коефіцієнт втрат електродів з товстим покриттям зменшується в порівнянні з тонким за рахунок того, що матеріали покриттів під час випаровування дають додаткову кількість газу, який здатний захоплювати за собою пари і дрібні краплі металу.

Коефіцієнт наплавлення електродів з товстим покриттям завжди менший за коефіцієнт розплавлення, за винятком електродів, до покриття яких входить велика кількість металевих включень.

На величину всіх цих коефіцієнтів також має вплив полярність струму, тип з'єднання, просторове положення шва тощо. Встановлено, що рід зварювального струму істотно не впливає на них. З переходом на змінний струм коефіцієнт втрат дещо зменшується, але продуктивність процесу практично не змінюється.

Отже, коефіцієнти розплавлення, наплавлення та коефіцієнт втрат, за інших рівних умов, будуть мати різні значення при зварюванні електродами різних марок.

### Висновки за розділом

В даному розділі розглянуто особливості процесу ручного електродугового зварювання штучними покритими електродами. Виконаний аналіз показав, що ринок країни насичений великою кількістю покритих електродів різних марок під різноманітні технологічні завдання. Однак в характеристиках та рекомендаціях щодо їх застосування є досить мало інформації про можливі втрати електродів при виборі неправильних параметрів процесу зварювання. Виконання запланованих досліджень доповнить цю прогалину та дозволить сформулювати чіткі рекомендації щодо застосування покритий електродів.

## 2 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

### ММА-ЗВАРЮВАННЯ

#### 2.1. Технологія зварювання сталі штучними покритими електродами

Зварювальна дуга може виникати тільки тоді, коли виникає пробій газового прошарку (повітря), або в результаті дотикання електродів з наступним їх розведенням на декілька міліметрів. Перший спосіб пробією міжелектродного прошарку можливий тільки за наявності високої напруги (біля 1000 В) і зазорів між електродами близько 1 мм. Такий спосіб збудження дуги зазвичай не застосовується через небезпеку впливу високої напруги на зварювальника. Під час живлення дуги струмом високої напруги та частоти (понад 3000 В і 150-250 кГц відповідно, можна отримати пробій повітря, коли зазор між електродом і деталлю становить близько 10 мм. Такий спосіб запалювання дуги менш небезпечний для зварника і його використовують частіше.

Другий спосіб запалювання дуги вимагає різниці потенціалів між електродом та деталлю в 40...60 В. Коли електрод стикається з нею, утворюється замкнений зварювальний електричний ланцюг. У момент, коли електрод відводиться від заготовки, електрони, які знаходяться на нагрітій коротким замиканням катодній плямі, відриваються від атомів і під дією електростатичного притягання рухаються до анода, утворюючи електричну дугу. Дуга швидко стабілізується, електрони, які виходять з катодної плями, іонізують газовий міжелектродний простір і в ньому з'являється струм.

Швидкість запалювання дуги залежить від характеристик джерела живлення, сили струму в момент зіткнення електрода з виробом, часу їхнього контакту, складу газового середовища в міжелектродному просторі. На швидкість збудження дуги найбільше впливає величина зварювального струму. Чим вона більша (при одному і тому ж діаметрі електрода), тим більшим стає розмір катодної плями і тим більшим буде струм на початку запалювання дуги.



Високий струм буде викликати швидку іонізацію і перехід до сталого дугового розряду.

При зменшенні діаметра електрода відбувається збільшення щільності струму. Тому час переходу до стійкого дугового розряду буде скорочуватися ще більше.

На швидкість запалювання дуги впливають також полярність і рід струму. На постійному струмі зворотної полярності (коли плюс джерела струму підключений до електрода) швидкість збудження дуги буде вища, ніж при змінному струмі. Для змінного струму напруга запалювання повинна бути не нижче 50...55 В, а для постійного струму - не менше 30...35 В [1].

Повторні запалювання зварювальної дуги після її згасання через короткі замикання краплями металу електрода далі будуть виникати самостійно, якщо температура торця електрода буде досить високою.

Найбільш зручний спосіб запалювання дуги, який застосовується на практиці - чиркання кінцем електрода по поверхні металу. При такому русі виникає зварювальна дуга і починає плавитися покриття. При цьому залипання електрода не відбувається. Для того, щоб не залишати слідів на чистому металі, чиркати потрібно по лінії майбутнього зварного шва, рухаючи електрод до його початку.

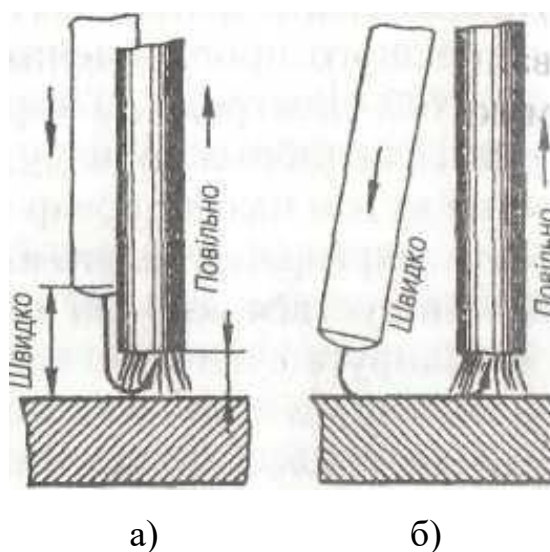
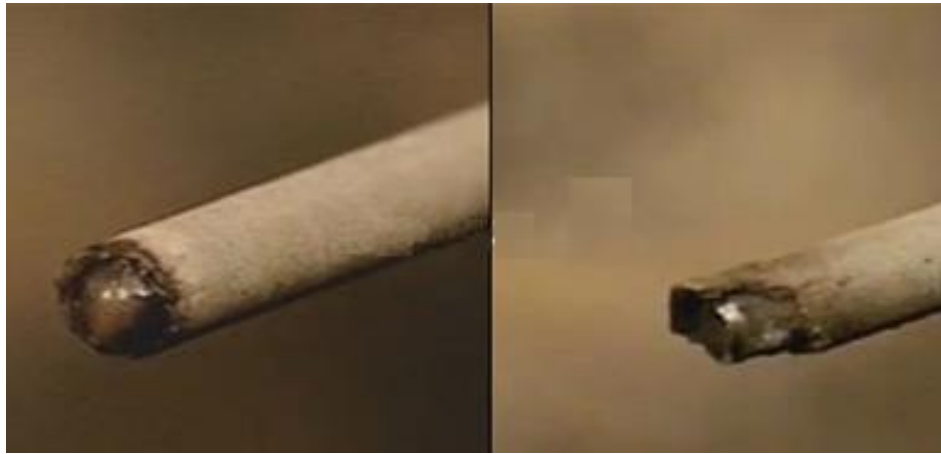


Рисунок 2.1 - Схеми руху електродом під час запалювання дуги

а – торканням; б - чирканням

Якщо на кінці електрода є наплив (рис. 2.2,а), його потрібно оббити, постукавши електродом по металу або іншій твердій поверхні, бажано по тій, до якого не під'єднана "маса", інакше електрод може залипнути.



а)

б)

Рисунок 2.2 - Електрод з напливом (а) та з облущеним покриттям

Якщо на кінці електрода обсипалось покриття (рис. 2.2,б), то для уникнення можливого залипання, ним потрібно чиркнути кілька разів так, щоб оголений метал розплавився.

## 2.2 Полярність підключення електродів

При роботі зі зварювальними апаратами постійного струму у зварювальника існує додаткова можливість керування режимом зварювання шляхом зміни місцями під'єднання кабеля електродотримача і затискача маси. У звичайному режимі електрод приєднується до клеми "мінус", а зварювані деталі - до клеми "плюс". Таке підключення називається "прямою полярністю", яка забезпечує краще прогрівання зварюваного матеріалу, що необхідно при зварюванні масивних деталей.

Фізична природа кращого прогрівання металу при "прямій" полярності полягає в тому, який потік електронів рухається від "мінуса" до "плюса", тобто до зварюваного металу, передаючи йому свою енергію, чим створюється

додатковий нагрів разом з нагрівом від електричної дуги.

Іноді в процесі зварювання виникає необхідність зменшити нагрів металу, наприклад під час зварювання тонколистових матеріалів, для того щоб уникнути їх пропалювання, а також легованих сталей для уникнення вигорання легуючих елементів. У цьому випадку використовують зворотну полярність, підключаючи електрод до "+", а зварюваний матеріал - до "-". При цьому потік електронів змінить свій напрямок руху і нагріватиме краще вже не метал, а електрод [11].

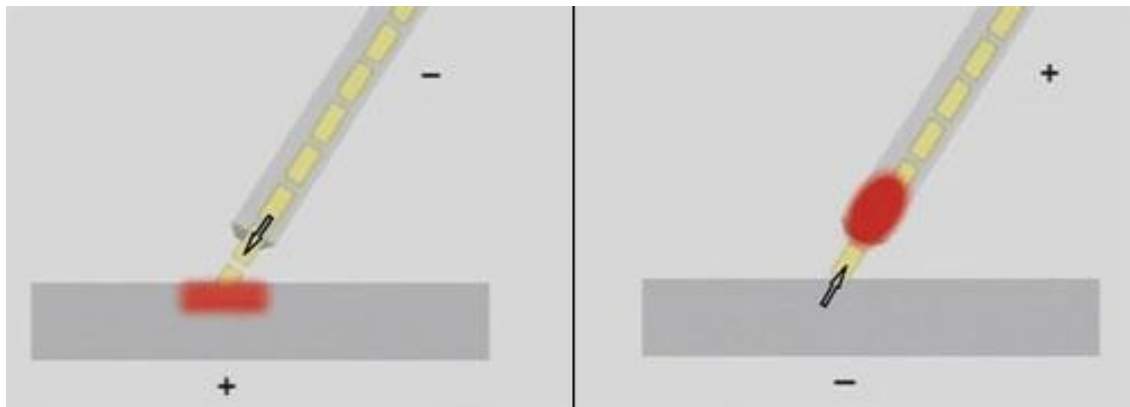


Рисунок 2.3 - Схема підключення електрода за прямою (ліворуч) і зворотною (праворуч) полярністю

В позначенні деяких електродів є вказівка про рекомендовану полярність підключення, якої слід дотримуватися під час їх підбору. Однак, будь-який електрод може працювати при різних полярностях. Якщо полярність електрода невідома, то перед основним зварюванням потрібно виконати пробні зварювання, змінюючи її, та вибравши в результаті ту, при якій забезпечується краща якість зварювання.

### 2.3 Вибір діаметра електрода і сили зварювального струму

Діаметр зварювального електрода і необхідну силу зварювального струму підбираються з урахуванням товщини зварюваного металу. Для початкового вибору діаметра електрода і сили струму можна використовувати наведені в таблиці 2.1 дані [1].

Таблиця 2.1 - Таблиця вибору діаметра електрода

Товщина металу, мм	2	3	4-5	6-8	9-10
Діаметр електрода, мм	2	3	3-4	4	4-5
Струм зварювання, А	50-60	110-120	110-120 (при d = 3 мм) 140-160 (при d = 4 мм)	140-160	140-160 (при d = 4 мм) 225-300 (при d = 5мм)

Примітка. Значення в таблиці вказані для виконання швів у нижньому положенні.

Рекомендована сила зварювального струму може вказуватися і в характеристиці електрода на його упаковці.

Під час виконання зварних швів у вертикальному та стельовому положеннях слід застосовувати електроди з діаметром не більше 4 мм. Якщо кромки деталей оброблені, або існує необхідність заплавлення зазор між ними, то кореневий шов у з'єднанні можна виконуватися електродом з меншим діаметром (2,5...3 мм).

Орієнтовну величину постійного зварювального струму можна розрахувати за формулою:

$$I = K \cdot d, \quad (2.1)$$

де  $I$  - сила струму, А;

$K$  – коефіцієнт;

$d$  - діаметр електрода, мм.

Коефіцієнт  $K$  вибирається в залежності від діаметра електрода.

Таблиця 2.2 - Значення коефіцієнта  $K$ 

Діаметр електрода, мм	1-2	3-4	5-6
Коефіцієнт $K$ , А/мм	25-30	35-40	45-60

Цей розрахунок буде правдивим для визначення значення струму зварювання в нижньому положенні і тільки постійним струмом. При зміні цих умов в формулу слід внести зміни:

- при виконанні вертикальних швів, в формулу потрібно ввести

коригувальний коефіцієнт, що дорівнює 0,9. В результаті формула набуде вигляд:

$$I = 0,9 \cdot K \cdot d \quad (2.2)$$

- при виконанні стельового шва значення коригувального коефіцієнта потрібно зменшити до 0,8 ( $I = 0,8 \cdot K \cdot d$ ). Це дозволить отримати менший об'єм розплавленого металу і більш швидку кристалізацію.

- при зварюванні на змінному струмі значення зварювального струму слід збільшити на 10-15 А.

Оптимальне значення струму повинно підбиратися в процесі роботи залежно від конкретних умов.

Якщо в якості джерела струму використовується зварювальний трансформатор або випрямляч, фактична сила струму може відрізнятись від встановленої на апараті через зміну напруги живлення. Якщо вона низька (у вечірній час, наприклад), фактичний зварювальний струм виявиться нижче того значення, на яке вказує регулятор апарата.

При зварюванні вертикального шва зверху вниз сила струму встановлюється на 5-10 А більше, ніж при зварюванні знизу вверх.

Впливає на необхідну силу струму і тип зварного з'єднання (схема з'єднання). Зварювання встик вимагає меншого струму, ніж зварювання з напуском. Таврові з'єднання, які вимагають більшої кількості тепла для зварювання, потребують підвищення сили струму на 10-15 % в порівнянні зі зварюванням стикових швів.

Теплопровідність зварюваних матеріалів також впливає на необхідне значення струму. Чим вона вища, тим інтенсивніше охолоджується метал в зоні дії дуги, і тим вищою повинна бути сила струму, для того щоб забезпечити гарне проплавлення. Тому при зварюванні сталей хромомолібденової і хромансильових струм повинен бути на 10 % і 20 % відповідно менший, ніж для маловуглецевої сталі, оскільки вона має більшу теплопровідність [2].

При зварюванні виробів з металу різної товщини сила струму повинна відповідати нижній межі для більшої товщини.

## 2.4 Особливості роботи зварювальним апаратом при малому і великому струмі

Якщо струм зварювання недостатній, то основний метал розігрівається недостатньо сильно, зварювальна ванна буде статична і буде погано розтікатися. В результаті буде утворюватися заворот на кордоні шва, важкий шлак буде заливати дугу, а електрод залипати. Якщо струм не можна збільшити, то потрібно активно рухати електродом не даючи розплавленому шлаку залити дугу.

Якщо струм завеликий, то основний метал буде прогріватися сильніше, шлак ставатиме надто рідким, а ванна - надмірно рухомою. Керувати такою ванною важко, оскільки розплавлений може вилитись через край шва, викликаючи розбризкування. Також буде відбуватись надто швидке плавлення електрода. В цьому випадку потрібно зменшити струм або збільшити швидкість переміщення електрода, зменшивши тим самим температуру основного металу.

Контролювати зварювальну ванну при високому струмі важче, ніж при нормальному. Однак з набуттям досвіду можна збільшувати струм зварювання, прискорюючи одночасно швидкість руху електрода. Це дозволить підвищити продуктивність процесу зварювання. Крім того, великий струм збільшує проплавлення металу і забезпечує більш гладкий шов.

## 2.5 Положення електроду при зварюванні

Покритий електрод під час зварювання потрібно тримати під кутом 45...90 градусів до горизонталі, де знаходиться шов. Найбільш зручним вважається кут 75 градусів. Оптимальне його значення залежить від того, який шов передбачається формувати [14].

Чим вертикальніше встановлений електрод, тим глибшим буде проплавлення металу і менш опуклим буде шов. Це викликано тим, що дуга сильніше тисне на металеву ванну змушуючи її розтікатися. Нахилений електрод силою дуги змушує шов підніматися і ставати більш опуклим.



Рисунок 2.4 - Положення електрода під час зварювання



Рисунок 2.5 - Розплавлення електрода при його значному нахилі

Надто великий нахил електрода може призвести до поганого проплавлення, надто опуклого шва і неправильного розплавлення покриття (рис. 2.5). Керуючи кутом нахилу електрода можна формувати різні за опуклість і глибиною проплавлення зварні шви.

Після запалювання дуги потрібно прогріти метал і сформувати ванну. Для цього слід зробити 2-3 маленьких оберти навколо точки початку шва. В цей час також відбудеться утворення газової захисної хмари, яка захищає шов від утворення пор і підтримує краще горіння дуги.

## 2.6 Особливості контролю зазору між електродом і металом

В технологічному ручного електродугового зварювання важливим є постійний контроль зазору між електродом і металом (підтримання довжини дуги). Це завдання ще більш ускладнюється тим, що електрод в процесі роботи поступово вкорочується, і його необхідно постійно опускати нижче, щоб підтримувати зазор постійним. Підтримка правильного зазору дозволяє сформувати якісний і міцний шов.

Якщо зазор буде замалим, то основний метал прогріватиметься погано і шов буде виходити опуклим з незплавленням по краях. Якщо зазор завеликий, дуга починає "скакати", що може призвести до поганого проварювання і безформенного, неміцного шва.

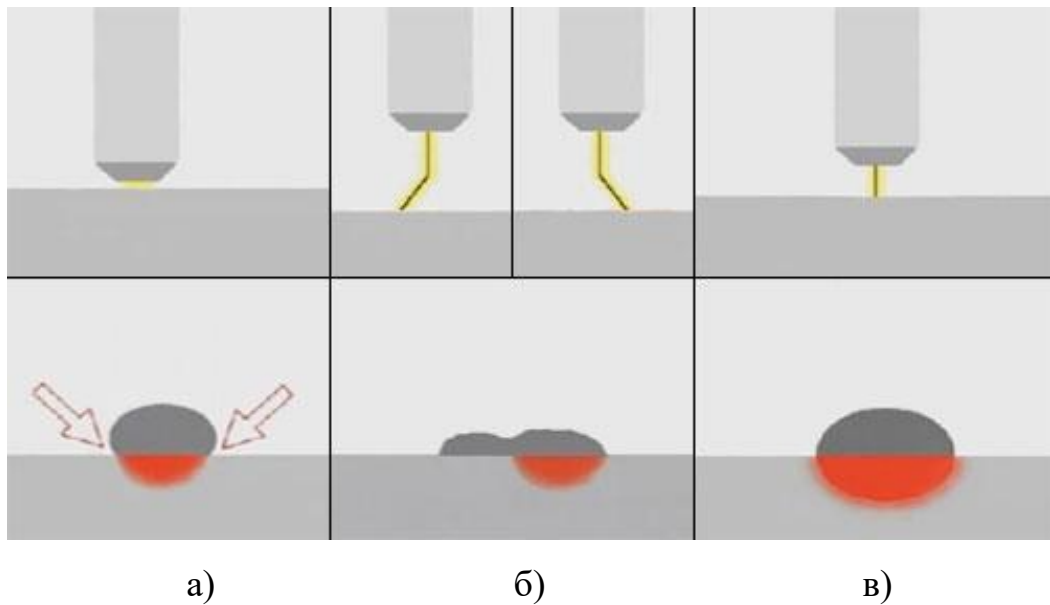


Рисунок 2.6 - Вплив довжини дуги на якість зварного шва: коротка (а), довга (б) і нормальна (в) дуга

Нормальний постійний зазор забезпечує хороше проварювання металу, рівний зварний шов, хороше сплавлення його країв з металом. Довжина дуги повинна бути помірно короткою - не більшою за товщину покритого електрода, зазвичай близько 3 мм.

### 2.7 Прийоми формування зварного шва

Для правильного формування зварного шва під час ведення електрода, одночасно з поступальним рухом необхідно здійснювати кругові або зигзагоподібні рухи відносно лінії формування шва (рис. 2.7) [16].

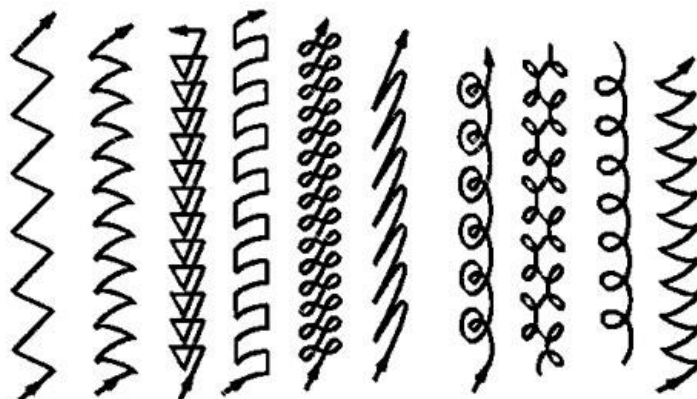


Рисунок 2.7 – Можливі траєкторії руху кінцем електрода



Швидкість руху електрода (швидкість зварювання) повинна бути такою, щоб розплавленого металу електрода і деталі вистачало для формування шва. Якщо його буде недостатньо, в з'єднаннях залишатимуться підрізи шва (канавка по краю шва) (рис. 2.8,а).

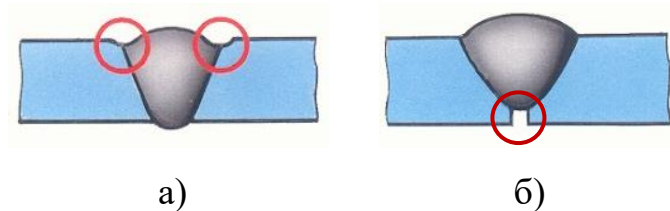


Рисунок 2.8 - Схема підрізання (а) та непроварювання (б) шва

Якщо електрод переміщається занадто швидко, дуга не встигатиме прогрівати метал заготовок, шов лягатиме по поверхні деталей без проплавлення основного металу (рис. 2.8,б). Якщо електродом рухати надто повільно, основний матеріал буде перегріватися, утвориться надлишок розплавленого металу, і ванна розтікатиметься.

Зі швидкістю руху електрода тісно пов'язана і сила струму. Великий струм збільшує проплавлення і дозволяє вести електрод з більшою швидкістю. Чим вищий струм зварювання, тим з більшою швидкістю потрібно вести електрод і навпаки. Коли швидкість руху відповідає силі струму, краї шва виходять тонкими, добре сплавленими з основним металом, а сам шов виходить міцним і естетичним.

## 2.8 Технічні та технологічні характеристики покритих електродів

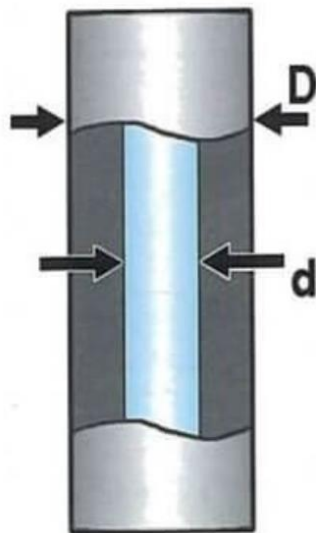
Металевий покритий електрод - це металевий стержень певного розміру, на поверхню якого нанесено спеціальне покриття (рис. 2.10), завдяки якому під час зварювання створюється захист розплавленого металу, який переноситься у зварювальну ванну та самої ванни від кисню та азоту, стабілізується горіння дуги, очищується метал у зварювальній ванні від шкідливих домішок,

відбувається процес легування металу шва та покращуються його властивості. Склад і товщина покриття електрода впливають на ефективність захисту розплавленого металу, глибину його проплавлення і форму утвореного шва, якість перенесення та втрати металу електроду, загальні витрати покритих електродів, а також загальну стабільність процесу зварювання тощо.

Як вже було згадано, металеві штучні покриті електроди для ручного електродугового зварювання та наплавлення класифікуються за різними ознаками. Однією з них є поділ за товщиною покриття, а саме в залежності від відношення зовнішнього діаметра електрода з покриттям  $D$  до діаметра його стержня  $d$ .

За товщиною покриття в залежності від відношення діаметрів розрізняють електроди:

- з тонким покриттям ( $D/d \leq 1,20$ ) – маркуються літерою М;
- з середнім покриттям ( $1,20 \leq D/d \leq 1,45$ ) – маркуються літерою С;
- з товстим покриттям ( $1,45 \leq D/d \leq 1,80$ ) – маркуються літерою Д;
- з особливо товстим покриттям ( $D/d > 1,80$ ) – маркуються літерою Г.



ВИД ПОКРИТТЯ	ПОЗНАЧЕННЯ
тонке $D/d \leq 1.2$	М
середнє $1.2 < D/d \leq 1.45$	С
товсте $1.45 < D/d \leq 1.8$	Д
особливо товсте $D/d > 1.8$	Г

Рисунок 2.9 - Основні конструктивні елементи покритих електродів

Абсолютну товщину покриття електрода  $S_n$  можна визначити з виразу:

$$S_n = \frac{D-d}{2} \quad (2.3)$$

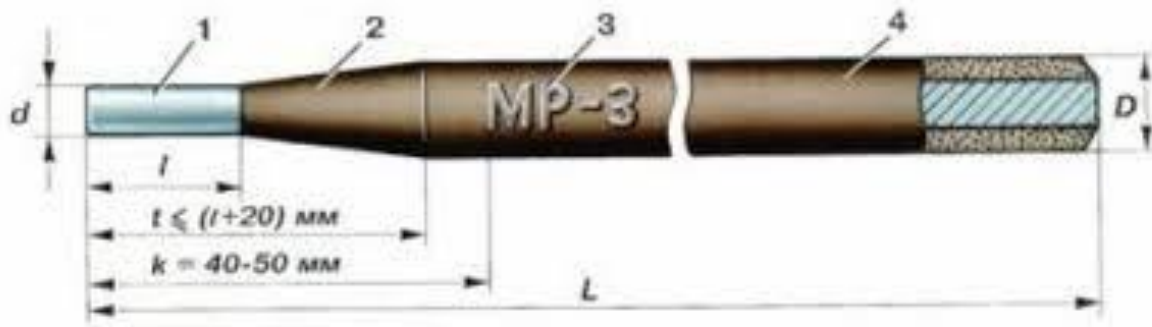


Рисунок 2.10 - Основні конструктивні елементи покритих електродів

1 – стержень; 2 – перехідна ділянка; 3 – маркування; 4 – покриття

Одним з основних критеріїв якості і економічності використання покритих зварювальних електродів є коефіцієнт їх втрат на розбризування  $\psi_p$ . Його визначають за формулою:

$$\psi_p = \frac{M_p - M_n}{M_p} \cdot 100 \quad (2.4)$$

де  $M_p$  - маса розплавленої частини стержня (г/А год);

$M_n$  - маса наплавленого електродного металу (г) при заданому значенні сили зварювального струму  $A$  за проміжок часу  $t$ .

Під час ручного дугового зварювання електродами з тонким покриттям коефіцієнт наплавлення може становити  $\psi = 10 - 20 \%$  [19].

Втрати електродного металу в залишках електродів (на огарки) в залежності від способу зварювання, положення шва, доступу до зварних кромки та способу закріплення електрода в електродотримачі також можуть бути значними. Коефіцієнт втрат електрода на огарок  $\psi_{ог}$  визначають з виразу:

$$\psi_{ог} = \frac{M_{ст}}{M_p} \cdot 100 \quad (2.5)$$

де  $M_{ст}$  - маса стержня в невикористаній частині електрода довжиною  $l_{ог}$ .

Загальні втрати металу електродів на розбризування та огарки  $\psi_{п}$  можна визначити з виразу:

$$\psi_{п} = \psi_p - \psi_{ог} = \frac{M_p - M_n - M_{ст}}{M_p} \cdot 100 \quad (2.6)$$

На практиці витрату покритих штучних електродів зручно розраховувати користуючись коефіцієнтом витрат електродів:

$$K_F = \frac{M_e}{M_H} \quad (2.7)$$

де  $M_e$  - маса електрода з покриттям, г.

Практика показує, що чим більшою є маса покриття, тим будемо більшим коефіцієнт витрат електрода і, як наслідок, маса витрачених електродів. Тому для оцінки покриті електроди також характеризуються коефіцієнтом маси покриття:

$$K_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_{\text{мст}}} = \frac{M_e - M_{\text{ст}}}{M_{\text{стп}}} \quad (2.8)$$

де  $M_{\Pi}$  - маса електродного покриття, г;

$M_{\text{стп}}$  - маса частини стержня, на яку нанесене покриття, г.

## 2.9 Вибір техніки виконання швів

Для виконання зварного шва передусім визначають режим зварювання, що забезпечує хорошу якість зварного з'єднання, встановленні розміри і форму при мінімальних витратах матеріалів, електроенергії і праці.

Режимом зварювання називається сукупність параметрів, які визначають процес зварювання, а саме: вид струму, діаметр електроду, величина напруги і зварювального струму, швидкість переміщення електроду уздовж шва тощо. Основними параметрами режиму ручного електродугового зварювання є діаметр електроду і значення зварювального струму. Інші параметри вибирають залежно від марки електроду, положення зварюваного шва в просторі, виду устаткування.

Діаметр електроду встановлюють залежно від товщини зварюваних кромок, виду зварного з'єднання і розмірів шва. Для стикових з'єднань прийняті практичні рекомендації по вибору діаметру електроду залежно від товщини зварюваних кромок.

Таблиця 2.3 - Залежність діаметра електроду від товщини зварюваних кромок

Товщина зварюваних кромок, мм	<2	3...5	6...8	9...12	13...15	16...20	>20
Діаметр електроду, мм	<2	3...4	4...5	5...6	6...7	7...8	8...10

При виконанні кутових і таврових з'єднань беруть до уваги значення катета шва: при катеті 3...5 мм зварюють електродами діаметром 3...4 мм, а при катеті 6...8 мм - електродами діаметром 4...5 мм. При багатопрхідному зварюванні швів стикових з'єднань перший прохід виконують електродом з діаметром не більше 4 мм; це необхідно для хорошого провару кореня шва в глибині оброблення.

За вибраним діаметром електроду встановлюють значення зварювального струму. Зазвичай для кожної марки електродів значення струму вказане на заводській етикетці, але можна також визначити його по формулах:

$$I = (40...50) d_e \quad \text{при} \quad d_e = 4...6 \text{ мм}; \quad (2.9)$$

$$I = (20 + 6 d_e) d_e \quad \text{при} \quad d_e < 4 \text{ мм і } d_e > 6 \text{ мм} \quad (2.10)$$

де  $I$  - зварювальний струм, А;

$d_e$  - діаметр електроду, мм.

Отримане значення зварювального струму коригують, враховуючи товщину металу і положення зварюваного шва. При товщині кромок  $(1,3...1,6)d_e$  розрахункове значення зварювального струму зменшують на 10...15%, а при товщині кромок  $> 3d_e$  - збільшують на 10... 15%. Зварювання вертикальних і стельових швів виконують зварювальним струмом, на 10...15% зменшеним проти розрахункового.

Довжина дуги значно впливає на якість зварювання. Коротка дуга горить стійко і спокійно. Вона забезпечує отримання високоякісного шва, оскільки розплавлений метал електроду швидко проходить дуговий проміжок і менше піддається окисленню і азотуванню. Занадто коротка дуга викликає «примержання» електроду, дуга переривається і процес зварювання порушується. Довга дуга горить нестійко з характерним шипінням та великою кількістю полум'я і диму.

В процесі зварювання електрод подається в напрямку його осі в зону дуги. Швидкість руху повинна відповідати швидкості плавлення електроду. Це зберігає постійну довжини дуги. Уздовж лінії зварюваного шва швидкість переміщення не має бути великою, оскільки метал електроду не встигне

сплавитися з основним металом (непроварювання). При малій швидкості переміщення можливі перегрівання і перепал металу. Шов виходить широкий, товстий.

Поперечні коливальні рухи електрода застосовують для отримання розширеного валика шириною, рівною  $3...4d_e$ . Поперечні рухи уповільнюють охолодження наплавленого металу, полегшують вихід газів і шлаків і сприяють кращому сплавленню основного й електродного металів та отриманню високоякісного шва. Кратер, що утворюється у кінці наплавлення валика, необхідно ретельно заварювати.

Техніка виконання зварних швів залежить від виду і просторового положення шва.

Нижні шви найбільш зручні для виконання, оскільки розплавлений метал електроду під дією сили тяжіння стікає в кратер і не витікає із зварювальної ванни, а гази і шлак виходять на поверхню металу. Тому по можливості слід вести зварювання в нижньому положенні. Стикові шви без скосу кромки виконують наплавленням уздовж шва валика з невеликим розширенням. Для цього потрібно забезпечити хороше проплавлення зварюваних кромки. Шов роблять з посиленням (опуклість шва до 2 мм). Після проварювання шва з одного боку виріб перевертають і, ретельно очистивши від шлаку, заварюють шов з іншого боку.

Для виконання горизонтальних швів готують кромки з одностороннім скосом на верхньому листі. Дугу збуджують на нижній кромці і потім перекладають на поверхню скосу і назад. Зварювання виконують електродом діаметром 4...5 мм. Горизонтальні накладні шви виконуються легше, оскільки нижня кромка утворює полицку, яка утримує краплі розплавленого металу.

Вибір способу і порядку виконання зварних швів залежить головним чином від товщини металу і протяжності шва. При зварюванні тонколистової сталі потрібне суворе дотримання техніки виконання зварних швів. Особливу небезпеку представляють наскрізні пропалення і проплавлення металу.

Зварювання тонколистової сталі виконують на знижених режимах.

Рекомендуються наступні режими зварювання (табл. 2.4) [1].

Таблиця 2.4 - Рекомендовані режими зварювання тонколистової сталі

Товщина металу, мм	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Діаметр електроду, мм	1	1,6...2	2	2,5	3
Зварювальний струм, А	10...20	25...35	40...50	50...70	60...90

Метал великої товщини зварюють в декілька проходів, заповнюючи оброблення кромки шарами. При товщині металу 15...20 мм зварювання виконують секціями способом подвійного шару. Шов розбивають на ділянки завдовжки 250...300 мм і кожен ділянку зварюють подвійним шаром. Другий шар накладають після видалення шлаку по незахололому першому. При товщині металу 20...25 мм і більше застосовують зварювання каскадом або зварювання гіркою. Такі способи зварювання забезпечують більше рівномірний розподіл температури і значне зниження зварних деформацій.

Способи виконання зварних швів по довжині залежать від їх протяжності. Умовно розрізняють короткі шви до 250 мм, середні шви завдовжки 250...1000 мм і довгі шви протяжністю більше 1000 мм. Короткі шви виконують зварюванням на прохід. Шви середньої довжини зварюють або від середини до країв, або зворотно-ступінчастим способом. Зворотно-ступінчастий спосіб полягає в тому, що увесь шов розбивають на ділянки і кожен ділянку зварюють в напрямі, зворотному загальному напрямку зварювання. Кінець кожної ділянки співпадає з початком попереднього. Довжина ділянки вибирається в межах 100...300 мм залежно від товщини металу і жорсткості зварюваної конструкції. Довгі шви зварюють також зворотно-ступінчастим способом.

## 2.10 Визначення режиму ручного дугового зварювання

Діаметр електроду вибирають в залежності від товщини зварюваних деталей, виду зварного з'єднання, довжини шва згідно таблиці 2.3.

За вибраним діаметром електроду визначаємо силу зварювального струму:

$$I_{зв} = (20 + 6 \cdot d_e) \cdot d_e, \text{ А/мм.} \quad (2.11)$$

Зварюваність сталі визначають за еквівалентним вмістом вуглецю:

$$C_{екв} = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{10} + \frac{Mo}{10} + \frac{V}{10} + \frac{Cu}{13} \quad (2.12)$$

де  $C, Mn, Si, Ni, Cr, Mo, V, Cu$  – вміст елементів в салі, %.

Якщо  $C_{екв} < 0,3\%$  то сталь добре зварюється в звичайних умовах, а якщо  $C_{екв} > 0,3\%$ , то під час зварювання необхідно застосовувати підігрів [17].

Температуру попереднього підігріву визначаємо за формулою:

$$T = 350 \cdot \sqrt{C_{екв} \cdot (1 + 0,005 \cdot S) - 0,25}, \quad (2.13)$$

де  $S$  – товщина зварюваних деталей, мм.

При  $C_{екв} > 0,45\%$  обов'язків підігрів перед та після зварювання при  $t=600...700$  °С.

Довжину дуги визначаємо за формулою:

$$L_{дуги} = 0,5 \cdot (d_e + 2), \text{ мм.} \quad (2.14)$$

Напруга зварювання:

$$U_{зв} = U_{ак} + L_{дуги} \cdot U_{д}, \text{ В} \quad (2.15)$$

де  $U_{ак} = 10...12$  В;  $U_{д} = 2...3$  В при  $1,25 \leq I_{кор} / I_{роб} \leq 2$ .

Маса наплавляемого металу:

$$Q_H = V_H \cdot c, \text{ кг} \quad (2.16)$$

де  $V_H$  – об'єм наплавляемого металу,

$$V_H = F \cdot l_{шва}, \text{ мм}^3, \quad (2.17)$$

де  $F$  – площа поперечного перерізу шва, мм<sup>2</sup>.

$$F = \frac{1}{2} \cdot k \cdot (k \cdot \cos 45), \quad (2.18)$$

де  $k$  – катет шва, мм.

$c$  – щільність металу ( $c=7,85$  г/см<sup>3</sup>).

Витрата електродів для ручного дугового зварювання:

$$Q_e = K_e \cdot Q_H. \quad (2.19)$$

Час горіння дуги (тривалість зварювання деталі):

$$t_0 = \frac{Q_H}{I_{зв} \cdot \delta_H}, \text{ год} \quad (2.20)$$

де  $\delta_H$  – коефіцієнт наплавки, г/А год ( $\delta_H = 8,5$  г/А год).



Швидкість зварювання визначають за формулою:

$$v = l_{\text{шва}}/t_0, \text{ м/ГОД.} \quad (2.21)$$

### Висновки за розділом

В даному розділі проаналізовано технологічні особливості процесу ручного електродугового зварювання та параметрів, які впливають на ефективність виконання зварних швів. З аналізу встановлено, що основними параметрами, від яких залежать можливі втрати електродів на розбризування та угар є правильність їх підбору під задані умови зварювання, значення зварювальних струму та напруги, а також постійне підтримування стабільної довжини дуги.

## 3 МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1 Опис зварювального обладнання

Інверторний зварювальний апарат TWI-300 PR призначений для електродугового зварювання електродами різних типів (стандартні, рутилові, з нержавіючої сталі, інші) постійним струмом під час будівельно-монтажних, ремонтно-відновлювальних робіт, ремонті транспорту та інших де можуть бути застосовані зварні з'єднання в місцях з наявністю електромережі 220 В.

Зовнішній вигляд зварювального апарату TWI-300 PR зображений на рисунку 3.1.

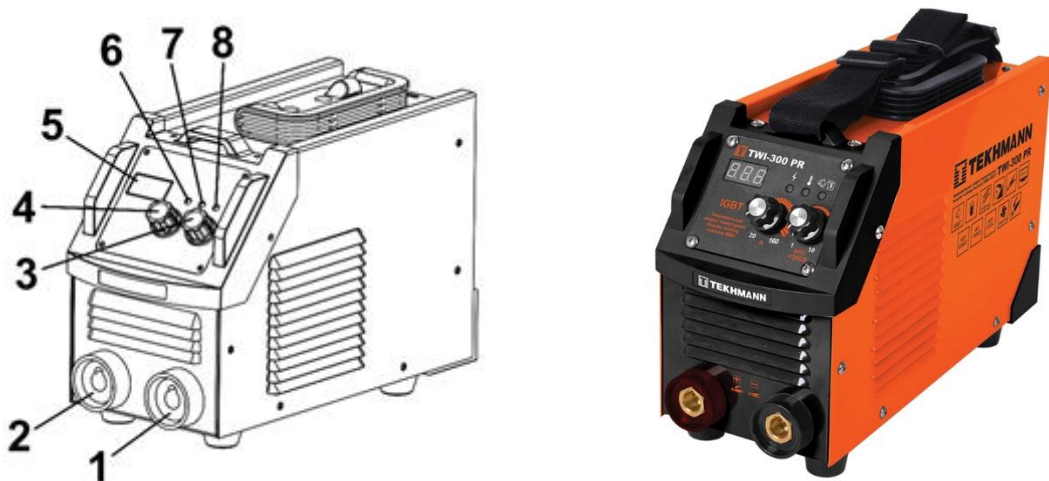


Рисунок 3.1 – Зварювальний апарат Tekhmann TWI-300 PR

1 - клемма «-» для підключення кабелю з робочим затискачем; 2 - клемма «+» для підключення зварювального кабелю з електродотримачем; 3 - регулятор ступеня форсування зварювальної дуги «ARC force»; 4 - регулятор струму зварювання; 5 - дисплей, на якому відображається встановлений струм зварювання; 6 - індикатор живлення; 7 - індикатор термостатичного захисту; 8 - індикатор «QC», який поєднує три функції захисту електроніки виробу

Конструкція апарату реалізована у вигляді металевого прямокутного корпусу. На фронтальній панелі корпусу виведені: регулятор сили зварювального струму 4; регулятор ступеня форсування зварювальної дуги

«ARC force» 3; світлові індикатори 6, 7, 8; рідкокристалічний дисплей 5 для цифрової індикації зварювального струму; клеми 1 і 2 для під'єднання зварювальних кабелів із затискачем та електродотримачем. Поверхня корпусу має штамповані щілинні вікна з захисними полками від попадання вертикально падаючих крапель води у внутрішню порожнину [9].

Таблиця 3.1 – Технічна характеристика зварювального апарата  
Tekhmann TWI-300 PR

Найменування параметра	Значення
Максимальна потужність, кВА	6800
Номінальна змінна напруга живлення, В	170-270
Номінальна частота струму, Гц	50 (60)
Струм живлення, А	31
Діапазон регулювання зварювального струму, А	20-160
Коефіцієнт навантаження (X) або «робочий цикл»*, у % за 10 хвилин при зварюванні товщиною 3,2 мм та температурі 25 °С	До 100
Напруга холостого ходу, В	50 (VRD-35V)
ККД, %	≥80
Коефіцієнт потужності (cos φ)	0,9
Діаметр електродів, мм	1,6-4,0
Ступінь захисту корпусу	IP21S
Клас теплостійкості ізоляції	F
Вага нетто/брутто, кг	5,6/6,6

На тилівій поверхні розташований вентилятор системи охолодження виробу захищений дротовою решіткою і клавіша «Увімк/Вимк» виробу до мережі живлення. Електронні блоки виробу закріплені у внутрішній порожнині корпусу. Для під'єднання до електромережі використовується шнур з 3-х контактною вилкою, один з яких служить для захисного заземлення. Пуск апарата, під'єданого до мережі відбувається клавішею «Увімк/Вимк», після чого зелений світлодіод індикатору 6 почне світитися.

Електрична частина виробу складається з електронних блоків, приладів індикації, вимикачів та регуляторів електричного струму, вентилятора, з'єднувальних проводів і мережевого шнура. Захист від ураження електричним струмом користувача даного апарату відповідає класу I за ДСТУ EN 61140:2015.I, що передбачає необхідність під'єднання захисного заземлення під час роботи. Ізоляція виробу витримує нагрів до 155 °С, що відповідає класу теплостійкості F за ГОСТ 8865-70.

На нижній поверхні корпусу закріплені 4 амортизаційні опори для встановлення на рівній поверхні, а для зручності користування, корпус має прорізи для під'єднання транспортної наплічної стрічки.

Апарат оснащений примусовою вентиляцією, тому ні в якому разі не можна закривати його вентиляційні отвори.

Зварювальний апарат інверторного типу виконує функцію перетворювача змінного струму 1-фазної мережі 220 В частотою 50 Гц в зварювальний постійний струм з високим рівнем стабільності. Принцип інверторного перетворювання базується на властивостях високочастотного струму до можливості передачі енергії високої щільності в малих габаритах провідників та електронних елементів. Конструкція базується на використанні мостових біполярних транзисторів з ізольованими затворами достатньої потужності (IGBT). Електронні блоки виробу знижують підведену напругу мережі, підвищують її частоту з 50 Гц до значення вище 30 кГц, і генерують стабільний постійний струм для зварювання з регульованою силою в межах 20-300 А за принципом широко-імпульсної модуляції.

Зварювальний апарат інверторного типу, на відміну від традиційних трансформаторних з випрямленням струму діодами:

- не викликає сплесків напруги в електромережі під час роботи, що дозволяє без перешкод використовувати його в побуті;
- не має залежності зварювального струму від коливань струму в мережі, що за рахунок наявності стабільного зварювального струму полегшують роботу зварника;
- при використанні не впливає на роботу інших мережевих побутових приладів;
- має в схемних рішеннях електронних блоків закладені захисні функції (вимкнення дуги при перегріві елементів конструкції за допомогою терморезисторів і при «залипанні» електрода з надмірним підвищенням виділення енергії) та допоміжні функції при зварюванні («гарячий старт» за рахунок короткочасного підвищення зварювального струму в момент

підпалювання дуги, «форсаж дуги» за рахунок автоматичного підвищення зварювального струму при зниженні зварювального зазору на межі залипання);

– має компактні розміри і вагу, що дозволяє підвищити зручність і мобільність під час роботи.

Функції індикаторів на панелі керування:

– індикатор підключення до електромережі 6 починає світитися після включення живлення;

– індикатор термостатичного захисту 7 вимкнений, якщо зварювальний апарат працює нормально. Світло даного індикатора свідчить про те, що перевищена температура всередині корпусу і спрацював термічний захист. Виріб при цьому ввімкнений, але електроживлення не подається доти, поки не буде досягнута нормальна температура. Після необхідного охолодження апарат запускається автоматично;

– індикатор «QC» 8 поєднує індикацію роботи трьох функцій захисту електроніки виробу. Індикатор світиться у випадку спрацювання функції/функцій захисту при струмовому перевантаженні у вхідній мережі, захисту від перевантаження вихідних транзисторів IGBT, захисту від низької напруги в електромережі.

Вбудовані функції зварювального апарата:

- функція "Гарячий старт" (Hot start): для забезпечення кращого підпалу дуги під час контакту електрода з заготовкою відбувається автоматичне короткочасне підвищення зварювального струму;

- функція запуску апарата при контакті електрода з заготовкою "TOUCH START": забезпечує швидкий вихід на робочий режим з режиму очікування і в сукупності з іншими функціями забезпечує економію енерговитрат;

- функція безпечного режиму очікування "STAND BY": забезпечує перехід виробу в режим очікування після відсутності зварювання протягом 5 хвилин;

- функція відключення вентилятора "SMART FAN" при бездіяльності та при нормальній температурі всередині апарата;

- функція "Форсаж дуги" (Arc force): автоматичне підвищення


зварювального струму в момент виникнення короткої дуги, що збільшує зону проплаву для запобігання залипання електрода;

- функція "Анти-залипання електрода" (Anti stick): у випадку злипання електрода з поверхнею заготовки, блок управління через незначний час вимикає струм зварювання для попередження "прожарювання" електрода з подальшим відновленням нормального режиму після відриву електрода;

- функція "VRD": при випадковому замиканні зварювального контуру через незахищені частини тіла оператора відбувається миттєве зниження напруги холостого ходу до безпечного для організму людини (значення 35 В);

- функція захисту електронних компонентів від термічного та струмових перевантажень.

Електродотримач має універсальну конструкцію для використання всіх типів стандартних електродів з обмазкою для зварювання металів. Струм зварювання виставляється потенціометром 4 залежно від типу і діаметра встановленого електрода, параметрів заготовки, складу металу, типу зварного з'єднання та інших умов.

Апарат обладнаний захистом від високих перевантажень. Коли починає світитися індикатор  це означає, що апарат перевантажений і переходить в режим очікування. Для продовження роботи необхідно вимкнути електроживлення апарата на 15 секунд, а потім знов увімкнути електроживлення. Після цього можна продовжити роботу.

### 3.2 Підготовка апарата до використання

Після транспортування апарата в зимових умовах, перед його ввімкненням у теплом приміщенні, необхідно витримати його в тарі при кімнатній температурі не менше 2 годин до повного зникнення конденсату вологи на ньому:

- перш ніж підключити зварювальний апарат до електромережі, переконайтеся, що параметри електромережі відповідають вимогам, зазначеним

у інструкції та на зварювальному апараті;

- перед підключенням переконайтеся, що електромережа є однофазною з окремим проводом заземлення;
- перевірте цілісність зварювального апарату та шнура електроживлення;
- у випадку використання подовжувача переконайтеся, що подовжувач розрахований на потужність зварювального апарату;
- перед роботою з апаратом необхідно переконатися у відсутності негативних наслідків впливу електромагнітних коливань виробу в конкретному місці (електромагнітна сумісність). Слід переконатися, що виконання зварювальних робіт не створює перешкоди в роботі:

1. іншим мережам – управління, телефонним, охоронним що проходять зверху, знизу і безпосередньо наближені до апарату;
2. радіо- і телевізійним приймачам та передавачам;
3. комп'ютерам та іншій оргтехніці;
4. обладнанню, яке відповідає за безпеку виробничих об'єктів;
5. пристроям, пов'язаним зі здоров'ям оточуючих людей (електронні стимулятори серця, слухові апарати тощо);
6. електронні контрольні-вимірювальні прилади тощо.

Місце для встановлення апарату необхідно обирати з умови відсутності небезпечних випарів, пилу, вологи, забезпечення стійкого його положення під час роботи та можливості нормальної роботи вмонтованої системи охолодження (вентиляційні отвори не повинні бути закриті) [21].

Мережа для під'єднання апарату повинна мати надійне заземлення, підведене в розетку та мати струмовий захист типу запобіжника.

Перед увімкненням переконайтеся, що напруга, яка зазначена на таблиці апарату, відповідає напрузі та частоті електромережі.

Виконання будь-яких підключень до зварювального контуру апарату необхідно здійснюватися при його від'єднанні від мережі. Зварювальний кабель з електродотримачем, як правило, приєднується до клеми «+» (2 на рис. 3.1). Зварювальний кабель з робочим затискачем з'єднується, як правило, з клемою

«—» (1 на рис. 3.1), іншим кінцем повинен приєднуватися до заготовки або робочого місця якомога ближче до шва який буде виконуватися [21].

Для встановлення кабелів необхідно вставити штекер кабелю у відповідне гніздо так, щоб контакт штекера входив в паз до кінця. Після чого поверніть штекер кабелю вправо до упору і переконайтеся, що він надійно зафіксований. Клему кабелю із затискачем слід приєднувати тільки на очищену поверхню до надійного контакту на мінімальній відстані від майбутнього шва. Зварник має постійно слідкувати за станом контактних поверхонь електродотримача і періодично очищати їх від нагару.



Рисунок 3.2 – Робоче місце зварювальника

Для встановлення електрода необхідно розвести важелі тримача і вставити електрод необхідного діаметру кінцем без покриття, після чого зафіксувати його пружними важелями тримача.

Під час роботи апарата зварювальні кабелі повинні бути надійно зафіксовані в клеммах, що забезпечує хороший електричний контакт. Поганий контакт швидко призведе до перегріву, зносу та виведенню з ладу клем. Не



рекомендується використовувати зварювальні кабелі довжиною більше 5 м. З метою безпеки та надійної роботи апарата не використовуйте саморобні замінники кабелю з затискачем («кліщі»).

Перед запалюванням дуги слід встановити необхідну силу струму зварювання маховичком регулятора струму зварювання 4. Сила струму залежить від марки і діаметра електрода, типу металу, типу зварного з'єднання і інших умов.

Переважно зварювальні електроди підключаються до клеми «+», хоча деякі типи електродів повинні підключатися до клемою «-». Важливо використовувати інструкції фірми-виробника на пакуванні електродів визначення переважного способу та режимів зварювання. Зварювальний струм потрібно регулювати залежно від діаметра використовуваного електрода та від типу зварювального шва. Рекомендації про допустимі струми зварювання залежно від типу та діаметру електрода наведені в таблиці 3.2 [9, 21].

Таблиця 3.2 – Рекомендовані значення зварювального струму

Діаметр електрода, мм	Тип електрода	Товщина металу, мм	Зварювальний струм, А	
			Мінімальний	Максимальний
1,6	Рутиловий	1,5-2,0	30	55
	Фтористо-кальцієвий		50	75
2,0	Рутиловий	1,5-30	40	70
	Фтористо-кальцієвий		60	100
2,5	Рутиловий	1,5-5,0	50	100
	Фтористо-кальцієвий		70	120
3,2	Рутиловий	4,0-12	90	140
	Фтористо-кальцієвий		110	160
4,0	Рутиловий	6,0-16	130	200
	Фтористо-кальцієвий		160	220
5,0	Рутиловий	10-25	190	260
	Фтористо-кальцієвий		210	290

Діаметр електрода обирається залежно від товщини металу, який необхідно зварити і від його підготовки. Залежно від діаметру електрода, більш високі значення зварювального струму використовуються для зварювання горизонтальних швів, тоді як вертикальні (так зване «стельове зварювання») виконуються на більш низьких значеннях зварювального струму.

Механічні характеристики зварювального шва окрім сили струму залежать від:

- діаметру та складу матеріалів електрода;

- довжини дуги;
- швидкості та положення при виконанні зварювання;
- якості електродів, на яку впливає правильне зберігання (вони повинні бути захищені від впливів навколишнього середовища, та зберігатися в спеціальній упаковці).

### 3.3 Характеристики електродів, які використовувались в експериментальних дослідженнях

Зварювальні електроди Моноліт РЦ застосовуються для виконання операцій ручного дугового зварювання різних конструкцій з вуглецевих і низьколегованих сталей. Моноліт РЦ - це електроди з рутил-целюлозною обмазкою. Ці електроди застосовуються для зварювання звичайних та відповідальних конструкцій. За їх допомогою можна зварювати будь-які види швів: кутові, стикові, напускові при товщині заготовок від 3 до 20 мм. Вони відповідають стандартам: ГОСТ Е46, AWS E6013, ISO 2560-A-E 42 0 RC 11.

Електроди Моноліт є універсальними, тобто можуть застосовуватися для зварювання на постійному і змінному струмі будь-якої полярності в будь-яких просторових положеннях. Електроди діаметром 5 мм мають обмеження по вертикальному зварюванні зверху-вниз.

Перевагою їх використання є легкість розпалювання дуги, як на початку зварювання, так і після перерви в процесі роботи. Після формування зварного шва шлак відділяється без особливих зусиль. У процесі зварювання покриття плавиться рівномірно, а втрати на розбризування мінімальні.

Зварювальні електроди Tekhmann E6013 відрізняються легким початковим і повторним запалюванням, м'яким і стабільним горінням дуги, забезпечують незначні втрати металу на розбризування, рівномірне плавлення покриття, хороше формування шва, легке відділення шлакової кірки. Електроди Tekhmann E6013 малочутливі до якості підготовки крайок, наявності іржі та інших забруднень поверхні деталей. Вони призначені для ручного дугового зварювання конструкцій з низьковуглецевих і низьколегованих сталей з межею текучості до

380 МПа у всіх просторових положеннях на змінному та постійному струмі зворотної полярності.

Електроди ПАТОН АНО-21 Еко - високоякісні витратні матеріали для ручного дугового зварювання. Ці електроди призначений для робіт зі звичайними та відповідальними конструкціями і можуть працювати з низьковуглецевими сталями всіх марок.

Електроди ПАТОН АНО-21 Еко можна використовувати для зварювання стиків, кутів і напусків. Рекомендована робоча товщина металу становить 3...20 мм. Ними рекомендується зварювати неповоротні стики водопроводів і газопроводів з низьким тиском та кореневі шви металу. Можуть працювати зі змінним і постійним струмом (будь-яка полярність) при напрузі холостого ходу понад 50 В. Покриття електродів - рутилово-целюлозне. Рекомендовані всі просторові положення зварювання. Перед зварюванням ці електроди не вимагають прокалювання, якщо до цього були дотримані всі умови зберігання. Якщо вони зберігались в середовища підвищеної вологості, то рекомендуємо прокалити їх перед початком робіт при температурі 110...130 градусів протягом 40 хвилин.

Зварювальні електроди УОНІ-13/55 від фірми Мендол - це одні з найбільш поширених у застосуванні для виконання ручного дугового зварювання. По конструкції - це електроди з основною обмазкою.

Їх застосовують для зварювання особливо відповідальних конструкцій з низьколегованих і вуглецевих сталей в тому випадку, коли до металу шва висуваються вимоги щодо ударної в'язкості і пластичності. Шов, отриманий із застосуванням електродів УОНІ-13/55, відрізняється високою стійкістю до появи кристалізаційних тріщин і зниженим вмістом вуглецю. Їх часто застосовуються при спорудженні складних, навантажених конструкцій, наприклад, мостів, трубопроводів тощо.

Електроди УОНІ-13/55 призначені для зварювання на постійному (DC) струмі зворотної полярності в більшості просторових положень, крім вертикального «зверху-вниз».

При роботі з ними потрібно врахувати, що вони, на відміну від інших, більш вимогливі до стану зварювальних поверхонь. Оптимальний шов отримують при роботі короткою дугою по очищених кромках. Розбризкування в процесі зварювання помірне, відділення шлаку задовільне. Вони відповідають стандартам: ГОСТ E50A, AWS E7015, ISO E514B20, DIN E4340B10, EN E380B22H10

Електроди Dnipro-M Ultra 6013 мають рутилово-целюлозний тип покриття і призначені для ручного дугового зварювання відповідальних конструкцій і конструкцій загального призначення з низьковуглецевих марок сталей. Вони дають можливість виконувати зварювальні роботи в усіх просторових положеннях, згідно ISO 2560. Завдяки високій міцності шва (420 МПа) забезпечується отримання надійних зварних з'єднань.

В роботі електроди Dnipro-M забезпечують стабільний перший і повторний підпал дуги при зварюванні короткими швами, прихватками і періодичними відривами, забезпечують формування стійкої еластичною зварювальної дуги, легке керування зварювальною ванною, контрольовану текучість та легке відділення шлаку. Ними можна проводити зварювальні роботи в усіх просторових положення, зокрема «вертикаль на спуск», чого не дозволяють зробити більшість рутилових електродів. Також їх можна використовувати для зварювання тонкого металу.

Як і електроди ПАТОН вони не мають необхідності в прожарюванні перед початком роботи, мають малу кількість зварювальних бризок, малочутливі до якості підготовки кромок, іржі та інших поверхневих забруднень.

Зварювання можна проводити змінним і постійним струмом будь-якої полярності, хоча рекомендованою є зворотня полярність. При зберіганні в приміщенні з підвищеною вологістю, перед використанням електроди потрібно просушити за температури від +90 °C до + 120 °C протягом 50...70 хвилин.

Електроди серії Ultra 6013 відповідає американському і міжнародному стандартам: AWS A5.1: E6013; ISO 2560-AE 42 0 RC 11

### 3.4 Методика зварювальних властивостей електродів

Оцінку показників зварювальних властивостей виконують методом експертних оцінок у балах згідно з табл. 3.1, за кінцеву оцінку беруть суму середніх показників. При цьому слід мати на увазі, що оцінка будь-якого з п'яти показників, яка дорівнює двом або менше одного балу, а також сумарна оцінка всіх п'яти показників для даного режиму випробувань менше за 15 балів вважається незадовільною [19].

Таблиця 3.3 - Показники оцінку зварювальних властивостей

Показник	Оцінка в балах	Характеристика показника
Початкове запалювання дуги	1	<b>Погане.</b> Рідке запалювання або відсутність запалювання.
	2	<b>Важке.</b> Запалювання після багаторазового зіткнення електрода з виробом та приварюванням електрода.
	3	<b>Задовільне.</b> Запалювання після кількох (трьох-чотирьох) зіткнень електрода з виробом.
	4	<b>Добре.</b> Запалювання після легкого руху електрода (першого або другого) по металу.
	5	<b>Легке.</b> Запалювання одразу після зіткнення електрода з металом
Стабільність процесу горіння дуги	1	<b>Дуже велике.</b> Дуже багато великих бризок поблизу шва, які важко вилучаються.
	2	<b>Велике.</b> Багато великих бризок поблизу шва, які важко вилучаються.
	3	<b>Підвищене.</b> Зменшена кількість великих та малих бризок поблизу шва, які легко вилучаються.
	4	<b>Помірне (цілком допустиме).</b> Малих бризок, які рівномірно розподілені поблизу шва.
	5	<b>Мале.</b> Мало дрібних бризок на поверхні зразка
Якість формування шва	1	<b>Погана.</b> Валик нерівномірний за шириною та висотою, крупнолускатий, з видимими шлаковими включеннями і порами.
	2	<b>Низька.</b> Валик нерівномірний за шириною та висотою, крупнолускатий.
	3	<b>Задовільна.</b> Валик крупнолускатий з окремими нерівностями по висоті та перевищеннями по краях шва.
	4	<b>Добра.</b> Валик дрібнолускатий з рідкими нерівностями по висоті та невеликими перевищеннями по краях шва.
	5	<b>Дуже добра.</b> Валик рівномірний, гладкий або дрібнолускатий з плавним переходом до основного металу
Еластичність дуги	1	<b>Погана.</b> При спробі подовження дуга одразу обривається.
	2	<b>Низька.</b> Потрібне постійне підтримування короткої дуги. При незначному подовженні дуга обривається.
	3	<b>Задовільна.</b> Дуга подовжується візуально до подвійного діаметра стрижня електрода при помітній зміні інтенсивності розплавлення електрода.
	4	<b>Добра.</b> Дуга подовжується візуально до потрібного діаметра стрижня електрода при невеликій зміні інтенсивності розплавлення електрода.
	5	<b>Висока.</b> Дуга подовжується візуально до потрібного (або більше) діаметра стрижня електрода при практично незмінній інтенсивності розплавлення електрода

*Примітка.* У межах 2...5 балів допускаються оцінки з інтервалом у 0,5 бали.

Перед початком досліджень готували зварювальний інвертор до зварювання та послідовно перевіряли його роботу в режимі холостого ходу, в діапазонах малих і великих струмів. Далі встановлювали необхідний струм зварювання, передбачений для даного діаметра електрода. Форсування дуги не застосовувалось.

Виконували наплавлення валиків по осі пластини шляхом розплавлення одного електрода по всій його довжині, крім недогарку довжиною  $70 \pm 10$  мм. Під час досліду записували експертні оцінки показників зварювальних властивостей. Результати занести у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати досліджень показників зварювальних властивостей електродів

Марка електрода	Режим зварювання		Показники зварювальних властивостей				
	Середній струм дуги $I_2, A$	Повторність	Початкове запалювання дуги	Стабільність процесу горіння дуги	Розбризкування металу	Якість формування шва	Еластичність дуги
Моноліт РЦ, $de = 3$ мм	110	1	4	4,5	5	4	4
		2	5	5	4	5	5
		3	5	4	4	4	5
Tekhmann, $de = 2,5$ мм	90	1	4	4	4	4	4
		2	5	4	4	5	4
		3	3	4	4	3	4
Патон, $de = 4$ мм	100	1	4	4	3	4	5
		2	3,5	3	4	5	4
		3	4	4	5	4	4
Мендол, $de = 3$ мм	100	1	2,5	3	3	5	3
		2	2	2,5	2	4	5
		3	2	3	3	4	4
Dnipro-M, $de = 3$ мм	90	1	3,5	4	2	3	3
		2	5	3,5	2	4	4
		3	5	5	3	4	4

Розрахункові середні значення показників зварювальних властивостей електродів заносимо в табл. 3.5 і порівнюємо їх.

Таблиця 3.5 - Розрахункові середні значення показників зварювальних властивостей електродів

Показники зварювальних властивостей	Середнє значення показника				
	Моноліт РЦ	Tekhmann	Патон	Мендол	Dnipro-M
Початкове запалювання дуги	4,67	4,0	3,83	2,17	4,5
Стабільність процесу горіння дуги	4,5	4,0	3,67	2,83	4,17
Розбризкування металу	4,33	4,0	4	2,67	2,33
Якість формування шва	4,33	4,0	4,33	4,33	3,67
Еластичність дуги	4,67	4,0	4,33	4,0	3,67
Сумарний бал	<b>22,5</b>	<b>20</b>	<b>20,16</b>	<b>16</b>	<b>18,34</b>

За даними табл. 3.5 робимо висновки щодо якості зварювальних властивостей досліджуваних електродів. Так, за результатами досліджень найкращу якість за досліджуваними показниками має електрод «Моноліт РЦ», для якого сумарний оціночний бал склав 22,5. Найгіршу якість показали електроди «Мендол», які набрали всього 16 балів.

### 3.5 Методика та результати досліджень технологічних характеристик процесу РДЗ покритими штучними електродами

Технологічними характеристиками, за якими оцінюють електроди, є:

- коефіцієнт розплавлення

$$\alpha_p = \frac{m_p}{I \cdot t}, \quad (3.1)$$

де  $m_p$  – маса розплавленого металу електрода, г;

$I$  – сила зварювального струму, А;

$t$  – час зварювання, год.

Значення  $\alpha_p$  для електродів, призначених для зварювання маловуглецевих сталей, коливається в межах 7...13 г/(А·год);

- коефіцієнт наплавлення

$$\alpha_H = \frac{m_H}{I \cdot t}, \quad (3.2)$$

де  $m_H$  – маса наплавленого металу, г.

Коефіцієнт  $\alpha_H$  для більшості електродів дорівнює 6...12,5 г/(А·год) [19];

- коефіцієнт втрат, значення якого змінюється у діапазоні 5...25 %:

$$\varphi = \left(1 - \frac{m_H}{m_P}\right) \cdot 100\%, \quad (3.3)$$

- коефіцієнт маси покриття

$$K_{II} = \frac{m_{II}}{m_M} \quad (3.4)$$

де  $m_{II}$  – маса покриття, г;

$m_M$  – маса металевого стрижня, г.

Характеристики електродів використовують для нормування зварювальних робіт і розрахунку витрат електродів. Коефіцієнт наплавлення характеризує продуктивність процесу зварювання. Чим більше значення  $\alpha_H$ , тим вища продуктивність зварювання  $\Pi_{ЗВ}$ .

$$\Pi_{ЗВ} = \alpha_H \cdot I_{ЗВ} \quad (3.5)$$

Витрати покритих електродів  $G_{ел}$  визначають за витратами дроту  $G_{др}$  або наплавленого металу  $G_H$ .

$$G_{ел} = G_{др} \cdot (1 + K_1) = G_{др} \cdot (0,9 + K_1); \quad (3.6)$$

$$G_{др} = \frac{m_M}{\alpha_e} = \lambda \cdot \left(\frac{m_M}{(1-\varphi)}\right); \quad (3.7)$$

де

$$m_H = \rho \cdot F_H \cdot L. \quad (3.8)$$

Звідси

$$G_{ел} = (1 + K_1) \cdot \left(\frac{\lambda \cdot m_M}{(1-\varphi)}\right) = (1 + 0,9K_1) \cdot \left(\frac{\lambda \cdot m_H}{(1-\varphi)}\right), \quad (3.9)$$

де  $K_1$  – відношення маси покриття до маси всього електроду стержня;

$K$  – коефіцієнт маси покриття;

$\alpha_e$  – коефіцієнт використання електрода;

$\lambda$  – відношення довжини стержня електрода до довжини тієї її частини, яка розплавлюється;



$\varphi$  – коефіцієнт втрат;

$\rho$  – густина наплавленого металу, г/см<sup>3</sup>;

$F_H$  – площа наплавлення, мм<sup>2</sup>;

$L$  – довжина шва, мм.

Коефіцієнти  $K$  і  $K_1$  визначають за формулами:

$$K = \frac{(m_e - m \cdot L_e)}{(m \cdot L_0)} \quad (3.10)$$

та

$$K_1 = \frac{(m_e - m \cdot L_e)}{(m \cdot L_e)} \quad (3.11)$$

де  $m_e$  – маса електрода, г;

$L_e$  – довжина електрода, см.

$L_0$  – довжина покритої частини електрода, см.

$m$  – маса 1 см електродного дроту даного діаметра, г.

Для проведення досліджень використовувались зразки сталених пластини для наплавлення валиків. Перед початком випробувань їх зважували та записували їх початкову масу в табл. 3.6.

В процесі досліджень використовували штучні покриті електроди з різним видом покриття. Вимірювали їх початкову довжину, діаметр металевго стрижня, зважували електроди, розраховували масу металевго стрижня та масу покриття. Результати заносили в табл. 3.6.

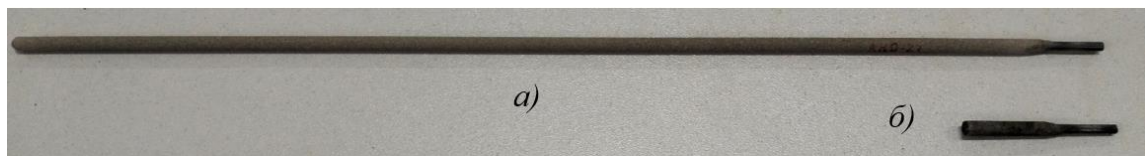


Рисунок 3.3 – Електрод до (а) та після (б) зварювання



Рисунок 3.4 – Вимірювання кінцевої довжини електрода

Масу електродів та їх залишків після зварювання визначали шляхом зважування на лабораторних аналітичних вагах CAS MWP-3000 Н. Дана модель має високий (II) клас точності згідно ДСТУ EN 45501:2007. Найбільша вимірювана маса складає 3 кг, а похибка зважування – 0,005 г.



Рисунок 3.5 – Вимірювання маси електрода та його залишку

Далі цими електродами наплавляли валики на пластинах. В процесі наплавлення фіксували значення сили струму  $I_{зв}$ , напруги на дузі  $U_d$ , секундоміром фіксувати час наплавлення  $t$ . Значення також заносили в табл. 3.6.

Після повного охолодження виконували повторне зважування пластин та вимірювали залишкову довжину електродів.



Рисунок 3.6– Вимірювання маси пластини до (а) та після (б) зварювання

За результатами експериментальних досліджень розраховували коефіцієнти розплавлення, наплавлення, втрат і маси покриття для досліджених марок електродів та визначали продуктивність зварювання, витрату електродного дроту та витрату електрода.

Таблиця 3.6 - Протокол досліджень технологічних характеристик процесу РДЗ покритими штучними електродами

№	Параметр	Електрод				
		Моноліт	Tekhmann	Пагон	Мендол	Dnipro-M
1	Марка електрода					
2	Діаметр електрода $d_e$ , мм	3	2,5	4	3	3
Електрод						
3	Початкова маса електрода $m_{еп}$ , г	25,9	14,84	60,30	25,3	21,50
4	Кінцева маса електрода $m_{ек}$ , г	3,5	1,33	5,85	1,2	2,82
5	Початкова маса стрижня $m_{сп}$ , г	19,41	13,48	44,37	19,41	19,41
6	Кінцева маса стрижня $m_{ск}$ , г	2,93	1,46	5,23	0,91	2,50
7	Маса розплавленого металу $m_p$ , г	16,48	12,02	39,14	18,5	16,92
8	Початкова довжина електрода $L_e$ , мм	350	350,00	450,00	350	350,00
9	Кінцева довжина електрода $L_e$ , мм	53	38,00	53,00	35	45,00
10	Різниця $\Delta L$	297	312,00	397,00	315	305,00
Пластина						
11	Початкова маса пластини $m_{пп}$ , г	772,1	630,00	554,75	780,5	760,00
12	Кінцева маса пластини $m_{ек}$ , г	787,15	637,30	586,00	795,3	774,30
13	Маса наплавленого металу, $m_n$ , г	15,05	7,30	31,25	14,8	14,30
Режим зварювання						
14	Сила струму $I_{зв}$ , А	150	75,00	160,00	120	100,00
15	Напруга на дузі $U_d$ , В	21	15,00	21,60	21	17,00
16	Час зварювання $t$ , с	82	72,00	160,00	115	120,00
Результати розрахунків						
17	Коефіцієнт розплавлення $\alpha_p$	4,82	8,01	5,50	4,83	5,07
18	Коефіцієнт наплавлення $\alpha_n$	4,40	4,87	4,39	3,86	4,29
19	Коефіцієнт втрат $\phi$	8,68	39,25	20,16	20,00	15,46
20	Коефіцієнт маси покриття $K_{п}$	0,33	0,10	0,36	0,30	0,11
21	Продуктивність зварювання $П_{зв}$ , г/год	660,73	365,00	703,13	463,30	429,00
22	Витрата електродного дроту $G_{др}$ , г	25,05	24,89	62,99	26,96	26,35
23	Витрата електрода $G_{ел}$ , г	25,05	27,40	85,61	26,96	29,18

Вплив величини зварювального струму на показники, за якими оцінюють якість електродів, а саме коефіцієнти розплавлення, наплавлення та втрат можна оцінити за залежностями, наведеними на рис. 3.7, 3.8.

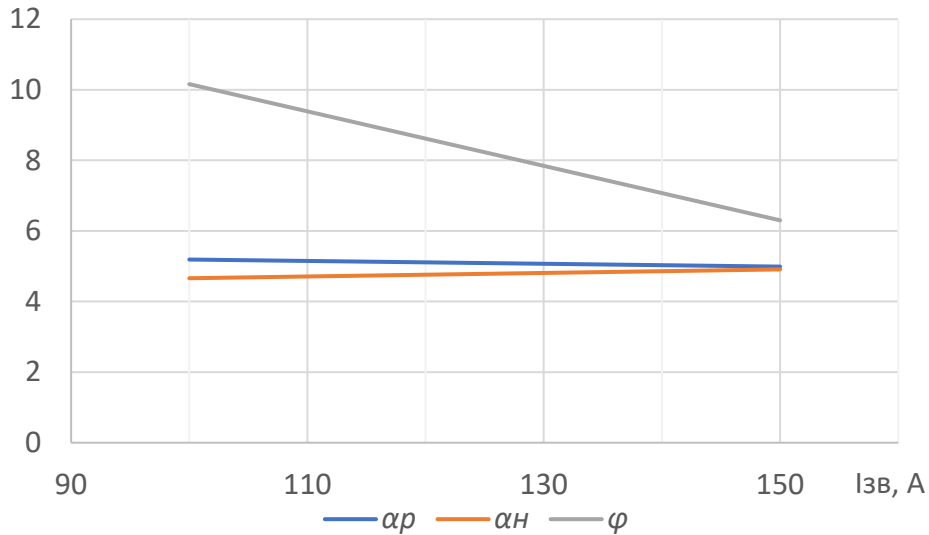


Рисунок 3.7 – Залежності коефіцієнтів розплавлення, наплавлення та втрат від величини зварювального струму для електродів марки Моноліт РЦ (3 мм)

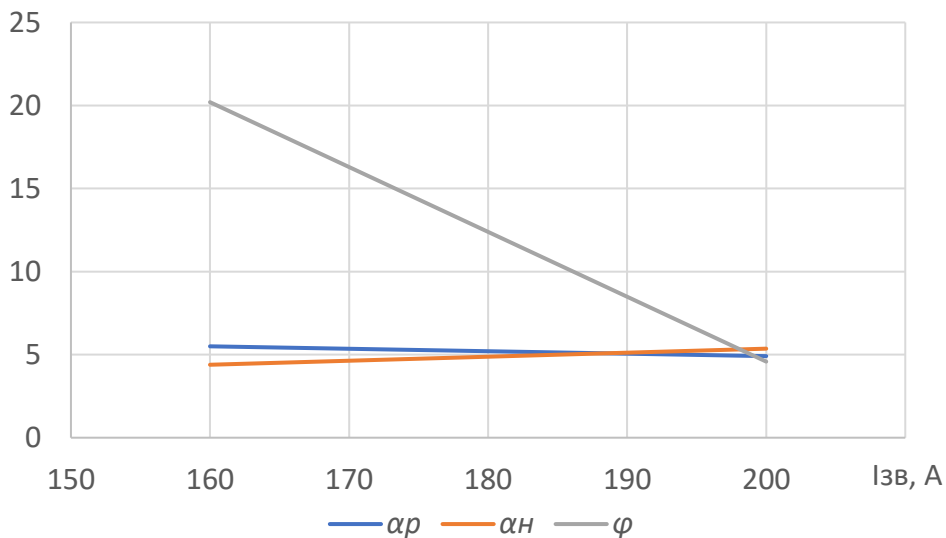


Рисунок 3.8 – Залежності коефіцієнтів розплавлення, наплавлення та втрат від величини зварювального струму для електродів марки Патон АНО-21 (4 мм)

Аналізуючи рис. 3.7 та 3.8 можна зробити висновок, що величина сили струму зварювання найбільше впливає на коефіцієнт втрат електродів. Крім того цей вплив більше проявляється для електродів більшого діаметра. Так

збільшення струму зварювання від 160 А до 200 А для електродів ПАТОН марки АНО-21 діаметром 4 мм призводить до зниження коефіцієнта втрат майже на 75 %. Для електродів діаметром 3 мм марки Моноліт РЦ при збільшенні струму від 100 А до 150 А даний показник зменшувався всього на 37 %.

В процесах ручного електродугового зварювання інверторними зварювальними апаратами на якість зварювання суттєвий вплив має форсування електричної дуги. Тому під час виконання експериментальних досліджень встановлювалась залежність коефіцієнтів розплавлення, наплавлення та втрат для режимів зварювання з вимкненим та максимальним форсуванням дуги. Результати досліджень ілюструють діаграми на рис. 3.9 та 3.10.

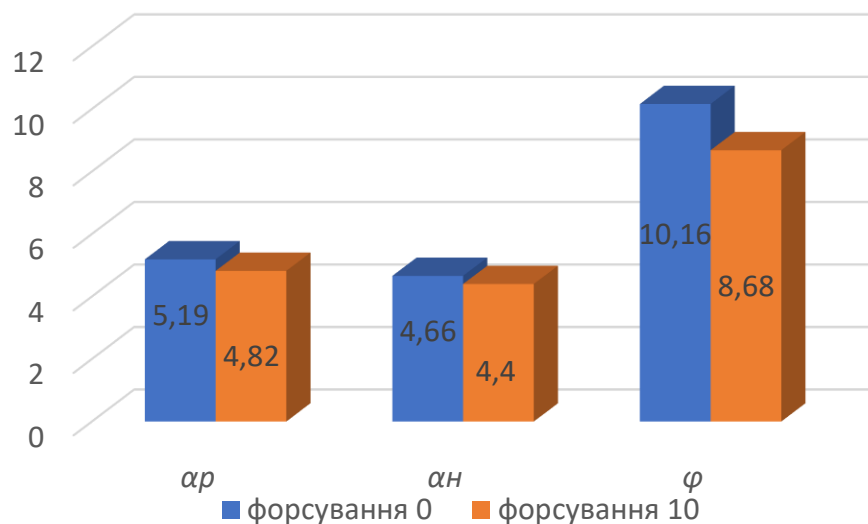


Рисунок 3.9 – Залежності коефіцієнтів розплавлення, наплавлення та втрат від форсування дуги для електродів марки Моноліт РЦ (3 мм)

Я видно з рис. 3.9 і 3.10, при збільшенні форсування дуги призводить до зменшення досліджуваних коефіцієнтів для електродів діаметром 3 мм. Схожа картина спостерігалась і для електродів діаметром 4 мм. Однак, коефіцієнт наплавлення показав зростання на 5,8 %. Це можна пояснити більшими розмірами зварювальної ванни та кращим прогріванням деталі. За таких умов розплавлений метал електрода краще взаємодіє зі зварювальною ванною, а його перехід відбувається стабільніше.

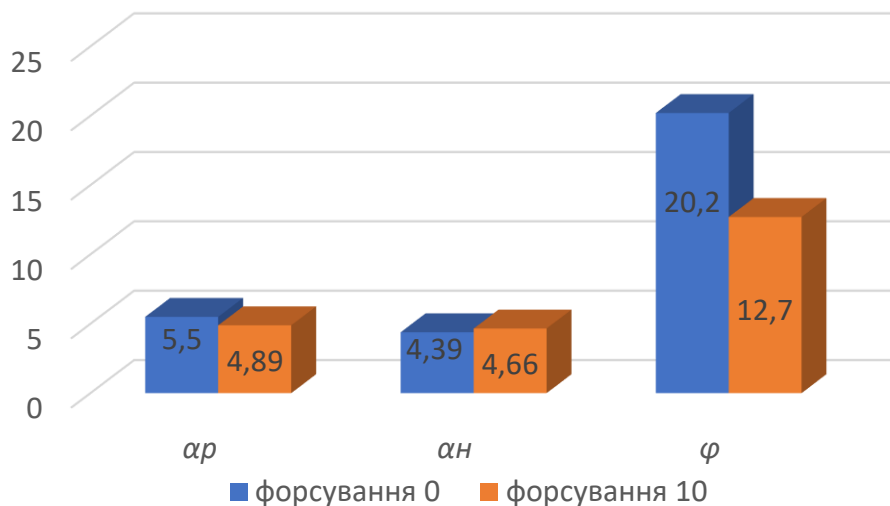


Рисунок 3.10 – Залежності коефіцієнтів розплавлення, наплавлення та втрат від форсування дуги для електродів марки Патон Есо (4 мм)

Для визначення впливу здатності зварювальника підтримувати стабільну довжину дуги на показники ефективності використання електродів проводилось дослідження процесу зварювання на короткій (до 3 мм), середній (6...7 мм) та довгій (більше 10 мм) зварювальній дузі. Даний вплив більше проявляється під час електродів малих діаметрів. Результати досліджень на прикладі електродів фірми Tekhmann діаметром 2,5 мм відображає діаграма на рис. 3.11.

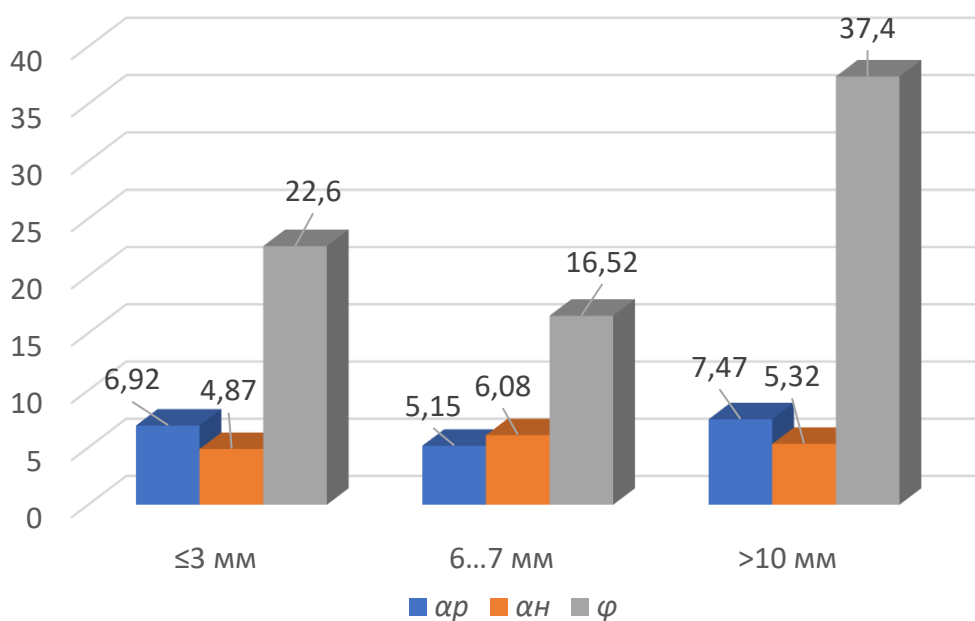


Рисунок 3.11 – Залежності коефіцієнтів розплавлення, наплавлення та втрат від довжини дуги для електродів марки Tekhmann (2,5 мм)

З рис. 3.11 бачимо, що на середній дузі коефіцієнти розплавлення, наплавлення і втрат електрода є меншими у порівнянні з результатами, отриманими на короткій дузі. Зварювання на довгій дузі призводить до зростання коефіцієнтів розплавлення та втрат і зменшення коефіцієнта наплавлення, що свідчить про погіршення процесу зварювання та зниження ефективності використання електродів.

### Висновки за розділом

З поміж проаналізованих марок зварювальних електродів для ручного електродугового зварювання найкращі зварювальні властивості за сумарним оціночним показником 22,5 показали електроди марки Моноліт. Як свідчить практика, ці електроди одні з найбільш поширених на ринку країни.

Встановлено, що величина сили струму зварювання найбільше впливає на коефіцієнт втрат електродів. Крім того цей вплив більше проявляється для електродів більшого діаметра.

Збільшенні форсування дуги призводить до зменшення коефіцієнта втрат для електродів всіх досліджуваних діаметрів.

Дослідивши вплив довжини дуги на процес зварювання встановлено, що на середній дузі коефіцієнт втрат електрода є меншими ніж на короткій дузі. Довга дуга призводить до зростання коефіцієнтів розплавлення та втрат і зменшення коефіцієнта наплавлення.

## 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ РОБІТ

### 4.1. Санітарно-гігієнічні характеристики зварювального виробництва

Потужне ультразвукове або світлове випромінювання зварювальної дуги впливаючи на очі працівника може призвести до запального захворювання очного яблука (електроофтальмія), а при тривалому впливі - до ураження сітківки очей (кон'юнктивіт). Інфрачервоні короткохвильові промені можуть викликати хронічне захворювання - помутніння кришталика ока (катаракта). Шкідливі впливи променів зварювальної дуги на органи зору можуть чинити вплив в радіусі до 10 метрів [7].

Шкіру захищають звичайним робочим одягом, лице і частина шиї - щитком або шоломом. Очі захищаються спеціальними темними скельцями - світлофільтрами, які вставляють в щиток або шолом. Ці скельця зовсім не пропускають ультрафіолетові промені, а інфрачервоні пропускають в межах від 0,1 до 4%, що не чинить шкідливого впливу на зір зварювальника.

При захворюванні очей від світлової радіації, необхідно негайно звернутися до лікаря, а при неможливості отримання швидкої медичної допомоги слід робити примочки очей слабким розчином питної соди.

Крім опіків променями електричної дуги, зварника можуть бути заповдіяні опіки бризками розплавленого металу. Щоб уникнути опіків, необхідно надягати робочий одяг з щільної брезентової матерії. Одяг не повинна мати складок. Штани треба носити тільки на випуск, щоб вони закривали черевики. Щоб запобігти пропалювання спецодягу бризками розплавленого металу, тканина просочується спеціальними речовинами, які підвищують її вогнестійкість.

Під час виконання зварювальних робіт в результаті вигорання обмазки електрода і елементів легування підвищується загазованість робочого місця. Для запобігання цьому необхідно встановлювати пристрої витяжної вентиляції в зоні дихання зварника. Викидати повітря потрібно за межі робочих зон. Для видалення газів і пилу застосовується як місцева вентиляція робочого місця, так



і припливно-витяжна вентиляція всього приміщення. Припливне повітря повинне надходити розсіяно в робочу зону приміщень, в основному на незварювальні ділянки, а також там, де витяжна вентиляція здійснюється за допомогою місцевих відсмоктувачів. Швидкість руху повітря, на робочих місцях повинна бути не більше 0,3 м/с [7].

Для знежирення металу і зварювальних матеріалів від мастильних забруднень не слід застосовувати трихлоретилен, дихлоретан та інші хлоровані вуглеводні, так як при з'єднанні їх з озоном, присутнім в атмосфері під час дугового зварювання, може утворюватися задушливий газ (фосген).

#### 4.2. Вимоги до освітлення робочої зони

Проектування, будова та експлуатація освітлення повинні виконуватися відповідно до вимог санітарних правил [10], а також правил улаштування електроустановок.

У всіх виробничих приміщеннях, в яких постійно перебувають робітники, має бути передбачено природне освітлення. Основне завдання освітлення - створення найкращих умов для зору. У діючих нормах проектування приміщень [53], задаються як кількісна, так і якісна характеристика штучного освітлення.

Під час визначення норм освітленості слід враховувати ряд умов, які викликають необхідність підвищення рівня освітленості обраного за точністю зорової роботи. Допустимі коефіцієнти пульсації, в залежності від системи освітлення і характеру виконуваної роботи, не повинна перевищувати 10-20% [7]. Кольорове оздоблення інтер'єрів приміщень і обладнання в зварювальних цехах повинне відповідати вказівкам з проектування колірної обробки інтер'єрів виробничих будівель промислових підприємств.

#### 4.3. Аналіз впливу шумів і вібрації

Нормовані параметри шуму на робочих місцях визначені ГОСТ 12.1.003-

83 [10] і санітарними нормами СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на робочих місцях, у приміщеннях житлових, громадських будівель і на території житлової забудови» [10].

Нормованими параметрами шуму є рівні в децибелах середньоквадратичних звукових тисків, вимірюваних за лінійною характеристикою шумоміра в октавних смугах частот з середньгеометричними частотами 63, 125, 250, 500, 2000., 4000 і 8000Гц [10].

Боротьбу з вібраціями бажано проводити в джерелі їх виникнення при конструюванні і виготовленні машин і устаткування. Зниження рівня вібрацій може бути досягнуто віброгасінням, яке реалізується шляхом установки віброуючих агрегатів на самостійні віброгасячі підставки (фундаменти). Також використовується динамічне гасіння коливань, вібродемпфування і зміна конструктивних елементів машин і будівельних конструкцій.

На робочому місці зварника обладнанням, яке може створювати шум є:

- зварювальні автомати;
- стенд для складання і зварювання;
- кран-балка;
- відрізний інструмент.

Для оцінки шуму використовують частотний спектр вимірюваного рівня звукового тиску, вираженого в дБ, в октавних смугах частот, який порівнюють з граничним спектром. Рівень звукового тиску  $\sim 74$  дБА, що не перевищує норм 80 дБА (по ГОСТ 12.1.003-83) [10].

#### 4.4. Характеристика мікроклімат і вентиляції робочої зони

Норми виробничого мікроклімату встановлені системою стандартів безпеки праці ГОСТ 12.1.005-88 «Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони» [10]. У цих нормах окремо нормується кожен компонент мікроклімату в робочій зоні виробничого приміщення: температура, відносна вологість, швидкість повітря в залежності від здатності людини до акліматизації

в різні пори року, характеру одягу, інтенсивності праці і характеру тепловиділень в робочому приміщенні.

Шкідливими основними речовинами, які виділяються під час зварювання сталей, є: окис вуглецю, хром, марганець і з'єднання фтору. У таблиці 5.1 представлені класи небезпек шкідливих речовин, які виділяються під час зварювання сталей [7].

Таблиця 4.1 - Класи небезпек шкідливих речовин, які виділяються під час зварювання сталей

Речовина	ГДК, мг/м <sup>3</sup>	Клас небезпеки	Агрегатний стан
Марганець	0,05	1	аерозолі
Хром	0,1	1	аерозолі
З'єднання фтору	0,5	2	аерозолі
Окис вуглецю	20	4	пари або газу

Згідно ГОСТ 12.1.005-88 [10] гранично допустима концентрація (ГДК) шкідливих речовин в повітрі робочої зони виробничих приміщень не повинна перевищувати величин, зазначених в таблиці 4.1.

У зварювальних цехах на стаціонарних робочих постах, а також, де це можливо, на нестационарних постах слід встановлювати місцеві відсмоктувачі.

Швидкість руху повітря, створювана місцевими відсмоктувачами біля джерел виділення шкідливих речовин, повинна відповідати нормам, наведеним у таблиці 4.2 [15].

Таблиця 4.2 - Швидкість руху повітря, створювана місцевими відсмоктувачами біля джерел виділення шкідливих речовин

Процес	V, м/с
Зварювання ручне	> 0,5
Зварювання в захисних газах	< 0,3

Кількість шкідливих речовин, локалізованих місцевими відсмоктувачами становить для витяжних шаф не більше 90%, а для місцевих відсмоктувачів

інших видів не більше 75%. Решта шкідливих речовин (10 - 20%) має розбавлятися до ГДК за допомогою загальнообмінної вентиляції [15].

У нашому випадку робоче місце зварника за ГДК, відноситься до 2 класу небезпеки.

#### 4.5. Електробезпека під час зварювального виробництва

Причини і практичні умови виникнення електроуражень, незважаючи на їх значну кількість, можна об'єднати в наступні 5 груп:

- дотик до оголених струмоведучих частин, які знаходяться під напругою. При цьому слід відрізнити провідну частину електроустановки від її струмоведучих частини;
- дотик до корпусів електрообладнання і конструктивно пов'язаних з ними металевих предметів і споруд, які нормально не перебувають під напругою, але можуть опинитися під її впливом внаслідок пошкодження ізоляції проводів (кабелів). Зазначені корпуси і металеві предмети відповідно з термінологією, прийнятою в ПУЕ, відносяться до відкритих провідних частин (ВПЧ);
- дотик до відключеного, але електрично зарядженого обладнання (до конденсаторів, кабелів тощо);
- знаходження в недопустимій близькості від місця замикання проводу (кабелю) на землю. Забороняється наближатися на відстань менше 8 м до обірваного проводу, який лежить на землі, щоб уникнути попадання під крокову напругу;
- всі ураження, пов'язані з дією електричної дуги і продуктів її згоряння, а також з впливом електричних і магнітних полів підвищеної напруженості.

Зварнику на своєму робочому місці доводиться працювати з обладнанням, що знаходиться під напругою 220 В і 380 В частотою 50 Гц, тому виникає небезпека ураження електричним струмом. У нашому випадку, це зварювальний апарат, КШМ, автомати для зварювання - все це становить потенційну загрозу для людини. Все обладнання повинно бути виконано відповідно до вимог ГОСТ

12.1.019-79 [10].

Основними умовами, які забезпечують усунення електротравм є:

- а) правильна будова електроустановок;
- б) навченість персоналу;
- в) дотримання правил з безпечного обслуговування електроустановок;
- г) нагляд за виконанням робіт в електроустановках.

Для запобігання ураження електричним струмом необхідно дотримуватися наступних правил техніки безпеки:

- необхідно надійно заземлювати корпуси джерел живлення і установок, а також виріб, який зварюється;

- заборонено торкатися голими руками (без діелектричних рукавичок) струмопровідних частин зварювальних установок, а також проводів без ізоляції або з пошкодженою ізоляцією;

- перед початком робіт необхідно перевіряти справність ізоляції зварювальних проводів, зварювального інструменту та обладнання, а також надійність всіх контактних з'єднань зварювального кола;

- при тривалих перервах джерело зварювального струму слід відключати;

- при прокладанні зварювальних проводів і при кожному їх переміщенні не допускати: пошкодження ізоляції, зіткнення проводів з водою, маслом, сталевими канатами, рукавами (шлангами) і трубопроводами з горючими газами і киснем, а також з гарячими трубопроводами;

- не можна ремонтувати зварювальне обладнання та установки, які знаходяться під напругою;

- зварювальник не повинен самостійно підключати джерело живлення зварювальної дуги до силової мережі, або проводити в ній ремонт, пов'язаний з роботою джерела живлення. Всі ці роботи виконують тільки електрики цехів.

Все електрообладнання зварювальних цехів і ділянок повинно відповідати «Правил будови електроустановок» (ПУЕ) [10]. Крім того, слід виконувати вказівки щодо експлуатації і безпечного обслуговування електрозварювальних установок [15]. Обслуговування електроустановок

доручається особам, які пройшли медичний огляд і спеціальне навчання.

У разі ураження зварника електричним струмом необхідно терміново відключити струм найближчим вимикачем або відокремити потерпілого від струмопровідних частин, використовуючи сухі підручні матеріали (жердину, дошку тощо). Після цього покласти його на теплу підстилку і по можливості зігріти. Негайно викликати медичну допомогу, враховуючи, що зволікання понад 5-6 хвилин може привести до непоправних наслідків. При несвідомому стані потерпілого слід звільнити від тісного одягу і негайно почати робити штучне дихання, також необхідно перебувати поруч з постраждалим до прибуття лікаря.

Приміщення з електробезпеки поділяються на 3 групи [15]:

1. Приміщення без підвищеної небезпеки (сухе, добре опалювальне, приміщення з струмонепровідними підлогами, з температурою 18-20 ° і вологістю 40-50%.
2. Приміщення з підвищеною небезпекою (де є одна з таких ознак: підвищена температура, вологість 70-80%, струмопровідні підлоги, металева підлога, наявність заземлення, великої кількості обладнання).
3. Приміщення особливо небезпечні, в яких є наявність двох ознак з другої групи або є в приміщенні їдкі або отруйні вибухонебезпечні речовини.

В нашому випадку приміщення для зварника відноситься до 2-гої групи електробезпеки, так як на виробництві є перераховані фактори небезпеки.

#### 4.6. Пожежна безпека під час зварювання труб

Причиною виникнення пожеж в зварювальних цехах машинобудівних підприємств можуть бути:

- порушення технологічного режиму;
- несправність електрообладнання;
- іскри;
- несправність запірної арматури і відсутність заглушок на апаратах і трубопроводах;
- реконструкція установок з відхиленням від технологічних схем;

- самозаймання промасленого ганчір'я та інших легкозаймистих матеріалів.

Основи протипожежного захисту підприємств визначені стандартом ГОСТ 12.1.010-76 «Вибухобезпека. Загальні вимоги» [10].

Заходи з пожежної профілактики поділяються на організаційні, технічні, режимні та експлуатаційні. Пожежна безпека об'єкта регламентується, будівельними нормами і правилами, міжгалузевими правилами пожежної безпеки. Пожежна безпека може бути забезпечена заходами пожежної профілактики і активним пожежним захистом. Поняття профілактики включає в себе комплекс заходів, необхідних для запобігання пожежі або зменшення його наслідків. У зварювальному виробництві в цехах збірні конструкції виконують з негорючого і важкогорючого матеріалу. Приміщення в зварювальному виробництві відносяться до другого ступеня вогнестійкості споруд по категорії «Г».

Для швидкої ліквідації пожежі нормами первинних засобів пожежогасіння зварювального цеху на кожні 200 м<sup>2</sup> передбачається один вогнегасник ОУ-2, ящик з піском місткістю 0,5 м<sup>3</sup> і дві лопати. Пожежні крани та інші засоби пожежогасіння повинні бути у справному стані і перебувати в конкретних місцях.

#### 4.7. 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 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 [3].

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  $P_{17}$

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



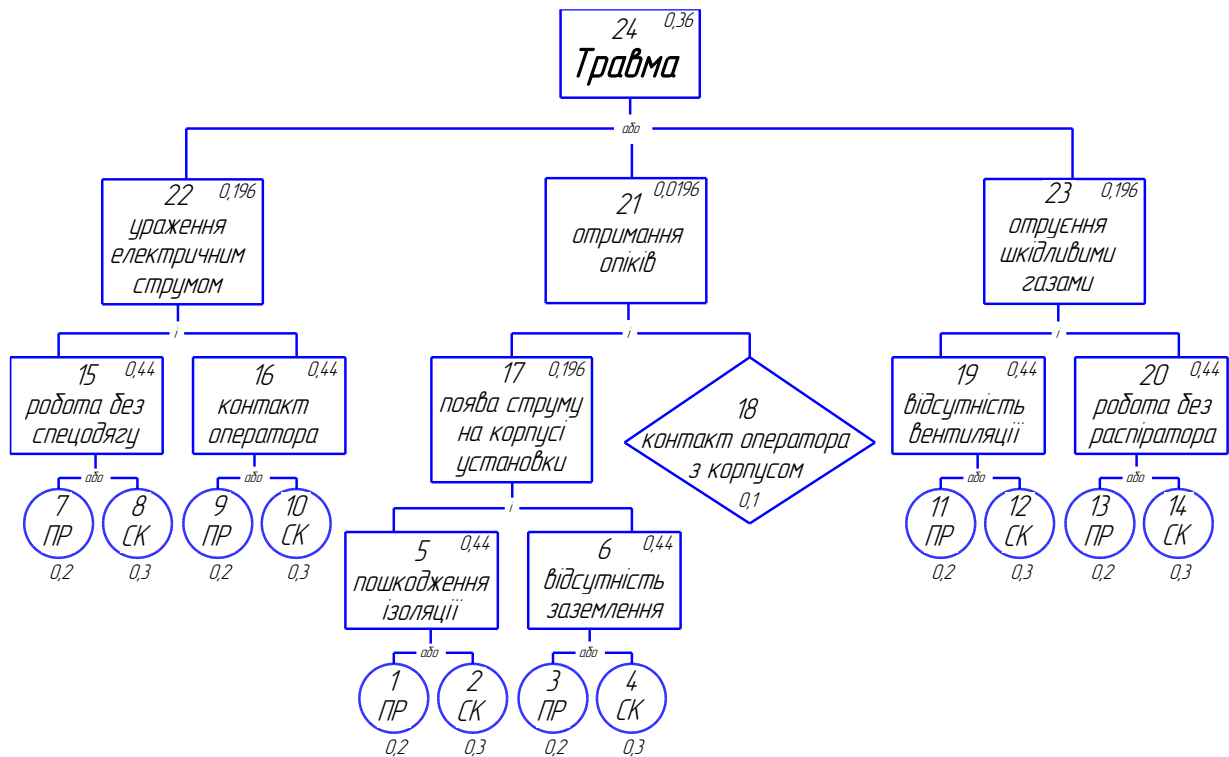


Рисунок 4.1. Модель процесу формування та виникнення травми

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 елементів трубопроводів системи пневмотранспорту апаратом для механізованого зварювання в середовищі захисних газів за наявності і можливості виникнення існуючих небезпек та небезпечних діях на 100 робочих місць ймовірність виникнення травмонезбезпечної ситуації становить 0,36 (36 %).

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

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Аналіз найбільш поширених на ринку країни електродів для ручного електродугового зварювання показав відсутність в їх характеристиках та рекомендаціях до застосування відсутність чіткої інформації про можливі втрати електродів під час виконання процесів зварювання.

З поміж усіх параметрів процесу електродугового зварювання, які впливають на ефективність виконання зварних швів основними чинниками, від яких залежать можливі втрати електродів на розбризкування та угар є правильність їх підбору під задані умови зварювання, значення зварювальних струму та напруги, а також здатність підтримування стабільної довжини зварювальної дуги.

Дослідженнями встановлено, що величина сили струму зварювання найбільше впливає на коефіцієнт втрат електродів. Крім того цей вплив більше проявляється для електродів більшого діаметра. Так для електродів діаметром 4 мм збільшення струму призводить до зниження коефіцієнта втрат майже на 75 %. Для електродів діаметром 3 мм даний показник зменшувався всього на 37 %.

Збільшенні форсування дуги призводить до зменшення коефіцієнтів розплавлення, наплавлення і втрат для електродів діаметром 3 мм. Схожа картина спостерігалась і для електродів діаметром 4 мм. Однак, коефіцієнт наплавлення показав зростання на 5,8 %. Це можна пояснити більшими розмірами зварювальної ванни та кращим прогріванням деталі.

За комплексним показником експлуатаційної якості найкращі результати показали електроди марки Моноліт з рутилово-целюлозним покриттям.

Дослідивши вплив довжини дуги на втрати електродів встановлено, що на середній дузі коефіцієнти розплавлення, наплавлення і втрат електрода є меншими у порівнянні з результатами, отриманими на короткій дузі. Зварювання на довгій дузі призводить до зростання коефіцієнтів розплавлення та втрат і зменшення коефіцієнта наплавлення, що свідчить про погіршення процесу зварювання та зниження ефективності використання електродів.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Биковський О. Г. Довідник зварника. Київ: «Основа». 2014. 442с.
2. Власенко А.М. Основи зварювання. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2007. 106 с.
3. 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.
4. Гуменюк І.В. Іваськів О.В., Гуменюк О.В. Технологія електродугового зварювання: Підручник. Київ: Грамота, 2006. 512 с.
5. Драган С.В., Лабарткава А.В. Практикум зі зварювання: Навчальний посібник. Миколаїв: НУК, 2008. 68 с.
6. ДСТУ EN ISO 18275:2019 Зварювальні матеріали. Електроди для ручного дугового зварювання жароміцних сталей. Класифікація. <https://uscc.ua/dstu-en-iso-182752019-zvaryvalni-materiali-elektrodi-dlya-ruchnogo-dugovogo-zvaryuvannya-zharomitsnikh-staley-klasifikatsiya>
7. ДСТУ 2456-94. Зварювання дугове і електрошлакове. Вимоги безпеки. [Чинний від 1995-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1994. 48 с.
8. ДСТУ ISO 18275:2008 Матеріали зварювальні. Покриті електроди для ручного дугового зварювання високоміцних сталей. Класифікація (ISO 18275:2005, IDT). [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=66697](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=66697)
9. Зварювальний апарат інверторний ТЕХМАНН TWI-300 PR. [https://tekhmann.com/wp-content/uploads/2019/03/Manual-TWI-300-PR-2021\\_01.pdf](https://tekhmann.com/wp-content/uploads/2019/03/Manual-TWI-300-PR-2021_01.pdf).
10. Каталог НД України on-line ВЕРСІЯ +: <http://csm.kiev.ua/>
11. Квасницький В. В. Спеціальні способи зварювання. Навчальний посібник. Миколаїв: УДМТУ, 2003. 437 с.

12. Контроль якості та технічна діагностика зварних конструкцій. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для підготовки бакалаврів з прикладної механіки за спеціалізацією «Технології та устаткування зварювання». /Укл. Болотов Г.П., Болотов М.Г. Чернігів: ЧНТУ, 2019. 31 с.

13. Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Експериментальні методи у зварюванні» /Уклад.: Дмитрик В. В., Погрібний М. А., Касьяненко І. В. – Харків : НТУ «ХП», 2024. 71 с.

14. Методичні вказівки до практичних робіт з дисципліни ”Ручне дугове зварювання” для підготовки бакалаврів галузі знань 131 Прикладна механіка, спеціалізація –Технології та устаткування зварювання / Укладач П.С.Івченко - Кам'янське, ДДТУ, 2018. 22с

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

16. Савуляк В. І., Осадчук А. Ю. Ручне електродугове зварювання. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2004. 130 с.

17. Швець О.П., Власюк І.В., Федорина Д.І. Вивчення технології ручного електродугового зварювання: 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. 13 с.

18. Швець О.П., Власюк І.В., Федорина Д.І. Вивчення зварювальних електродів та матеріалів для зварювання. 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, 2018. 18 с.

19. Швець О.П., Власюк І.В., Федорина Д.І. Технологія зварювання металів і пластмас. Ручне дугове зварювання: методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт студентами ОС «Бакалавр» спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування», 208 «Агроінженерія», 274 «Автомобільний транспорт», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Львів: ЛНАУ, 2017. 28 с.

20. Швець О.П. Технологія зварювання металів і пластмас. Конспект лекцій для студентів ОС «Бакалавр» спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування», 208 «Агроінженерія», 274 «Автомобільний транспорт», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (Частина 1). Львів: ЛНАУ, 2017. 78 с.

21. Швець О.П. Технології та обладнання зварювання металів і пластмас. Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи на тему «Висвчення джерел живлення для ручного електродугового зварювання» студентами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 133 «Галузеве машинобудування». Львів: ЛНУП, 2023. 8 с.

22. Що таке зварювання ММА? <https://www.fronius.com/uk-ua/ukraine/zvaryvalni-tekhnologiyi/svit-zvaryuvannya/zvaryuvannya-elektrodamy>