

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: **Дослідження процесу зварювання деталей
багатопрхідними швами**

Виконав: студент групи Маш-61

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

Сало Микола Михайлович
(Прізвище та ініціали)

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

Львів-Дубляни 2025

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

Освітній ступінь «Магістр»

Спеціальність 133 - Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
Машинобудування
(назва кафедри)

(підпис)

професор Віталій ВЛАСОВЕЦЬ
(прізвище та ініціали)

“ ____ ” _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу студенту

Салу Миколі Михайловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження процесу зварювання деталей багатопрохідними швами

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

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

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

3. Вихідні дані до робіт: довідкова література, характеристики зварювального обладнання та матеріалів, стандарти на виконання процесів зварювання металів, типові технології зварювання деталей ручним електрозварюванням, методики розрахунку технологічних параметрів процесу зварювання, методики

проведення експериментальних досліджень, методики контролю якості зварних швів та з'єднань, інструкції з охорони праці та інші довідкові джерела.

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

4.1. Аналіз процесу ручного електродугового зварювання; 4.2. Аналіз технологій зварювання деталей багатопрхідними швами; 4.3. Методика та результати експериментальних досліджень; 4.4. Охорона праці; Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу:

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

6. Консультанти розділів роботи

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	Аналіз процесу ручного електродугового зварювання	18.04.25	
2	Аналіз технологій зварювання деталей багатопрхідними швами	20.06.25	
3	Методика та результати експериментальних досліджень	05.09.25	
4	Охорона праці	31.10.25	
5	Оформлення пояснювальної записки	21.11.25	
6	Оформлення графічної частини	15.12.25	

Студент _____
(підпис)

Сало М.М.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Швець О.П.
(прізвище та ініціали)

Сало М.М. «Дослідження процесу зварювання деталей багатопрохідними швами». /Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С.З. Гжицького, 2025. 70 с.

Проведено аналіз процесу ручного електродугового зварювання штучними покритими електродами. Розглянуто основні аспекти підготовки поверхонь деталей та обладнання до зварювання. Проведено аналіз існуючих технологій та способів зварювання деталей багатопрохідними зварними швами. Визначено основні параметри, які впливають на ефективність процесу зварювання та якість зварних з'єднань. Підібрано комплект зварювального обладнання, підготовлено дослідні зразки, розроблено методика та проведено дослідження процесу зварювання товстостінних деталей багатопрохідними швами. Проведено аналіз якості зварних швів та розроблено рекомендації щодо виправлення дефектів швів. Розглянуто питання охорони праці під час ручного електродугового зварювання.

Табл. 7; рис. 34; бібліогр. джерел 32.

ЗМІСТ

	ВСТУП	6
1	АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ РУЧНОГО ЕЛЕКТРОДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ	7
1.1	Загальні відомості про процес ручного дугового зварювання	7
1.2	Обладнання для РДЗ	9
1.3	Вимоги до джерел живлення зварювальної дуги	10
1.4	Техніка виконання зварних швів	13
1.5	Параметри режиму РДЗ	17
	Висновки за розділом	20
2	ТЕХНОЛОГІЯ ВИКОНАННЯ БАГАТОПРОХІДНИХ ЗВАРНИХ ШВІВ	21
2.1	Види багатопохідних швів та способи їх зварювання	21
2.2	Особливості виконання багатопохідних зварних швів у стикових з'єднаннях	26
2.3	Особливості виконання багатопохідних зварних швів у таврових та кутових з'єднаннях	28
2.4	Особливості виконання стельових багатопохідних швів	32
	Висновки за розділом	33
3	МЕТОДИКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	34
3.1	Програма експериментальних досліджень	34
3.2	Опис зварювального апарата	34
3.3	Підготовка апарата до використання	29
3.4	Характеристики електродів, які використовувались в експериментальних дослідженнях	38
3.5	Методика розрахунку режимів ручного дугового зварювання	39
3.5.1	Розрахунок режиму зварювання швів стикових з'єднань з розробкою кромок	40
3.5.2	Розрахунок режиму зварювання кутових багатопохідних швів	43

3.6	Результати експериментальних досліджень	45
3.7	Оцінка якості багатопрохідних зварних швів	49
3.8	Рекомендації щодо видалення шлакових включень з структури зварного шва	52
	Висновки за розділом	54
4	ОХОРОНА ПРАЦІ	55
4.1	Загальні вимоги безпеки під час експлуатації зварювальних інверторів	55
4.2	Спеціальні вимоги безпеки	59
4.3	Моделювання процесу формування і виникнення травмо-небезпечної ситуації під час зварювання	63
	Висновки за розділом	65
	ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ	66
	БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	67

ВСТУП

Об'єм робіт, які виконуються ручним електродуговим зварюванням (РДЗ) покритими електродами в нашій країні поки що залишається дуже високим. Частка зварних конструкцій, виготовлених з використанням цього способу досягає 40%. Тому питання продуктивності та якості зварювання для цього способу мають велике значення.

Дуговим електрозварюванням називають процес утворення нероз'ємного з'єднання металів під дією електричної дуги. Сутність його 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.

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 виникати різні дефекти зварних швів. Вид та кількість можливих дефектів залежить від виду шва, його просторового положення та розмірів поперечного перерізу шва. Наші дослідження направлені на розробку рекомендацій щодо ефективної технології виконання процесу РДЗ деталей багатопрхідними зварними швами та забезпечення високої якості зварних з'єднань.

1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ РУЧНОГО ЕЛЕКТРОДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

1.1. Загальні відомості про процес ручного дугового зварювання

Зварювання – це технологічний процес створення нерознімного з'єднання двох і більше частин металевих конструкцій. Існують різні методи зварювання, найпоширенішим з яких є ручне дугове зварювання (РДЗ).

Під час ручного дугового зварювання для нагрівання та плавлення металу використовується електрична дуга. Вона утворюється між електродом і поверхнею зварюваної деталі. Розглянемо схему ручного дугового зварювання та призначення її елементів (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Схема процесу ручного дугового зварювання (РДЗ)

Джерело живлення (рис. 1.1) під'єднується до електричної мережі 220 В або 380 В [18, 22, 25, 29, 33]. Його силові кабелі від'єднують до електродотримача та деталі відповідно до обраної полярності зварювання. Необхідну для нагрівання та плавлення металу теплоту отримують за рахунок дії дугового розряду, який виникає під час короткого замикання між зварюваним металом і електродом. Необхідну енергію для утворення і підтримки дугового розряду забезпечує джерело живлення, яке може забезпечувати постійний або змінний струм зварювання.

Електрична дуга запалюється в момент торкання електрода до деталі. Утворений дуговий розряд перетворює електричну енергію джерела живлення в

теплову. При цьому, температура в зоні горіння дуги може коливатися від 3000 °С до 7000 °С (в залежності від полярності) і в середньому становить 5500°С, що дозволяє легко розплавляти метал деталі та електрод.

В момент дотику зварювального електрода до поверхні деталі відбувається замикається електричного кола, й під дією короткого замикання (КЗ) кінець електрода нагрівається. При наступному відведенні електрода на 3-5 мм від поверхні деталі встановлюється дуговий розряд, за рахунок якого в замкнутому колі підтримується зварювальний струм. Інтенсивний тепловий вплив дуги викликає нагрів та плавлення нею основного металу деталі. Кінець зварювального електрода теж розплавляється, і його метал перетікає в розплавлену "зварювальну ванну" на поверхні основного металу.



Рисунок 1.2 – схему формування зварного шва

В процесі зварювання зварювальник постійно контролює силу зварювального струму, підтримує стабільну довжину дуги та швидкість переміщення електрода вздовж зварних кромek. Після завершення процесу зварювання утворений зварний шов охолоджується та твердіє [4].

Ручне дугове зварювання в основному застосовується в різних галузях промисловості та машинобудування для виконання криволінійних і коротких зварних швів у різних просторових положеннях (нижньому, горизонтальному, вертикальному, стельовому), а також під час формування швів у важкодоступних місцях металоконструкцій, монтажних роботах та при збирання зварних конструкцій складної форми.

1.2. Обладнання для РДЗ

Якісне виконання операцій РДЗ напряду залежить від наявності та якості обладнання, яке знаходиться на зварювальному посту. Комплектація зварювальних постів може бути різною і на пряму залежить від виду зварювальних робіт, які на них виконуються [24]. Розглянемо докладніше призначення й особливості використання обладнання для РДЗ (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Характеристика обладнання для РДЗ

Вид обладнання	Призначення та особливості застосування
Джерело живлення 	Джерело живлення – це силовий електричний апарат, призначений для живлення дуги зварювальним струмом, забезпечення її стійкого горіння під час виконання процесу зварювання. До джерел живлення відносяться зварювальні трансформатори, випрямлячі, інвертори, агрегати.
Зварювальні кабелі 	Зварювальні кабелі призначені для з'єднання електродотримача та деталі (зварювального стола) із джерелом живлення та підведення до них зварювального струму. У зварювальних установках використовують гнучкі кабелі з мідними або алюмінієвими жилами й гумовою ізоляцією. Січення кабелів вибирають залежно від максимальної сили зварювального струму джерела із розрахунку $5-7 \text{ А/мм}^2$. Мінімальна довжина кабелів повинна становити не менше 1,5 метра, а максимальна може досягати 20-40 метрів (на монтажних роботах).
Затискачі 	Зварювальні силові кабелі повинні мати надійне з'єднання з джерелом живлення. Для цього використовуються байонетні затискачі.
Сполучні муфти 	При необхідності виконувати зварювання на віддалені від джерела живлення зварювальні кабелі можуть з'єднуватись між собою. Для цього використовуються сполучні муфти, які забезпечують надійне та безпечне з'єднання частин зварювальних кабелів між собою.

Електродотримач 	Електродотримач – це пристрій для закріплення зварювального електрода і підведення до нього зварювального струму від джерела живлення. За конструкцією електродотримачі бувають важільні, пасатижні, защіпні та гвинтові. Електродотримачі мають забезпечувати надійне затискання електродів не менше ніж у двох положеннях (перпендикулярно та під кутом не менше 115° до осі електрода), забезпечувати швидку й легку зміну електродів, їх струмоведучі частини повинні бути надійно ізольовані а рукоятка повинна бути виготовлена з ізолюючого матеріалу довжиною не менше 120 мм.
Струмопровідні затискачі 	Струмопровідні затискачі слугують для підключення зворотного кабелю до зварювального столу або до зварюваної деталі чи металоконструкції.
	Для виконання зварювальних робіт зварювальник використовує допоміжний інструмент. Сталеві щітки використовують для зачистки кромки перед зварюванням, а також для видалення залишків шлаку з поверхні шва. Затверділий шлак із поверхні шва видаляють молотком-кіркою. Для вирубки дефектів швів та видалення бризок застосовують зубила. На складальних операціях виконують шаблони, лінійки, косинці, рисувалки та іншу спеціальну оснастку.

1.3. Вимоги до джерел живлення зварювальної дуги

Якість виконання зварювальних робіт в значній мірі залежить від характеристик джерела живлення зварювальної дуги. Для ручного електродугового зварювання застосовують джерела живлення змінного та постійного струму. Всі вони характеризуються рядом параметрів, які слід

враховувати під час їх виборі під задані умови зварювання. До основних параметрів роботи джерел живлення відносяться [1, 2, 4, 6]:

- номінальний зварювальний струм – це основний параметр джерела живлення. В основному джерела живлення для РДЗ працюють на струмах від 125 А до 500 А.
- межі регулювання струму. Даний параметр відповідає за можливість точного вибору струму зварювання.
- номінальна робоча напруга – параметр, який встановлюється за певного значення зварювального струму. Однак джерела, які мають спадаючою характеристику мають номінальну напругу від 25 В до 40 В.
- напруга холостого ходу – це напруга на затискачах джерела, коли воно увімкнене в мережу, але зварювання не відбувається. Її значення повинно бути достатнім для легкого збудження дуги. У джерелах живлення для РДЗ дана напруга становить від 60 до 80 В.
- коефіцієнт корисної дії. ККД зварювального інвертора перевищує 90 %.
- коефіцієнт потужності.
- зовнішня вольт-амперна характеристика джерела живлення - це залежність між напругою зварювання та силою зварювального струму. Вона визначає електричні властивості джерела під час роботи. Зовнішня характеристика може бути крутоспадаючою, пологоспадаючою, жорсткою та зростаючою. Джерела живлення для РДЗ покритими електродами мають володіти крутоспадаючою вольт-амперною характеристикою.
- режими роботи джерела струму (тривалість навантаження) – це параметр, який відповідає за можливість безперервної і надійної роботи джерела. Так, наприклад, зварювальні інвертори мають короткочасний режим, тобто джерелу можуть бути потрібні тривалі перерви після 5-10 хвилин роботи. Цей параметр визначається експериментально протягом 10 хв безперервної роботи. Його вказують в характеристиці джерела у відсотках. Побутові джерела для РДЗ мають режим роботи 100 % на оптимальних зварювальних струмах. Н максимальних струмах даний параметр може становити 50-60 %.

Крім цих параметрів, у технічній характеристиці наводять дані про напругу мережі живлення, габарити, масу тощо.

Для зварювання застосовують джерела змінного струму – зварювальні трансформатори, або джерела постійного струму – зварювальні випрямлячі та інвертори [18]. Зварювальні трансформатори мають переваги перед джерелами постійного струму завдяки своїм техніко-економічним показникам. Вони простіші в експлуатації, надійніші та більш довговічні, мають вищий ККД. Джерела постійного струму кращі в технологічному відношенні. Вони забезпечують вищу стійкість горіння дуги, володіють кращими умовами зварювання в різних просторових положеннях.

Для забезпечення стійкого процесу зварювання джерела живлення повинні задовольняти наступні вимоги:

- напруга холостого ходу має бути достатньою для легкого збудження дуги та не перевищувати норм безпеки. Її максимально допустиме значення для джерел постійного струму не повинно перевищувати 90 В, а для джерел змінного струму – 80 В.
- напруга стійкого горіння дуги (робоча напруга) має швидко встановлюватися і змінюватися, залежно від довжини дуги. Зі збільшенням довжини дуги вона має швидко зростати, а зі зменшенням – спадати. Час відновлення після кожного короткого замикання повинен бути не більше 0,05 с.
- струм короткого замикання не повинен перевищувати зварювальний більше ніж на 40-50%. На таких струмах джерело має витримувати тривалі короткі замикання та не перегріватися.
- потужність джерела живлення дуги повинна бути достатньою для виконання заданих зварювальних робіт.
- джерело живлення має мати пристрій плавного регулювання значень зварювального струму.
- джерело має володіти заданою вольт-амперною характеристикою.

1.4. Техніка виконання зварних швів

Техніка виконання також має значний вплив на якість зварного шва. Правильна підібрана техніка дозволяє отримати міцний і надійний зварний шов, який буде відповідати стандартам якості. Коротко розглянемо послідовність виконання зварних швів.

Процес зварювання розпочинається в момент запалювання дуги. Це відбувається в момент короткочасного дотику кінця електрода до поверхні виробу. Після цього зварник має відвести кінець електрода від деталі на відстань 3-5 мм [16].

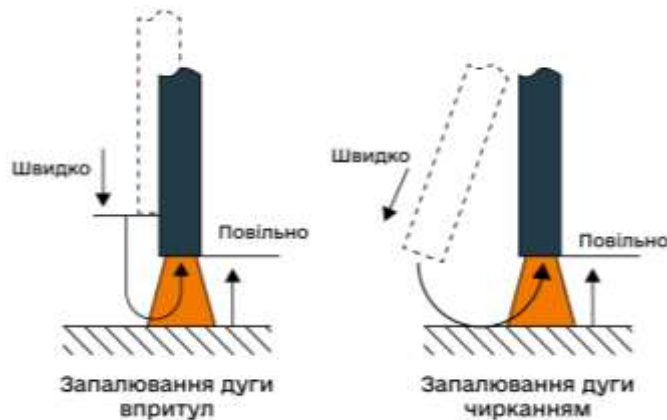


Рисунок 1.3 – Способи запалювання дуги

Запалювання дуги виконують двома можливими способами: впритул – коли зварювальник виконує короткочасний дотик кінцем електрода до поверхні виробу з наступним прямим його відривом після виникнення короткого замикання, а також чирканням – коли зварювальник рухає кінцем електрода по поверхні деталі як сірником. Перший з цих способів зручно застосовувати під час зварювання у вузьких і незручних місцях.

В процесі зварювання електрод можна тримати у різних положеннях: кутом уперед, кутом назад або під прямим кутом. Вибір правильного положення електрода допомагає зварювальнику стежити в процесі зварювання за кількістю шлаку і при потребі збільшувати або зменшувати його кількість.

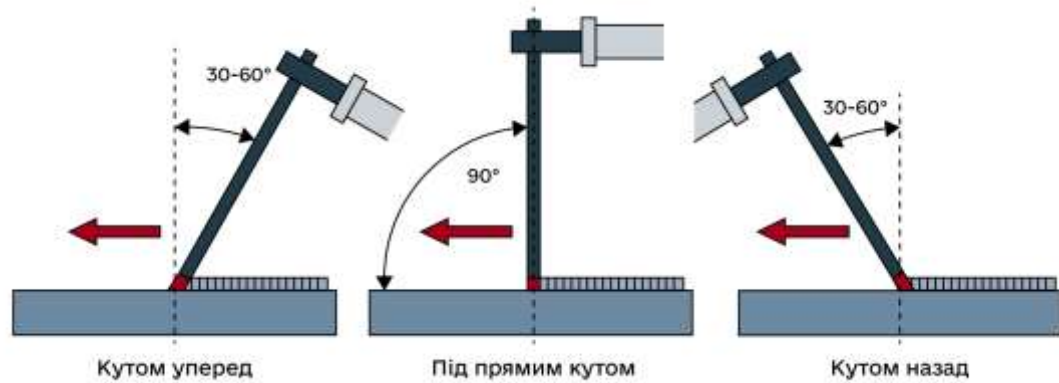


Рисунок 1.4 – Положення електрода під час зварювання

Зварювання стикових і кутових швів рекомендують виконувати кутом назад. У такому положенні шлак буде витіснитися із зварювальної ванни, а зварне з'єднання буде кристалізуватися швидко.

Нахил електрода під час зварювання також залежить від положення зварного шва у просторі, товщини і складу металу деталей, діаметра електрода, виду та товщини його покриття. Для отримання рівного і щільного зварного шва під час зварювання у нижньому положенні кут нахилу електрода має становити 30-60° від вертикалі у напрямку виконання зварювання [20].

Наплавлення валиків є основним етапом формування зварних швів. Геометрія наплавленого валика показана на рис. 1.5.

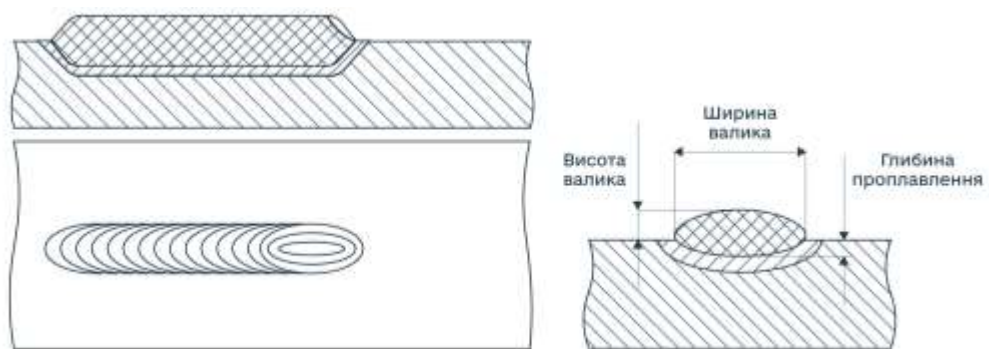


Рисунок 1.5 – Геометричні параметри наплавленого валика

При наплавленні вузьких валиків електрод рухають поступально "зверху-вниз" та переміщують вздовж осі шва. Під час руху електрода вздовж осі його слід тримати під кутом 15-30° до вертикалі. Довжина дуги має бути максимально короткою (2-3 мм), але не слід допускати виникнення коротких замикань

електрода з деталлю, оскільки це призводить до "прилипання" електрода. Ширина шва, сформованого вузьким валиком має бути в межах 1-1,5 діаметра електрода [3, 16].

При накладанні розширених валиків застосовують коливальні рухи. Вони потрібні для кращого прогріву зварювальної ванни і та одержання шва заданої ширини.

Зварювальник може накладати валики двома способами – зліва направо і справа наліво.

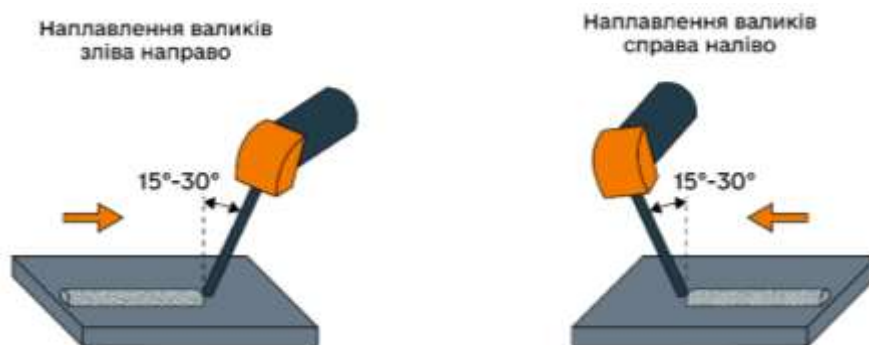


Рисунок 1.6 – Напрямки наплавлення валиків

Під час наплавлення валиків важливо постійно слідкувати за процесом формування шва, оскільки шлак завжди покриває рідкий метал. Наплавлений валик має покриватися шлаком рівномірним шаром. Поверхня валика зварного шва після видалення шлаку повинна мати дрібно-лускату будову.

При обриві дуги її слід повторно запалювати перед кратером, а далі електрод переводять назад, переплавляючи охололу зварювальну ванну та продовжують подальший рух електрода в напрямку зварювання.

У процесі зварювання зварювальник може надавати електроду додаткові рухи в трьох можливих напрямках (рис. 1.7) [20]:



Рисунок 1.7 – Можливі рухи електродом під час зварювання

1. Поступальний рух електрода вздовж його осі. Його здійснюють зі швидкістю плавлення електрода чим забезпечується підтримання стабільної довжини зварювальної дуги.

2. Рух електрода вздовж осі зварного шва. Цей рух здійснюють зі швидкістю зварювання. Взаємне поєднання першого і другого рухів дозволяє отримувати вузький нитковий валик шва, ширина якого становитиме $(0,8 \dots 1,5) \cdot d_e$. Такі шви застосовують під час накладання першого шару багатопрохідного шва, а також та при зварюванні тонких деталей.

3. Коливальні рухи кінцем електрода впоперек осі шва. Він забезпечує утворення валика певної ширини, кращий провар кореня шва і зварних кромок, а також сповільнює охолодження зварювальної ванни. Ширина зварного шва, отриманого з коливальними рухами може становити $(2 \dots 4) \cdot d_e$.

Вид коливальних рухів зварювальним електродом впоперек осі шва визначаються його розмірами, формою та розташуванням у просторі й поділяються на три групи:

- 1 - для рівномірного прогріву зварної ванни;
- 2 - для підсиленого прогріву кореня шва;
- 3 - для підсиленого прогріву кромок заготовок.

Найпоширеніші рухи електродом показані на рис. 1.8 [3].

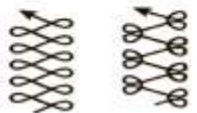
Тип рухів електродом	Зображення	Призначення
Прямі за ламаною лінією		Для зварювання листів встик без скосу кромок у нижньому положенні шва
Півмісяцем		Для стикових швів із скосом кромок та кутових швів із катетом менше 6 мм у будь-якому положенні шва
Трикутником		Для стикових швів із скосом кромок у будь-якому положенні та для кутових швів із катетом більше 6 мм
Трикутником із затримкою електрода в корені шва		Для зварювання товстостінних конструкцій із гарантованим проплавленням кореневої ділянки шва
Петлеподібні		Для більшого прогріву кромок шва

Рисунок 1.8 – Схеми поперечних рухів зварювальними електродами

Процес зварювання закінчується заварюванням кратера. Наприкінці шва не можна одразу обривати зварювальну дугу. Електрод слід перемістити на верхній край зварювальної ванни (положення 1-2 на рис. 1.9,а) і потім швидко відвести від кратера (положення 3 на рис. 1.9,а).

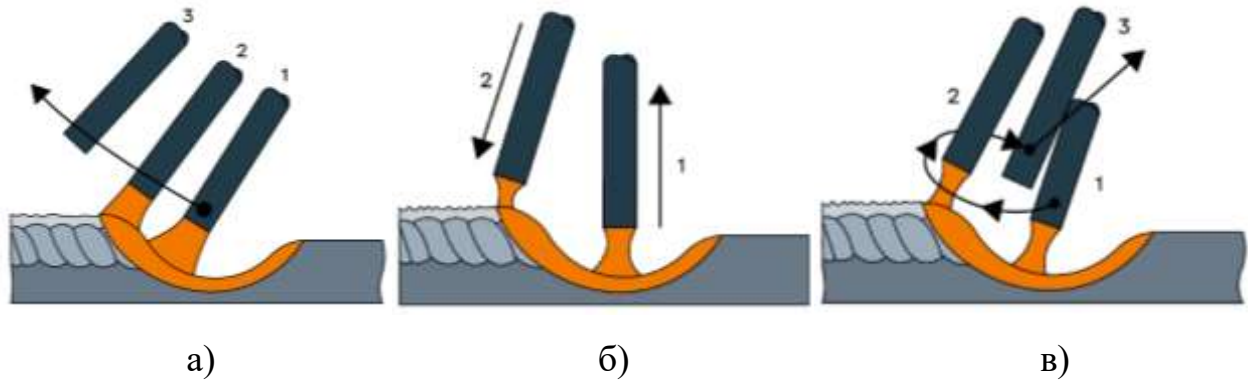


Рисунок – Схеми операції заварювання кратера зварного шва

Заварювання кратера можна виконувати й іншими способами. Інколи кратер виводиться на приварену технологічну пластину.

Уникнути утворення кратера можливо тоді, коли дугу обривають на кінці шва (положення 1 на рис. 1.9,б), а потім повторно запалюють її метою формування потрібної висоти шва (положення 2 на рис. 1.9,б). Інший спосіб полягає у тому, що електрод зміщається з положення 1 (рис. 1.9,в), на 10-15 мм у положення 2 не обриваючи дуги, а потім його переводять в положення 3, після чого дугу обривають.

1.5. Параметри режиму РДЗ

Під режимом зварювання розуміють сукупність параметрів зварювального процесу, за яких забезпечується стійке горіння дуги та формуються шви необхідних розмірів, форми та якості. До цих параметрів відносяться: діаметр зварювального електрода, його тип і марка, сила зварювального струму, напруга на дузі, рід і полярність зварювального струму, швидкість зварювання, положення шва у просторі, наявність попереднього підігріву чи наступної термічної обробки.

Діаметр електрода підбирається залежно від розмірів, товщини й складу зварюваного металу, типу з'єднання, положення шва у просторі. Також варто врахувати при виборі електродів силу струму при зварюванні. Рекомендації щодо підбору діаметра електрода для зварювання інвертором наведені на рис. .



Рисунок 1.10 – Рекомендації до вибору діаметра зварювального електрода

Для операцій РДЗ вертикальних, горизонтальних і стельових зварних швів, незалежно від товщини металу, слід застосовувати електроди діаметром до 4 мм. Це дозволяє уникнути скапування розплавленого металу.

У випадках зварювання багатошарових швів для кращого провару кореня шва перший шов рекомендується зварювати електродом діаметром 3-4 мм. Для підвищення продуктивності процесу наступні шари шва можна накладати електродом більшого діаметра.

Зварювальний струм підбирають залежно від прийнятого діаметра електрода. Для процесів зварювання у нижньому положенні його можна визначити за формулою [22]:

$$I_{зв} = K \cdot d_e, \quad (1.1)$$

де $I_{зв}$ – сила зварювального струму, А;

K – коефіцієнт пропорційності, який залежить від типу й діаметра електрода, А/мм;

d_e – діаметр електрода, мм.

Для визначення необхідної сили зварювального струму можна використати й іншу, дещо спрощену формулу:

$$I_{зв} = (20 + 6 \cdot d_e) \cdot d_e, \quad (1.2)$$

де $I_{зв}$ – сила зварювального струму, А;

d_e – діаметр електрода, мм.

Якщо під час зварювання в нижньому положенні товщина металу зварюваних деталей є меншою $1,5 \cdot d_e$, то значення розрахованого $I_{зв}$ слід зменшити на 10-15 %. Якщо ж товщина металу буде більшою $3 \cdot d_e$, то значення $I_{зв}$ слід збільшити на 10-15 % порівняно з розрахунковим.

Під час зварювання швів у вертикальній площині значення струму слід зменшувати на 10-15 %, порівняно з обраною силою струму для зварювання в нижньому положенні. Для швів у стельовому положенні струм рекомендується зменшувати на 15-20 %.

Підібрану силу зварювального струму слід перевіряти методом контрольного наплавлення пробних валиків. При цьому визначають отриману глибину провару, ширину шва та оцінюють стійкість горіння дуги.

Глибина провару шва повинна становити 1-4 мм, а його ширина знаходитись в межах, яку можна визначити за формулою:

$$e = (1 \dots 4) \cdot d_e, \quad (1.3)$$

де e – ширина шва, мм.

Тип і марку зварювального електрода вибирають в залежності від необхідної міцності шва, потреби надання йому особливих властивостей, марки металу деталі, її товщини, жорсткості виробу, просторового розташування з'єднання, температури навколишнього середовища та майбутніх умов експлуатації виробу. Матеріал електрода повинен забезпечувати однорідність хімічного складу наплавленого металу шва з основним металом заготовок.

Напруга на дюзі напряду залежить від довжини дуги і може становити 16-40 В. Процес зварювання слід виконувати коротшою дугою при напрузі 16-20 В. Нормальною вважають дугу довжина якої становить $(0,5 \dots 1,1) \cdot d_e$. Межі підбору довжини дуги залежать від типу й марки електрода, а також положення зварювання у просторі [1, 2, 4, 5, 23].

Рід струму і полярність зварювання обирають залежно від зварюваного металу і його товщини. В процесах зварювання металоконструкцій із звичайних вуглецевих сталей доцільно застосовувати змінний струм, як дешевший порівняно з постійним. Застосування джерел постійного струму дозволяє використовувати пряму або зворотну полярність. Пряму полярність застосовують

для зварювання товстих металів, так як вона дозволяє підводити до основного металу (деталі) більше тепла. Зворотну полярність слід використовувати для зварювання тонких металів з метою уникнення пропалів.

Швидкість зварювання задають залежно від обраного способу зварювання, властивостей металу зварних деталей, характеристики електрода тощо. Швидкість переміщення електрода під час РДЗ задає зварник.

Розташування з'єднання (зварного шва) у просторі також має великий вплив на вибір основних режимів зварювання. РДЗ можна використовувати у всіх просторових положеннях. Найзручнішим з них є нижнє положення. Воно забезпечує найвищу якість зварних швів.

Висновки за розділом

Процес ручного електродугового зварювання штучними покритими електродами дозволяє виконувати нерознімні з'єднання деталей і металоконструкцій різної товщини в різних просторових положеннях. Сучасні джерела живлення забезпечують можливість підбору необхідних значень зварювального струму та напруги, полярності зварювання та інших технологічних параметрів. Даний вид зварювання широко використовується під час виготовлення зварних конструкцій з металу великої товщини, зокрема багатопрохідними швами. Тому дослідження даного процесу зварювання є актуальним та практичнозначимим.

2. ТЕХНОЛОГІЯ ВИКОНАННЯ БАГАТОПРОХІДНИХ ЗВАРНИХ ШВІВ

2.1. Види багатопохідних швів та способи їх зварювання

В залежності від числа наплавлених шарів у зварному шві і необхідних проходів для їх формування розрізняють наступні види зварних швів [1, 16, 18]:

- одношаровий однопохідний (рис. 2.1, а);
- багатошаровий (рис. 2.1, б);
- багатошаровий багатопохідний (рис. 2.1, в).



Рисунок 2.1 – Види зварних швів

Під час зварювання низьковуглецевої сталі в біляшовній зоні, яка нагрівається від температури навколишнього середовища до температури плавлення, утворюються такі ділянки: неповного розплавлення, перегріву, нормалізації, неповної перекристалізації, рекристалізації, повернення і старіння.

Процес однопохідного зварювання є більш економічним та високопродуктивнішим, проте метал шва характеризується зниженою пластичністю. Це пов'язано зі збільшенням зони перегріву основного металу (рис. 2.2) і грубою стовбчастою структурою металу (рис. 2.3,в).

При багатопохідному або багатошаровому зварюванні кожен з нижніх шарів зварного шва зазнає термічного впливу під час виконання наступних шарів, розташованого над ним. В наслідок цього структура металу шва буде дрібнозернистою [7, 30].

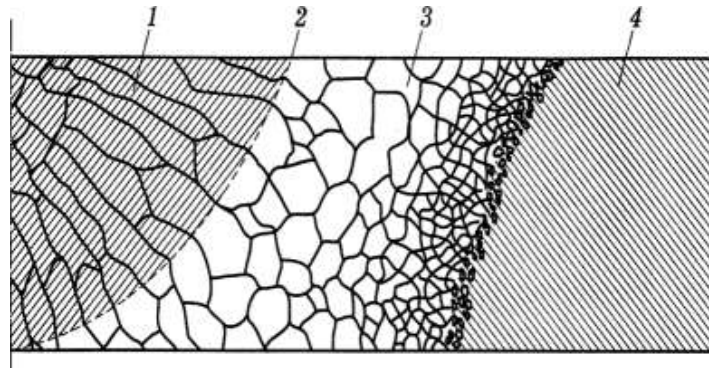


Рисунок 2.2 – Основні структурні зони у поперечному перерізі зварного з'єднання

1 – метал зварного шва; 2 – межа сплавлення; 3 – метал у зоні термічного впливу; 4 – основний метал

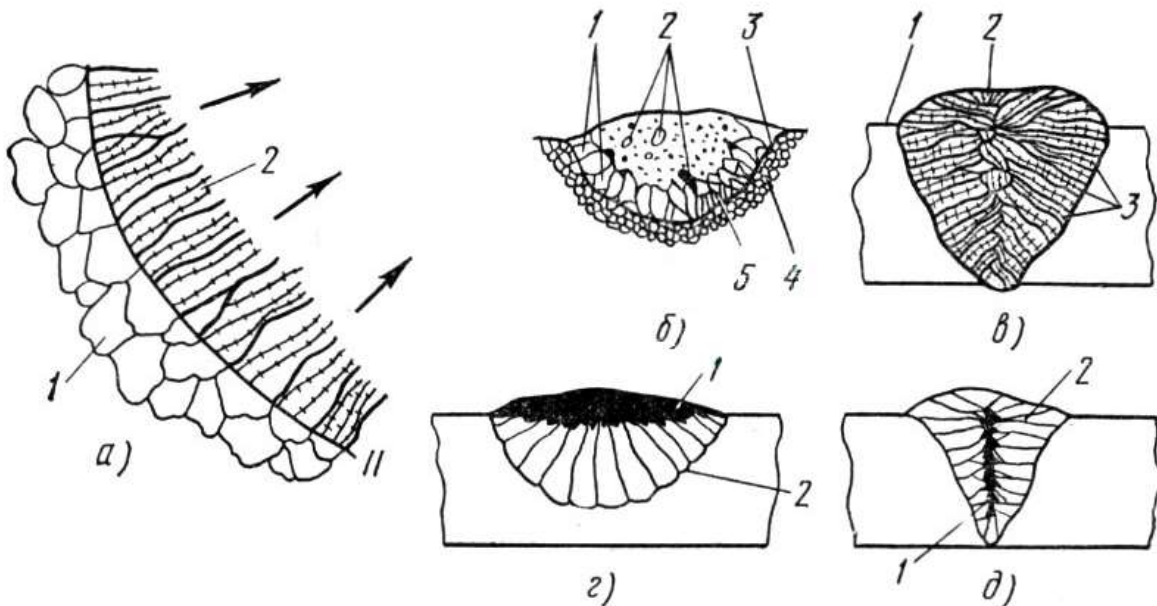


Рисунок 2.3 – Схеми кристалізації та структури зварного шва

а – утворення кристалів на межі розплавлення: 1 – основний метал; 2 – метал шва; б – схема кристалізації металу шва під час РДЗ покритими електродами: 1 – кристали з високою швидкістю росту; 2 – неметалічні включення (шлак); 3 – лінія розплавлення; 4 – основний нерозплавлений метал; 5 – кристали з низькою швидкістю росту; в – схема стовбчатої (дендритної) структури зварного шва: 1 – основний метал; 2 – метал шва; 3 – зерна дендритів; г – напрямок росту кристалів у широкому шві: 1 – неметалеві включення; 2 – зерна металу; д – напрямок росту кристалів у вузькому шві: 1 – основний метал; 2 – зерна металу

Якщо кількість шарів у зварному шві дорівнює кількості проходів зварювальною дугою, то такий шов називають багат шаровим. Якщо деякі із шарів виконуються за кілька проходів, то такий шов називають багатопрохідним (рис. 2.4) [26, 28].

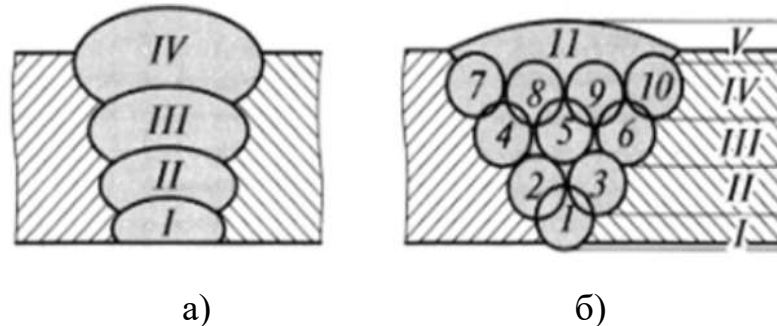


Рисунок 2.4 – Види зварних швів

а - багат шаровий; б - багат шаровий багатопрохідний;

1 - 11 - проходи; I-V - номери шарів

Багат шарові шви здебільшого застосовують у стикових зварних з'єднаннях. Багатопрохідні шви притаманні кутовим та тавровим зварним з'єднанням.

Для забезпечення рівномірного нагрівання металу шва по всій його довжині під час багатопрохідного зварювання, його проварюють:

- подвійним шаром;
- секціями;
- каскадом;
- блоками.

Усі ці способи базуються на принципі зворотно-ступеневого зварювання.

Суть способу зварювання подвійним шаром полягає в тому, що накладення другого шару шва виконують після видалення шлаку поверх першого шару, який ще не встиг охолонути. Слід відзначити, що накладання шарів швів довжиною 200-400 мм виконують у протилежних напрямках. Це дозволяє запобігти появі гарячих тріщин у швах під час зварювання металоконструкцій із заготовок металу товщиною 15-20 мм [26].

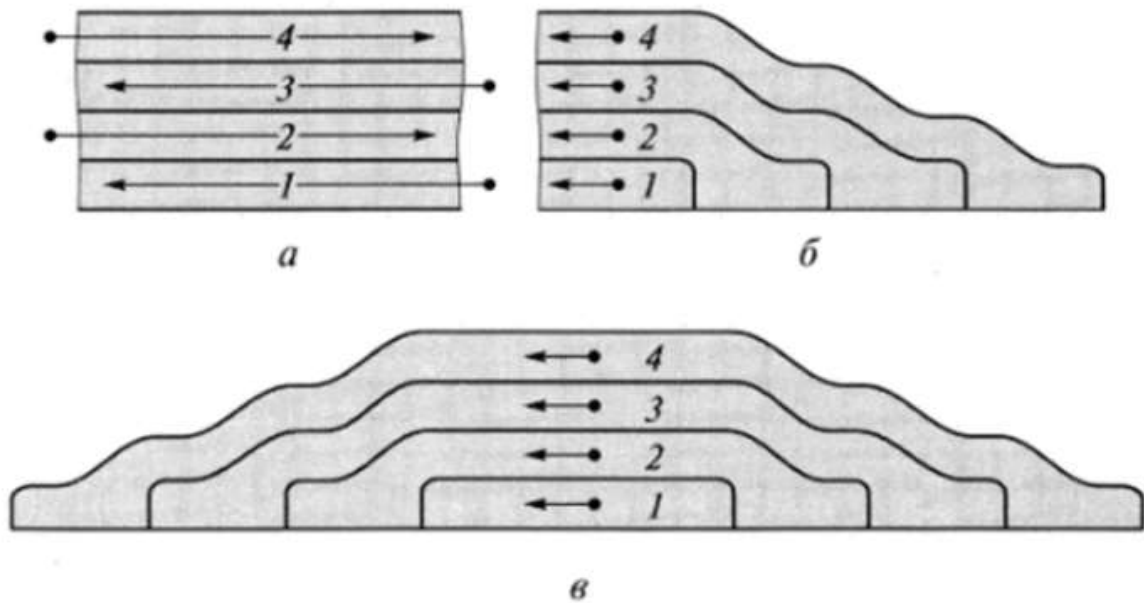


Рисунок 2.5 – Схеми виконання багатошарового зварювання

а - послідовним накладенням шарів; б - каскадом; в - гіркою; 1...4 - номери шарів; стрілками показані напрямки зварювання кореня шва

При товщині зварюванні сталевих листів завтовшки 20-25 мм і більше, з метою запобігання виникнення в них тріщин застосовують:

- зварювання каскадом;
- зварювання блоками;
- зварювання поперечною гіркою.

Заповнення багатошарового шва під час зварювання секціями чи каскадом здійснюється по всій товщині зварювання на певній довжині ступеня. Довжина ступеня підбирається таким чином, щоб метал кореня шва мав температуру, не нижче ніж 200 °С. У такому випадку метал шва буде мати високу пластичність, а тріщини за таких умов не утворюватимуться. Довжина кожного ступеня при зварюванні секціями чи каскадом має дорівнювати 200-400 мм.

При зварюванні деталей блоками багатошаровий шов рекомендують зварювати окремими ступенями, а проміжки між кромками заповнюють по всій товщині шарами.

Під час з'єднання деталей із гартованої сталі рекомендують застосовувати зварювання блоками, а для конструкцій з негартованих низьковуглецевих сталей

кращим є використання зварювання каскадом. Це забезпечує одержання дрібнозернистої та пластичної структури металу шва.

При зварюванні блоками довжиною приблизно 1 метра кращим є варіант, коли кожен окрему ділянку буде виконувати окремий зварник. При цьому напрямок шарів (проходів) на кожній з ділянок бажано змінювати. Одночасне формування багатопрохідного шва по довжині і за перетином дає можливість забезпечити рівномірний розподіл температур, що в свою чергу, значно зменшує загальні залишкові деформації зварної конструкції.

Спосіб зварювання поперечною гіркою використовують для з'єднань частин товстостінних труб (40 мм і більше) шарами за всією товщиною.

Багатошарове зварювання має ряд переваг перед одношаровим. Основними з них є:

- об'єм зварювальної ванни при накладанні кожного шару є відносно малим, у результаті чого швидкість вистигання металу вища, а розмір зерен в структурі металу шва зменшується;
- хімічний склад металу сформованого шва буде близьким за хімічним складом до наплавленого металу, оскільки використання малого зварювального струму при багатошаровому зварюванні сприятиме розплавленню незначної кількості основного металу заготовки;
- накладання кожного наступного шару шва здійснює термічну обробку металу попереднього шару, в результаті чого метал усього шва та метал біляшовної зони мають дрібнозернисту будову з вищою пластичністю та в'язкістю.

При зварюванні низьковуглецевої сталі кожен шар багатошарового шва має бути завтовшки 3-5 мм, що залежності від значення зварювального струму. Так, при зварюванні струмом біля 100 А дуга буде розплавляти метал на глибину 1 мм. При цьому метал нижнього шару буде термічно оброблятися на глибину 1-2 мм з одночасним утворенням дрібнозернистої структури. Зварювання на струмі біля 200 А дозволяє збільшити товщину наплавленого шару до 4 мм, а термічна обробка нижніх шарів відбуватиметься на глибину 2-3 мм [1, 2].

Термічної обробки металу кореневого шва та отримання дрібнозернистої структури його металу можна досягти шляхом нанесенням підварного шва, виконаного електродом діаметром 3 мм на зварювальному струмі 100 А. Перед підварюванням валика корінь шва очищають термічною стружкою, фрезою або різцем. Підварний валик слід накладається по всій довжині способом напрохід.

Термічна обробка металу верхнього шару багатопрохідного шва виконується шляхом нанесенням відпалюючого (декоративного) шару. Його товщина має бути мінімальною (не більше 1-2 мм). Це забезпечує високу швидкість вистигання ванни та утворення дрібнозернистої структури металу верхнього шару шва. Відпалювальний шар рекомендується наносити електродами діаметром 5-6 мм на струмі 200-300 А, який підбирають в залежності від товщини зварюваних кромок кількості наявних шарів і проходів у шві.

2.2. Особливості виконання багатопрохідних зварних швів у стикових з'єднаннях

Стикові зварні шви використовується для з'єднання листового металу або торців труб. Для з'єднання деталі укладають таким чином, щоб між їх торцями (кромками) зберігався зазор 1-2 мм та жорстко фіксують струбцинами. В процесі зварювання цей зазор буде заповнений розплавленим металом.

Конструкції з тонкого листового металу (до 4 мм) можна зварювати без попередньої підготовки. У цьому випадку зварювання проводять лише з одного боку. При товщині листів понад 4 мм, шов може бути одинарним або подвійним, але для забезпечення повного провару потрібно обробляти кромки зварюваних деталей одним з представлених на рис. 2.6. способом.

Так як при зварюванні деталей товщиною від 4 мм до 12 мм можуть застосовуватись одинарні зварні шви [6], то кромки зачищають будь-яким із доступних способів.

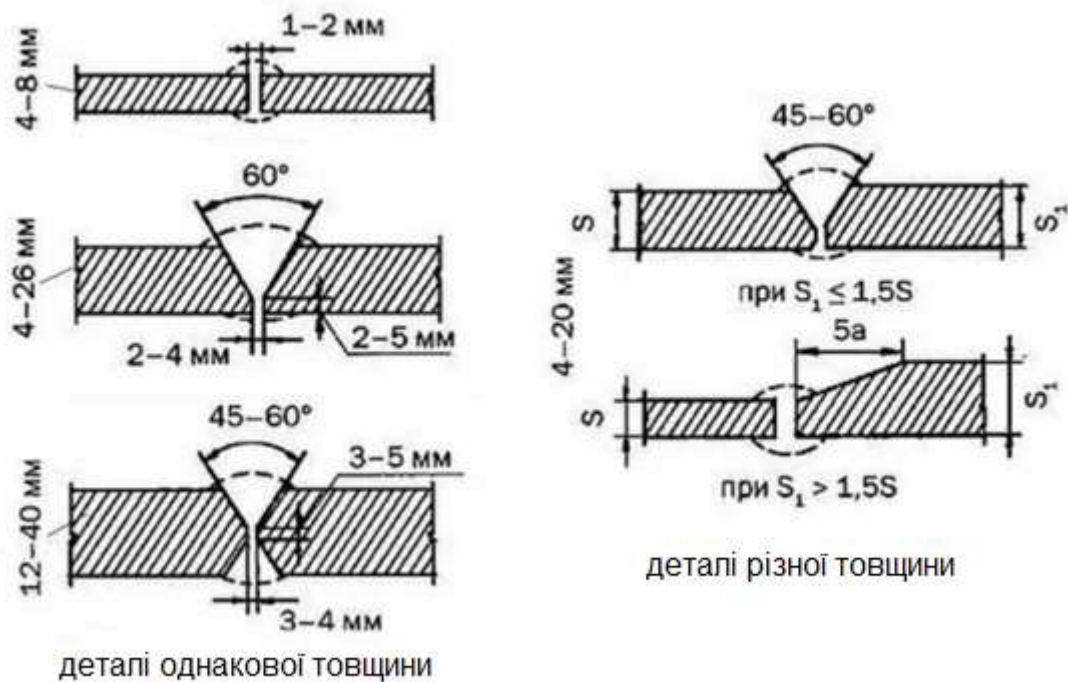


Рисунок 2.6 – Схеми обробки кромки металу при з'єднанні деталей встик

При товщині листів до 10 мм підготовку кромки зручніше робити з однієї сторони. Здебільшого кромки товстіших деталей зачищають у вигляді літери V. U-подібні кромки складніші у виконанні, тому їх використовують рідше. При підвищених вимогах до якості зварювання деталей товщиною понад 6 мм необхідно обробляти їх зварні кромки з обох боків на накладати подвійний шов – з одного та з іншого боку.

Зварювання встик металу товщиною понад 12 мм вимагає подвійного шва, оскільки якісно прогріти такий шар металу з одного боку неможливо. Обробку кромки виконують двосторонню у вигляді літери X. Використання V або U подібних кромки за такої товщини не вигідно, оскільки для їх заповнення потрібно в рази більше металу. Це призводить до збільшення витрат електродів і значного зниження швидкості зварювання.

Якщо з технологічних чи конструктивних міркувань необхідно зварювати деталі великої товщини з односторонньою обробкою кромки, то заповнювати такий шов потрібно буде за декілька проходів.

Технологічний процес виконання стикового зварного з'єднання товстих листів металу якісно ілюструє рисунок 2.7.

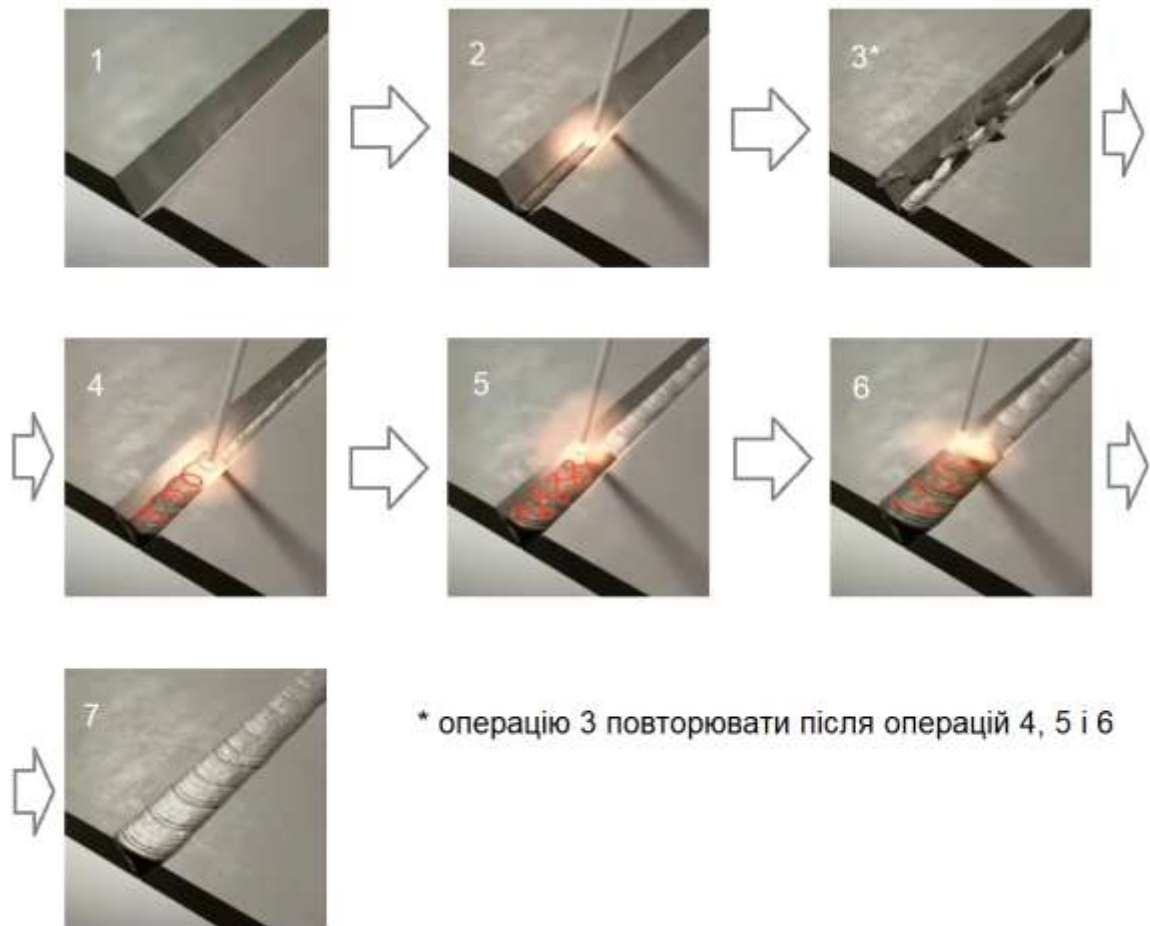


Рисунок 2.7 - Технологічний процес виконання стикового зварного з'єднання багатошаровим швом

- 1 – обробка зварюваних кромки; 2 – виконання кореневого шва (1 прохід);
 3 – очистка шлаку; 4, 5 – заповнення розроблених кромки (2 і 3 прохід);
 6 – накладання декоративного шару (4 прохід); 7 – контроль якості шва

2.3. Особливості виконання багатопрохідних зварних швів у таврових та кутових з'єднаннях

Таврове зварне з'єднання за формою подібне на літеру «Т», а кутове – на літеру «Г». Таврові з'єднання може бути виконані за допомогою одного або двох швів. Кромки деталей потрібні також можуть при бути обробленими. Необхідність їх обробки, як і для стикових з'єднань, залежить від товщини зварюваних деталей і необхідної кількості швів. Існують наступні рекомендації для їх виконання (рис. 2.8) [1, 2]:

- при товщині металу до 4 мм деталі зварюють одинарним швом без обробки кромки;
- при товщині деталей від 4 мм до 8 мм їх можна зварювати без обробки кромки подвійним швом;
- при товщині від 4 мм до 12 мм рекомендується виконувати одинарний шов з обробкою кромки деталі з одного боку;
- при товщині деталей понад 12 мм кромки слід знімати з двох сторін однієї з деталей і зварювання проводять також з обох боків.

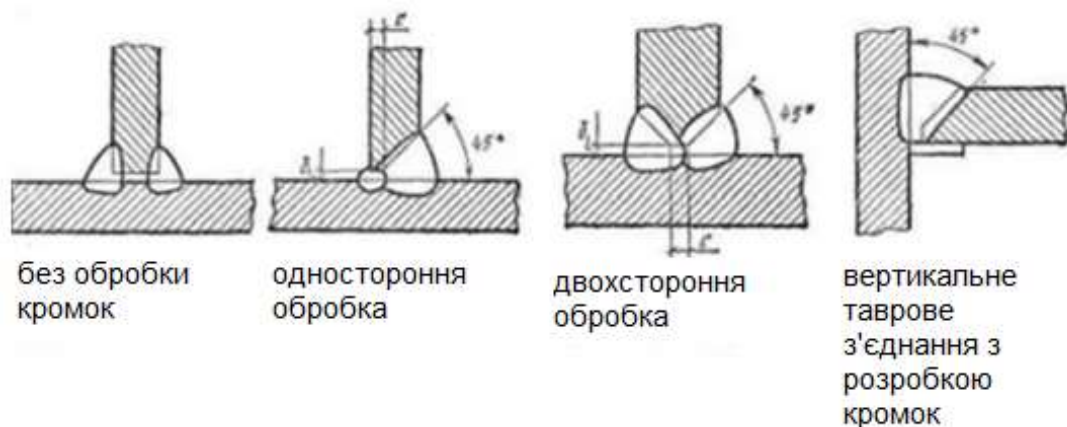


Рисунок 2.8 – Типи таврових зварних з'єднань

Технологічний процес виконання таврового зварного з'єднання Т6 товстих листів металу якісно ілюструє рисунок 2.9.

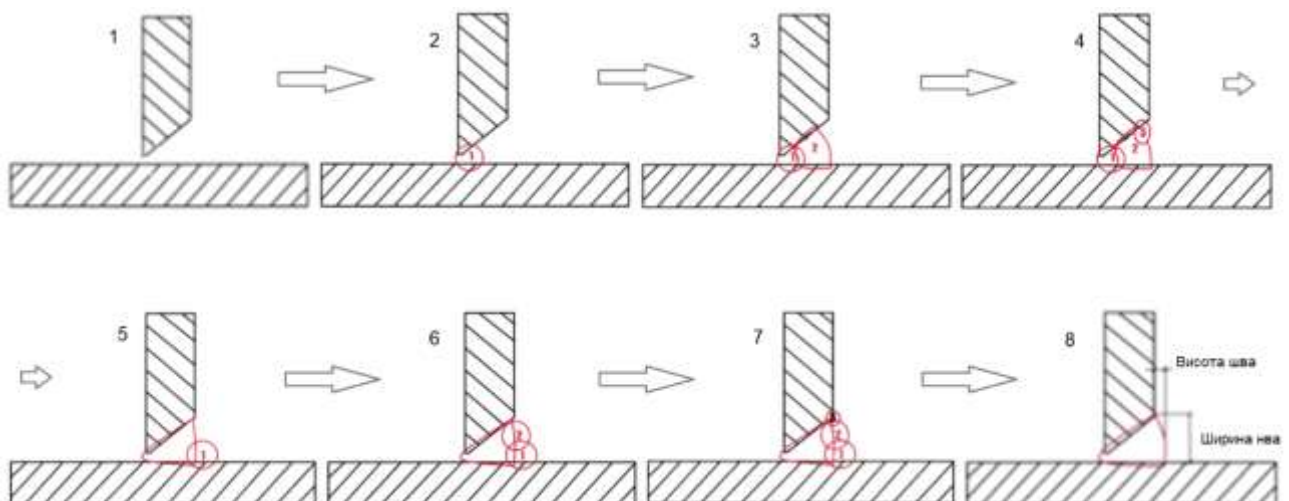


Рисунок 2.9 – Схема процесу виконання таврового зварного з'єднання багатопрохідним швом

Технологічний процес зварювання таврового з'єднання Т6 з односторонньою розробкою кромки можна розділити на декілька етапів:

- 1 – підготовка кромки під зварювання;
- 2 – проварювання кореневого шва;
- 3, 4 – заповнення розроблених кромки;
- 5, 6, 7 – формування шва, відповідно до вимог стандарту (табл. 2.1);
- 8 – контроль якості шва.

Таблиця 2.1 – Вимоги стандарту ДСТУ щодо форми та розмірів зварного шва Т6

Умовне позначення зварного з'єднання	Конструктивні елементи		Спосіб зварювання	s	b		c		e		α, град. (гран. відх. +2°)
	підготованих кромки зварюваних деталей	шва зварного з'єднання			Ном.	Гран. відх.	Ном.	Гран. відх.	Ном.	Гран. відх.	
Т6			ИНп	3,0—4,0	+1	1	±1,0		7	±2	55
				4,5—6,0					10		
				7,0—10,0					16		
				3,0—4,0					6		
			ИП, УП	4,5—6,0	0	+2	2,0	+1,0 -2,0	8	±3	45
				7,0—10,0					12		
				11,0—14,0					16		
				16,0—18,0					20		
				20,0—22,0					24		
				24,0—26,0					28		
				28,0—30,0					32		
				32,0—34,0					36		
				36,0—40,0					40		
				42,0—45,0					44		
					+3					±4	

Кутові шви виконують як частину таврового. Рекомендації щодо їх виконання такі ж самі: тонкий метал можна зварювати без обробки кромки, а для деталей більшої товщини знімають кромки з однієї або двох сторін.

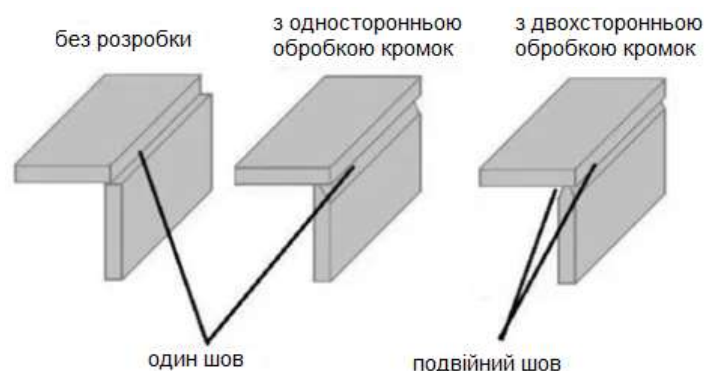


Рисунок 2.10 – Схема підготовки деталей для утворення кутового з'єднання

Кутові та таврові з'єднання іноді доводиться зварювати з обох боків (двома швами). Для правильного зварювання таких швів деталі встановлюють так, щоб їх металеві площини знаходилися під однаковим кутом [16]. На рис. 2.11 цей спосіб вказано як «в човник». За такого розташування деталей простіше розраховувати потрібні рухи електрода.

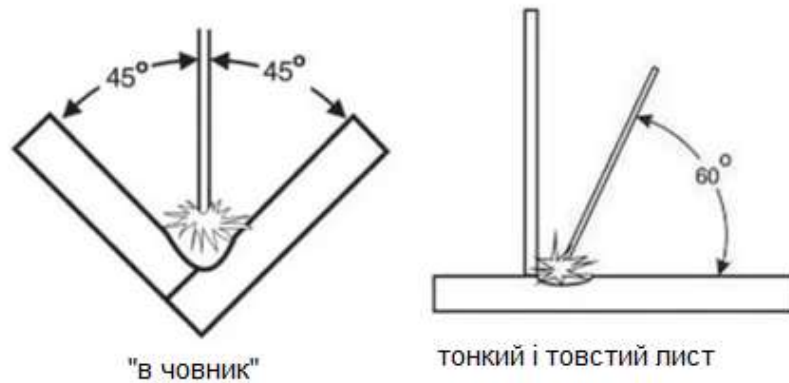


Рисунок 2.11 – Зварювання шва «в човник» та при з'єднанні металів різної товщини

При з'єднанні заготовок з тонкого та товстого металу (рис. 2.10) кут нахилу електрода повинен бути близький до 60° по відношенні до площини більш товстої деталі. За такого положення більше буде прогріватися товстіша деталь, тонкий метал не прогоратиме, що може статися при куті нахилу 45° .

При зварюванні багатопрохідних кутових швів зварювальнику необхідно постійно стежити за положенням та рухами електрода. В процесі зварювання шов має бути з рівномірним заповненням.

Якщо нижня площина кутового з'єднання розташована горизонтально, часто виникають випадки, коли на вертикальній площині та в самому куті з'єднання металу замало, оскільки він може стікати вниз. Це може відбуватися по тій причині, що у вершині кута електрод перебуває менше часу, ніж біля його бічних поверхонь. Тому рух кінчика електрода має бути рівномірним. Друга причина такої ситуації – це підбір занадто великого діаметра електрода, що не дозволяє опустити дугу нижче і нормально прогріти місце стику. Щоб уникнути появи такого дефекту, дугу слід розпалювати на горизонтальній поверхні (у точці «А»), як це показано на рис. 2.12. Далі зварювальник переміщує електрод до

вертикальної поверхні, а потім круговим рухом повертає його на місце. Коли електрод знаходиться над швом, він має мати нахил 45° . По мірі його переміщення вгору кут трохи зменшується (ліва схема на рис. 2.12). При переведенні дуги на горизонтальну поверхню, кут нахилу електрода збільшується. За такої техніки шов буде заповнюватися рівномірно [16].

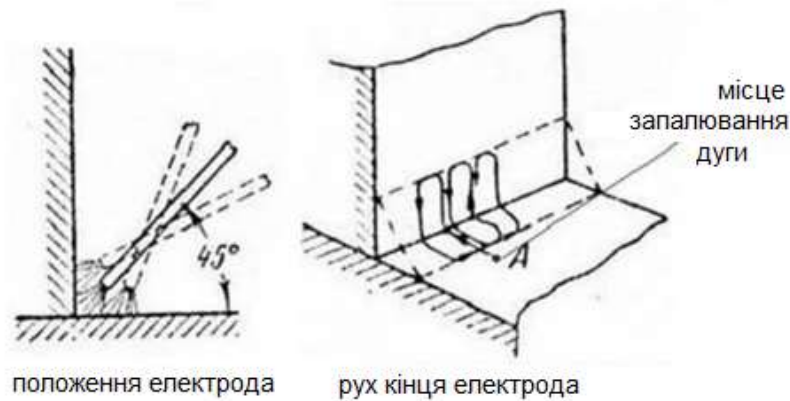


Рисунок 2.12 – Зварювання кутового шва - положення та рух електрода

Під час зварювання кутових з'єднань важливо слідкувати за тим, щоб час знаходження електрода, а отже й час горіння дуги, у всіх трьох точках (на сторонах і в центрі шва) був однаковим.

2.4. Особливості виконання стельових багатопрохідних швів

Перед початком зварювання деталей багатопрохідними швами у стельовому положенні місця, які піддаватимуться зварюванню потрібно добре обробити, зачистивши краї зварюваних деталей за допомогою болгарки або металевої щітки.

Корінь зварного стельового шва проварюється електродом діаметром 3 мм (рис. 2.13). За їх допомогою вдається легко сформувати валик з розплавленого металу. Якщо стоїть вимога повного провару та формування валика і зі зворотного боку з'єднання, то зварювальнику потрібно спрямовувати електрод маленькими короткими ривками всередину проміжку між розробленими кромками. Важливо постійно стежити та контролювати рівномірність горіння та довжину зварювальної дуги [3, 16].

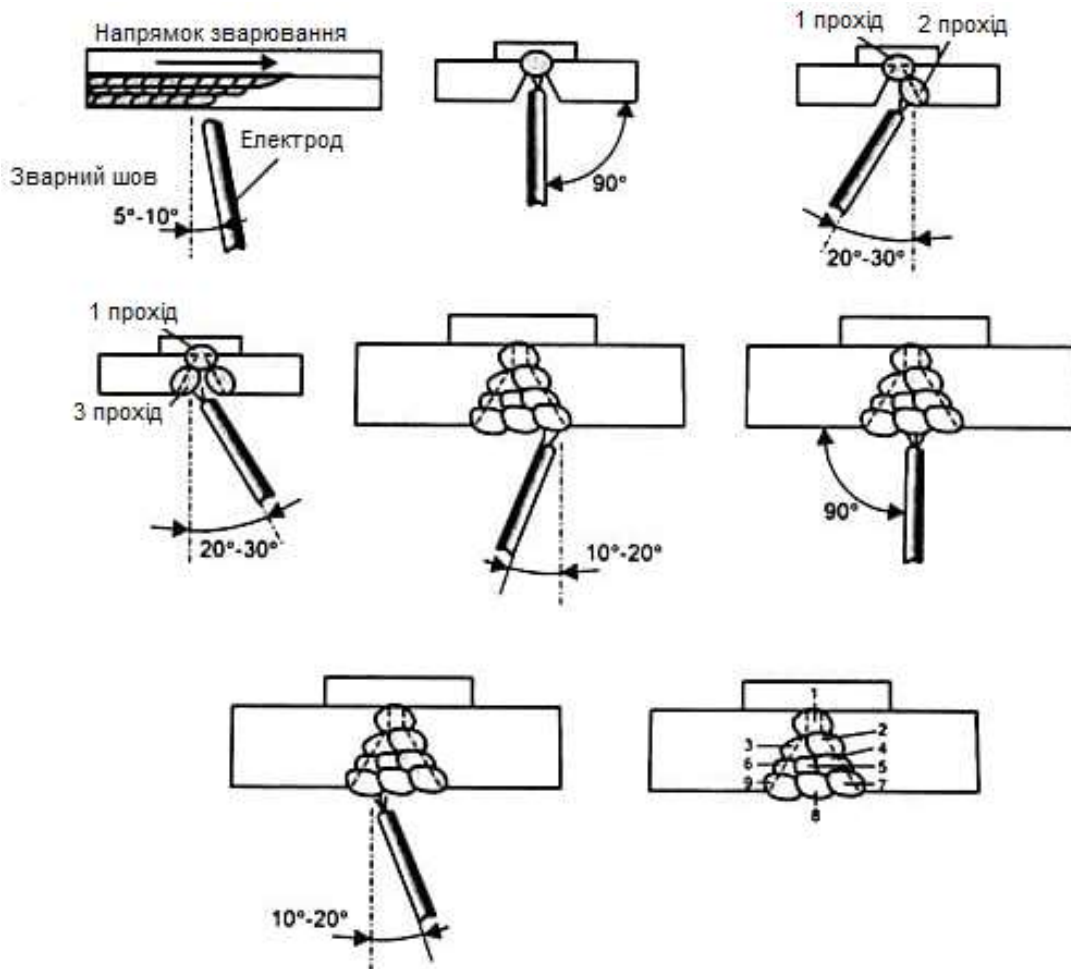


Рисунок 2.13 – Техніка виконання стельових багатопрохідних швів

Сформований валик кореневого шва звільняють від шлаку. Якщо його форма занадто випукла, то обов'язковим є доведення та його очистка до чистого металу. Для наплавлення наступних валиків і шарів на наступних етапах можна застосовувати електроди більшого діаметру (наприклад 4 мм).

Висновки за розділом

Особливістю процесу зварювання деталей багатопрохідними швами є дотримання необхідних прийомів зварювання з метою забезпечення високої якості зварних швів. Вибір оптимальної схеми накладання шарів шва дозволить отримати суцільне міцне з'єднання без дефектів та з високою продуктивністю процесу.

3. МЕТОДИКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Програма експериментальних досліджень

Програма експериментальних досліджень процесу зварювання багатопрохідних зварних швів розроблена для визначення оптимальних параметрів процесу зварювання та передбачала виконання кількох завдань:

1. Проаналізувати технологію ручного дугового зварювання металів;
2. Проаналізувати особливості виконання багатопрохідних зварних швів;
3. Визначити конструктивні параметри зварних з'єднань, виконаних багатопрохідними зварними швами;
4. Визначити параметри процесу зварювання, які впливають на якість зварних з'єднань;
5. Підібрати необхідне обладнання.
6. Виконати зварювання зразків багатопрохідними зварними швами;
7. Оцінити вплив режимів зварювання на якість зварних швів та зварних з'єднань;
8. Обґрунтувати оптимальний режим процесу деталей багатопрохідними зварними швами.

Експериментальні дослідження планується проводити з використанням зварювального інвертора, яке дозволяє виконувати процеси ручного дугового зварювання (РДЗ) покритими штучними електродами.

3.2. Опис зварювального апарата

Інверторне зварювальне джерело TWI-300 PR призначене для виконання операцій ручного електродугового зварювання штучними покритими електродами різних типів постійним зварювальним струмом прямої чи зворотної полярності. Його можна використовувати у машинобудівних цехах,

будівельно-монтажних та ремонтно-відновлювальних роботах на ділянках та цехах, в яких є наявна електрична мережа 220 В.

Зовнішній вигляд зварювального джерела TWI-300 PR показаний на рисунку 3.1 [13].

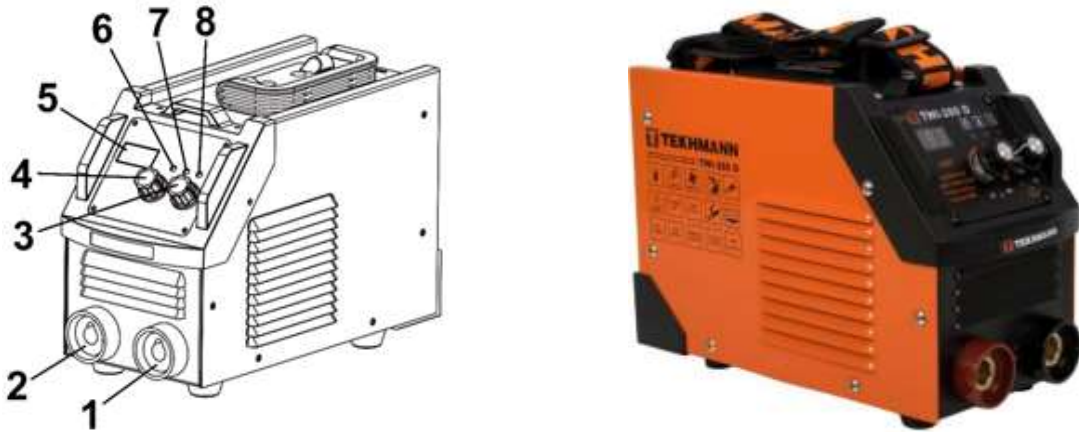


Рисунок 3.1 – Зварювальне джерело Tekhmann TWI-300 PR

1, 2 - клеми «-» та «+» для під'єднання кабелів затискача маси та електродотримача; 3 - регулятор форсування дуги «ARC Force»; 4 - регулятор сили зварювального струму; 5 - дисплей; 6 - індикатор увімкнення живлення; 7 - індикатор захисту від перегріву; 8 - індикатор захисту електроніки виробу

Зварювальне джерело змонтоване у металевому корпусі. На передній панелі розташовані: регулятор струму 4; регулятор форсування дуги 3; світлові індикатори 6, 7, 8; дисплей 5 для фіксації струму зварювання; клеми 1 і 2 з байонетними роз'ємами для під'єднання зварювальних кабелів. Корпус має штамповані щілини для вентиляції та охолодження [13].

На задній стінці вбудований вентилятор системи охолодження, який захищений решіткою. Також там встановлена кнопка вмикання джерела. Електронний інверторний блок вбудований у внутрішній корпус. До електромережі апарат під'єднується за допомогою шнура з 3-х контактною вилкою із заземленням. Після увімкнення зварювального джерела на його панелі світиться зелений світлодіод індикатора 6.

Апарат встановлений на 4 амортизаційні опори, а для зручності користування, до корпусу прикріплена транспортна наплічна стрічка.

Таблиця 3.1 – Технічна характеристика зварювального джерела 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

Електрична частина джерела складається з електронних блоків, приладів індикації, вмикачів та регуляторів параметрів струму, вентилятора, з'єднувальних провідників та мережевого кабеля. Ізоляція зварювального апарату витримує нагрів до 155 °С, що відповідає класу теплостійкості F. Отвори примусовою вентиляції зварювального джерела ні в якому разі не можна закривати.

Так як зварювальне джерело відноситься до інверторних, то воно здатне перетворювати змінний струму 1-фазної мережі у постійний зварювальний струм. Його принцип роботи базується на властивостях високочастотного струму до здатності передавати енергію високої щільності в малих провідниках та електронних елементах. Конструкція інвертора побудована на мостових біполярних транзисторах з ізольованими затворами (IGBT). Його електронні блоки знижують напругу мережі, підвищують її частоту з 50 Гц до 30 кГц, і генерують стабільний постійний струм зварювання з діапазоном регулювань від 20 до 300 А за принципом широко-імпульсної модуляції.

Після включення живлення на панелі зварювального джерела починає світитися індикатор електромережі 6. Індикатор 7 вимкнений за нормальної роботи джерела. Якщо ж він засвітився, то це свідчить про перевищення температури та спрацьовування термічного захисту. Джерело буде вимкненим доки не досягне нормальної температури. Індикатор 8 може засвітитися у

випадку струмового перевантаження по вхідній мережі, перевантаження вихідних транзисторів та при низькій напрузі в електромережі.

Джерело живлення має деякі вбудовані функції. Функція "Гарячий старт" забезпечує краще запалювання дуги. Функція "TOUCH START" забезпечує швидкий вихід на робочий режим після перебування джерела в холостій роботі. На відміну від неї, функція очікування "STAND BY" забезпечує перехід в режим очікування через 5 хвилин після згасання дуги. Разом з нею функція відключення вентилятора "SMART FAN" дозволяє економити електроенергію.

Функція "Форсаж дуги" забезпечує підвищення зварювального для збільшує зону проплавлення та запобігає залипанню електрода. Цьому ж запобігає функція "Anti stick", яка вимикає струм зварювання через незначний проміжок часу після злипання електрода. Це дозволяє зберегти його роботоздатність та легко від'єднати від заготовки.

Необхідний струм зварювання виставляється за допомогою потенціометра 4. Налаштоване значення відображається на дисплеї джерела.

3.3. Підготовка апарата до використання

Виконувати будь-які підключення до зварювального джерела необхідно при від'єднанні його від мережі живлення. Зварювальні кабелі під'єднують до клем «+» та «-», в залежності від полярності зварювання [24].

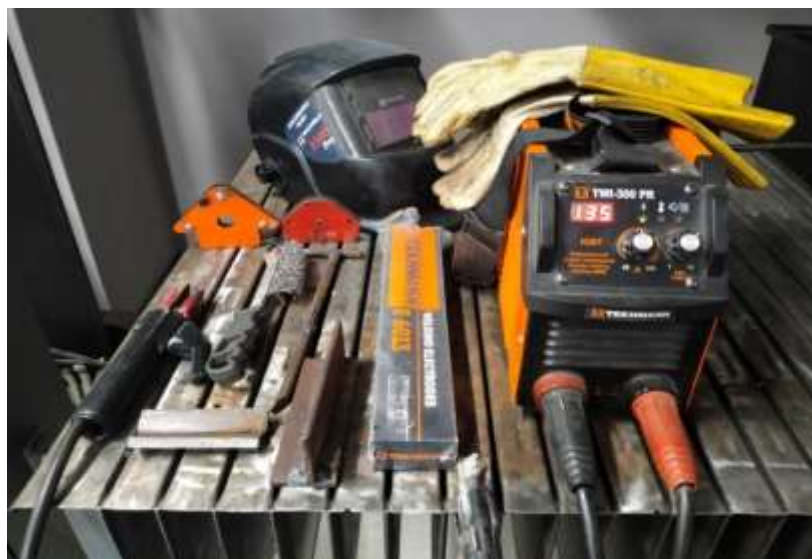


Рисунок 3.2 – Зварювальне обладнання та інструменти

Клему кабелю маси слід приєднувати на очищену поверхню заготовки на мінімальній відстані від місця виконання шва.

Перед запалюванням дуги встановлюють потрібну силу зварювального струму. Її значення визначають за діаметром електрода, типу металу, типу зварного з'єднання та інших параметрах.

Зварювальний струм потрібно регулювати залежно від діаметра використовуваного електрода та від типу зварювального шва. Рекомендації щодо вибору струму зварювання наведені в таблиці 3.2 [13, 24].

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	1,5-3,0	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 підбирається за товщиною металу та видом його підготовки. За даними табл. 3.2, вищі значення зварювального струму приймають для виконання горизонтальних швів, а нижчі – для вертикальних та стельових швів.

3.4 Характеристики електродів, які використовувались в експериментальних дослідженнях

Зварювальні електроди Tekhmann E6013 – це електроди для ручного електродугового зварювання конструкційних, низьковуглецевих та низьколегованих сталей у всіх просторових положеннях. Їх можна використовувати зі зварювальними джерелами, які працюють на змінному або постійному струмах.



а)



б)

Рисунок 3.3 – Електроди для ручного дугового зварювання

а – упаковка; б - маркування

Ці електроди відрізняються легким запалюванням та м'яким і стабільним горінням дуги. Вони забезпечують малі втрати металу на розбризкування, рівномірне плавлення обмаски, хороше формування швів, легке відділення шлаку. Електроди Tekhmann малочутливі до якості підготовки кромки, наявності іржі та інших забруднень на поверхні заготовок.

3.5. Методика розрахунку режимів ручного дугового зварювання

Режимом зварювання називають сукупність основних характеристик процесу зварювання, які забезпечують формування зварних швів заданих розмірів, форми і якості.

Для процесу ручного дугового зварювання основними параметрами режиму є:

1. Діаметр зварювального електрода, d_e , мм;
2. Сила зварювального струму, $I_{зв}$, А;
3. Напруга зварювальної дуги, U_d , В;
4. Швидкість зварювання, $V_{зв}$, м/год.
5. Рід зварювального струму;
6. Полярність струму .

3.5.1. Розрахунок режиму зварювання швів стикових з'єднань з розробкою кромки

В наших дослідженнях ми досліджуємо процес зварювання стикового з'єднання багатопрхідним зварним швом, коли зварні деталі мають оброблені кромки. Для цього були підготовлені зразки, які імітували стикове з'єднання товстостінних деталей з розробленими кромками (рис. 3.4).

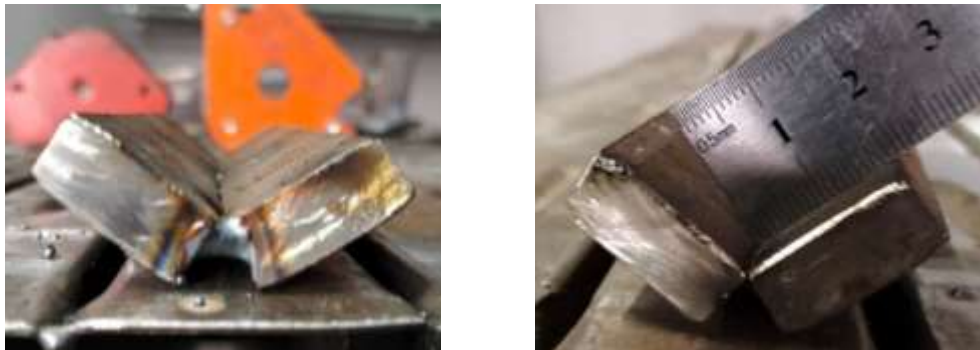


Рисунок 3.4 – Зварюваний зразок

У якості заготовки використовували сталюну полосу товщиною 8 мм. З неї прихватками зварювали експериментальний зразок, який імітував дві деталі, торці яких були підготовлені під зварювання шляхом зняття кромки під кутом 55° згідно ДСТУ-Н Б А.3.1-16. Таким чином було отримано кромки довжиною 20 мм (див. рис. 3.3).

Діаметр електрода для зварювання швів у стикових з'єднаннях вибирають залежно від товщини зварних деталей. У випадку зварювання стикових швів у нижньому положенні керувалися даними таблиці 3.2.

При зварюванні багат шарових швів перший шар рекомендується зварювати електродами на 1 мм менше, ніж зазначеними в таблиці 3.2, але не більше 5 мм, оскільки застосування більших діаметрів не дозволяє забезпечити проникнення в глибоку обробку для забезпечення провару кореня шва.

Під час визначення кількості проходів варто враховувати, що площа перерізу першого проходу не повинне перевищувати $30...35 \text{ мм}^2$. При проектуванні процесу зварювання багатопрхідним швом площу перерізу першого проходу можна визначити за формулою [19]:

$$F_1 = (6 \dots 8) \cdot d_e, \text{ мм}^2 \quad (3.1)$$

а наступних проходів – за формулою:

$$F_n = (8 - 12) \cdot d_e, \text{ мм}^2 \quad (3.2)$$

де F_1 – площа поперечного перерізу першого проходу, мм²;

F_n – площа поперечного перерізу наступних проходів, мм²;

d_e – діаметр електрода, мм.

Для визначення кількості проходів і маси наплавленого металу потрібно визначити площу перетину швів. Вона являє собою суму площ елементарних геометричних фігур, які її формують. Тоді площа перетину одностороннього стикового шва виконаного з V-подібною розробкою кромek (рис. 3.4) визначається як сума геометричних фігур:

$$F_n = F_1 + F_2 + 2F_3, \quad (3.3)$$

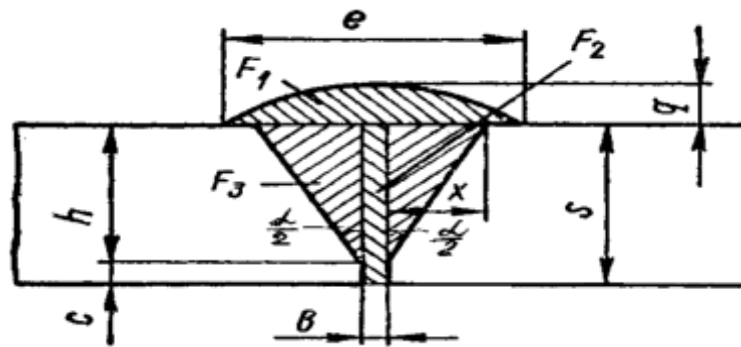


Рисунок 3.4 - Геометричні елементи площі перетину стикового шва

S – товщина металу, мм; h – глибина проплавлення, мм; c – притуплення, мм;

e – ширина шва, мм; v – величина зазору, мм; g – висота посилення шва, мм;

α - кут обробки кромek

Глибина проплавлення визначається за формулою:

$$h = (S - c), \text{ мм} \quad (3.4)$$

Площа перетину геометричних фігур ($F_1 + F_2$) визначають за формулою:

$$(F_1 + F_2) = 0,75 e \cdot g + S \cdot v, \text{ мм}^2 \quad (3.5)$$

Прийнявши за ДСТУ 3159-95 значення $e = 22 \pm 3$ мм і $q = 2^{+1,5}_{-0,5}$ мм для товщини $S = 16$ мм при $v = 0$ мм отримаємо:

$$(F_1 + F_2) = 0,75 \cdot 22 \cdot 2 + 16 \cdot 0 = 33 \text{ мм}^2$$

Площа прямокутних трикутників F_3 визначають за формулою;

$$F_3 = h \cdot x/2, \text{ мм}^2 \quad (3.6)$$

де $x = h \cdot \operatorname{tg} \alpha/2$;

тоді:

$$F_3 = (h^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha/2) / 2, \text{ мм}^2 \quad (3.7)$$

Оскільки розглянута нами площа V-подібного шва складається із двох прямокутних трикутників, тому:

$$2F_3 = h^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha/2, \text{ мм}^2 \quad (3.8)$$

Підставляючи значення елементарних площ у формулу (3.3), одержимо:

$$F_n = 0,75 \cdot e \cdot g + e \cdot S + h^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha/2, \text{ мм}^2 \quad (3.9)$$

При $h = S = 16$ мм отримаємо:

$$F_n = 0,75 \cdot 22 \cdot 2 + 16^2 \cdot \operatorname{tg} 110/2 = 399,08 \text{ мм}^2$$

Приймаємо $F_n = 400 \text{ мм}^2$

Знаючи загальну площу поперечного перерізу наплавленого металу F_n , а також площу поперечного перерізу першого F_1 і кожного з наступних проходів шва F_c , знайдемо загальну кількість проходів n за формулою:

$$n = (F_n - F_1) / F_n + 1 \quad (3.10)$$

$$n = (400 - 33) / 48 + 1 = 7,6$$

Отримане число округляють до найближчого цілого, та отримуємо $n = 8$.

Розрахунок необхідної сили зварювального струму при РДЗ виконаємо за діаметром електрода й допустимій щільності струму за формулою:

$$I_{зв} = \frac{\pi \cdot d_e^2}{4} j, \quad (3.11)$$

де d_e – діаметр електрода, мм;

j – допустима щільність струму, А/мм².

Зварювальний струм визначається для виконання першого проходу й наступних проходів тільки при зварюванні багатопрохідних швів електродами різної товщини.

Допустима щільність струму залежить від діаметра електрода і виду його покриття. Чим більшим є діаметр електрода, тим меншою буде допустима щільність струму. Це відбувається через погіршення умови охолодження. Допустиму щільність струму в електроді при РДЗ можна вибрати з таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Допустима щільність струму в електроді під час РДЗ

Вид покриття	Діаметр стрижня електрода, мм				
	2	3	4	5	6 і більше
Основне	15, 0-20,0	13, 0-18,5	10, 0-14,5	9, 0-12,5	8, 5-12,0
Кисле, рутилові	14, 0-20,0	13, 5-19,0	11, 5-15,0	10, 0-13,5	9, 5-12,5

Прийнявши з таблиці $j = 19 \text{ А/мм}^2$, отримаємо:

$$I_{зв} = \frac{3,14 \cdot 3^2}{4} \cdot 19 = 134,2 \text{ А}$$

Напруга на дузі при ручному дуговому зварюванні змінюється в межах 20-36 В і при проектуванні технологічних процесів РДЗ не регламентується.

Швидкість переміщення зварювальної дуги (швидкість зварювання) можна визначати за формулою:

$$V_{зв} = \frac{\alpha_n \cdot I_{зв}}{\rho \cdot F_n \cdot 100}, \text{ м/год} \quad (3.12)$$

де α_n – коефіцієнт наплавлення, г/А год; (при зварюванні постійним струмом прямої полярності $\alpha_n = 7 \dots 8 \text{ г/А год}$);

ρ – щільність наплавленого металу за даний прохід, г/см³ (для сталі 7,8 г/см³).

$$V_{зв} = \frac{7,5 \cdot 134,2}{7,8 \cdot 33 \cdot 100} = 3,91 \text{ м/год.}$$

При зварюванні багатопрохідних швів різними електродами та на різних струмах швидкість переміщення дуги (швидкість зварювання) визначають для першого проходу й наступних проходів окремо.

3.5.2. Розрахунок режиму зварювання кутових багатопрохідних швів

При зварюванні кутових швів діаметр електрода вибирається залежно від катета шва. Рекомендоване співвідношення між діаметром електрода й катетом шва під час зварювання кутових швів наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Рекомендації з вибору діаметра електрода для зварювання кутових швів

Катет шва, К, мм	2	3	4	5	6-8	9-12	12-20
Рекомендований діаметр електрода, d_e , мм	1, 6-2	2, 5-3	3-4	4,0	4-5	5,0	5,0

Максимальний перетин металу, наплавленого за один прохід, не повинне перевищувати 30 ... 40 мм² ($F_{\max} = 30 \dots 40 \text{ мм}^2$).

Площа перетину перерізу кутового шва, необхідна для визначення кількості проходів, розраховується за формулою:

$$F_n = k_3 \cdot K^2 / 2, \text{ мм}^2 \quad (3.13)$$

де F_n – площа перетину перерізу наплавленого металу, мм²;

K – катет шва, мм;

k_3 – коефіцієнт збільшення, який враховує опуклість шва й зазори.

Для найпоширеніших кутових швів з катетом 2 ... 20 мм, коефіцієнт k_3 вибираємо з таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 - Рекомендації до вибору коефіцієнта збільшення

Катет шва, K , мм	2	3-4	4-5	6-8	9-12	12-20
Коефіцієнт збільшення k_3	1,8	1,5	1,35	1,25	1,15	1,10

Прийнявши катет шва $K = 12$ мм і коефіцієнт $k_3 = 1,15$ отримаємо:

$$F_n = 1,15 \cdot 12^2 / 2 = 82,8 \text{ мм}^2$$

Визначивши площу поперечного перетину шва й знаючи максимально можливу площу перетину, яку можна одержати за один прохід, знайдемо число проходів n за формулою:

$$n = F_n / (30 \dots 40) = 82,8 / 30 = 2,76 \quad (3.14)$$

Отримане дробове число округлюємо до найближчого цілого і отримаємо $n = 3$.

Силу зварювального струму визначимо за формулою (3.11).

Напруга на дузі при ручному дуговому зварюванні кутових швів змінюється в межах 20 ... 38 В.

Швидкість зварювання визначають за формулою (3.12):

$$V_{зв} = \frac{7,5 \cdot 134,2}{7,8 \cdot 82,8 \cdot 100} = 1,56 \text{ м/год.}$$

Розраховані значення технологічних параметрів процесу ручного електродугового зварювання будуть задаватися в налаштуваннях зварювального інвертора.

3.6. Результати експериментальних досліджень

В роботі досліджувались процеси ручного електродугового зварювання багат шарових та багатопрохідних зварних швів.

Зварювання виконували на постійному струмі прямої полярності штучними покритими електродами з рутиловим покриттям діаметром $d_e = 3$ мм.

Зварювання багат шарового шва між деталями, які імітували стикове з'єднання з розробкою кромки під кутом 55° здійснювали при величині зварювального струму $I_{зв} = 135$ А. Форсування дуги задавалось зі значенням 4.

На рис. 3.5 наведено етапи виконання процесу зварювання багат шарового шва стикового з'єднання, а на рис. 3.6 – послідовність зварювання багатопрохідного шва кутового з'єднання.

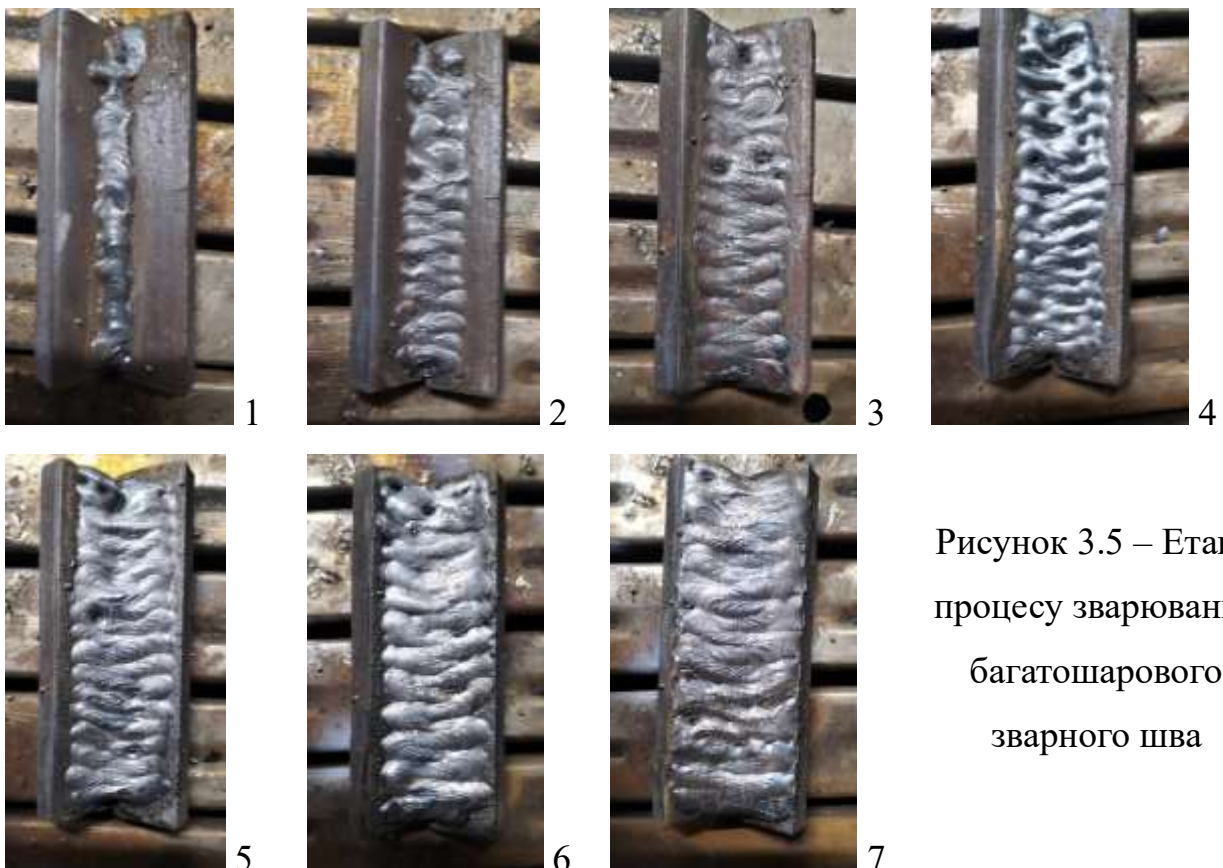


Рисунок 3.5 – Етапи процесу зварювання багат шарового зварного шва

Після виконання кожного проходу валик зварного шва очищали від шлаку за допомогою молотка та металевої щітки.



1



2



3



4



5



6



7



8

Рисунок 3.6 – Етапи процесу зварювання багатопрохідного зварного шва

При необхідності отримати більш рівномірну поверхню багатопрохідного зварного шва останній прохід виконують з перекриттям шляхом здійснення поперечних коливань електрода, як при наплавленні шарів багат шарового шва. Різницю між зовнішнім виглядом багат шарового та багатпрохідного шва з катетами 12 мм можна побачити на рис. 3.7.



а)

б)

Рисунок 3.7 – Багатпрохідний зварний шов

а – з перекриттям; б – без перекриття

Основною проблемою, яка виникає під час зварювання товстостінних деталей багатпрохідними швами, або виконання кутових зварних з'єднань швами з великими катетами є якісне накладання першого кореневого шва. Дана операція вимагає хороших навиків щзварювання, оскільки під час ведення електродами між двома стінками або кромками деталей важко тримати зварювальну дугу чітко на одній відстані між ними. Наслідками цього можуть бути виникнення дефектів зварного шва, таких як незплавлення кромок деталей в кореневій зоні, поява шлакових включень в структурі шва, незплавлювання зварного шва з однією з кромок.

При неточному веденні зварювального електрода може відбуватися глибше проплавлення однієї зі зварних кромок або стінок деталей. Металу у зварювальній ванні не вистачає для повноцінного заповнення утвореної канавки. В процесі виконання зварювання з нахилом електрода чи вертикальним електродом з оплавленням кромок деталей утворення підрізів може

пояснюватися стіканням металу з вертикальної на горизонтальну поверхню деталі.

Одним із способів вирішення даної проблеми є застосування електродів меншого діаметра з одночасним збільшенням зварювального струму або ж форсуванням зварювальної дуги.

Також ще одним видом дефекту може бути виникнення підрізів під час накладання крайніх до поверхні стінок деталей валиків у кутовому чи тавровому з'єднанні. Така ж проблема може виникати під час перекриття багатопрохідного шва останнім перекривним шаром. Утворення підрізів під час зварювання стикових швів без розробки кромок деталей також може бути пов'язане з поганим розтіканням металу.

У більшості багатьох випадках підрізи є наслідком надто високої напруги дуги, а також неточного ведення електрода вздовж осі зварного з'єднання. У першому випадку певна частина канавки на основному металі, виплавлена дугою, не повністю заповнюється металом зварювальної ванни. Якщо ж її ширина буде менша, ніж ширина зварного шва, який здатна сформувати розплавлена кількість металу електрода, то буде утворюватися опуклий зварний шов.

Вирішити цю проблему можна шляхом зменшення зварювального струму, пришвидшення руху електрода на краях перекривного шару або ж збільшення швидкості зварювання. Однак слід пам'ятати, що надмірне зменшення струму призводить до залипання електрода та зашлаковування зварного шва.

Утворення шлакових включень видно неозброєним оком. Крім незадовільного естетичного вигляду шва шлакові частинки заважатимуть роботі під час наплавлення кілька шарів металу, погіршують з'єднання лакофарбового покриття з виробом, не дозволяють достатньо оцінити якість провару, значна кількість шлакових включень унеможлиблює подальшу експлуатацію зварного виробу.

3.7. Оцінка якості багатопрохідних зварних швів

Оцінку якості отриманих в результаті досліджень зразків багатопрохідних зварних швів виконували методами неруйнівного та руйнівного контролів за стандартними методиками.

Після видалення шлакової кірки кожен наплавлений шар чи валик оглядався на предмет виявлення залишків шлаку, пор, підрізів та кратера.

Шлаковими включеннями називаються видимі неозброєним оком залишки шлаків, розташовані у металі на межі сплавлення шва, а також між окремими його шарами чи у вершині провару. Вони утворюються в результаті заповнення нерівномірних ділянок зварювальними шлаками при несучільності шва, які виникають при наявності непроварів або підрізів. При багатопрохідному зварюванні вони можуть проявлятися на дільницях, де було неякісно виконане очищення поверхні попереднього наплавленого шару від шлакової кірки. Рідше шлакові включення утворюються в структурі одношарових швів або окремих шарів багатопрохідних швів. Їх відносять до внутрішніх дефектів шва. Ті ділянки шва, де їх кількість перевищує допустимі технічними умовами норми на даний виріб, вирубують і заварюють заново. При незначній кількості видимих включень шлаків їх допускається виплавляти повторним накладанням зварного шва на вищих зварювальних струмах [14].

Кратером називається заглиблення, яке утворюється після обриву зварювальної дуги в кінці шва. В місці утворення кратера шов має менший переріз. У кратері формуються пори, які в подальшому переходять у тріщини. Довжина кратера може становити 20...200 мм. Під час РДЗ кратер утворюється в кінці ділянки шва, звареної одним електродом. В особливо відповідальних конструкціях метал з кратером видаляють механічним шляхом або виплавляють. Якщо зварювання завершують не на вивідних планках, то кратер шва потрібно заварювати і обривати дугу на завареній дільниці шва. Не допускається виведення кратера на поверхню основного металу, оскільки це призводить до утворення підрізів і опіків.

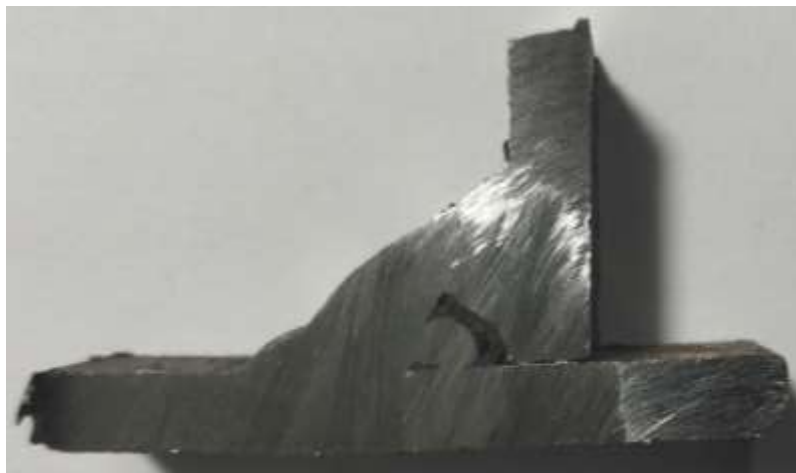
Підрізом називають місцеве зменшення товщини зварюваної деталі на межі сплавлювання з нею шва. Він призводить до значної концентрації напружень. Найбільш часто підрізи виникають під час зварювання кутових і таврових швів, а також перших шарів багат шарових швів. Вони можуть бути двосторонніми або односторонніми. Якщо розміри підрізів перевищують допустимі, їх гостру грань згладжують механічним способом з метою створення плавного переходу від металу шва до основного металу деталі. Якщо глибина підрізу перевищує 1...2 мм, його заварюють швом достатнього перетину. Підрізи в шарах багатопрохідного шва, при накладенні наступних шарів, є внутрішніми дефектами. Вони часто бувають заповнені шлаком.

Нерівномірність ширини шва виникає через різкі коливання напруги дуги або нерівномірної швидкості зварювання. Зміни ширини шва призводить до зміни глибини проплавлення, що призводить до появи непровару.

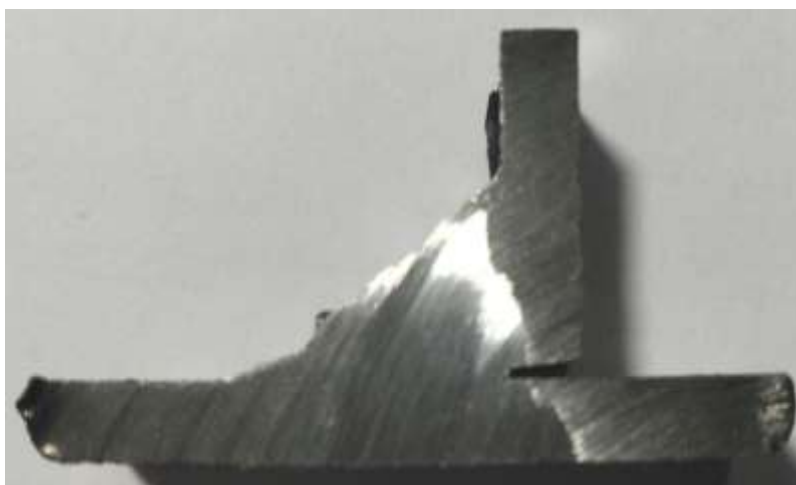
Як показали спостереження та огляд зварних швів, основними дефектами під час зварювання багатопрохідних швів були наявність видимих шлакових включень та підрізи. Перші більше проявлялися під час виконання першого проходу багат шарового та багат шарового зварних швів, а також при веденні електрода вісімою під час виконання чергового проходу багат шарового шва (див. рис. 3.5, позиція 4).

Другий вид дефекту був притаманний зварювання кутового з'єднання багатопрохідним швом деталей товщиною 8 мм при збільшенні зварювального струму понад 150 А.

Для виявлення внутрішніх скритих дефектів швів застосовували руйнівний метод контролю, а саме розрізання шва та його огляд на наявність шлакових включень, пор та зон несплавлення. Зразки зварних швів розрізалися за допомогою абразивного круга в поперечному напрямку через кожні 5 мм. Кожен зразок оглядався на предмет наявності пор, шлакових включень та несплавлень або непроварів. Отримані зразки зачищали, шліфували та оглядали під збільшувальним склом. Приклади зрізів багатопрохідних зварних швів наведено на рис. 3.8 і 3.9.



а)



б)

Рисунок 3.8 – Поперечні розрізи зразка багатопрохідного шва кутового з'єднання з катером 12 мм

а – з шлаковими включеннями; б – якісний шов



Рисунок 3.9 – Поперечні розрізи зразка багат шарового шва стикового з'єднання товщиною 16 мм і кутом обробки кромки 55°

Аналіз розрізів багатопрохідних зварних швів показав наявності в структурі кореневого зварного шва шлакових включень (рис. 3.8, б). Більша кількість таких дефектів спостерігалася в структурі багатопрохідного шва кутового зварного з'єднання, в якому необхідний розмір катета отримували шляхом наплавлення окремих валиків.

3.8. Рекомендації щодо видалення шлакових включень з структури зварного шва

При наявності в структурі кореневого зварного шва шлакових включень є різні способи їх видалення та виправлення шва. Однак найбільш дієвим на наш погляд є збільшення зварювального струму. Так, наприклад, якщо під час зварювання на струмі 80 А шлак не виходить зі шва, залишається в западинах та між несплавленим металом (див рис. 3.10), то необхідно зварювальний струм збільшити на 20...30 А та повторно перекрити кореневий шов. Якщо ж великий катет шва вже є достатньо сформований, то рекомендується переплавити спочатку нижню сторону шва, здійснюючи при цьому коливні рухи електродом «півмісяцем», а потім переплавити верхню частину шва з тими ж рухами. Якщо ширина шва ще не є досить великою, то в такому випадку можна перекривати увесь шов, рухаючи при цьому електродом в поперечному напрямку.

Причиною появи шлакових включень може бути нестійке ведення електрода через низьку кваліфікацію зварювальника, занижене значення зварювального струму що дає холоднішу дугу, через що зварювальна ванна швидко застигає, а шлак не може вийти на поверхню шва. Також шлакові включення можуть утворюватись в структурі шва через забруднення поверхні деталей або наявності на них іржі. Ще одним фактором, який впливає на якість зварювання і може призвести до залишків шлаку в структурі шва є різна швидкість зварювання та довжина дуги. При цьому дуга коливається між горизонтальною і вертикальною стінками деталей, корінь шва прогрівається слабо і шлак може залишатися в ньому.



а)



б)

Рисунок 3.10 – Зашлакований (а) та виправлений (б) зварний шов

Якщо ж необхідно виплавити шлакові включення з вертикальних швів, то методика залишається тією ж. Виплавлювання краще робити електродами з основним або рутиловим покриттям. Рутілові електроди рекомендовані до використання при незначних навичках зварювання. Виплавлювання можна робити точками, або вести електрод півмісяцем із затримкою в місцях накопичення шлаку. В процесі випалювання шлаку слід уважно слідкувати за заповненням місць його накопичення розплавом електродного металу. Виплавляти шлак з вертикальних швів досить легко, оскільки при правильному



Рисунок 3.11 – Схема руху електрода під час виплавлювання шлакових включень

веденні електрода та підібраному струмі рідший шлак буде стікати вниз, а розплавлений метал електрода залишатиметься у шві.

Забивання шва шлаком також може відбуватися під час зварювання на похилих поверхнях кутом вперед. В процесі зварювання розплав шлаку випереджає метал зварювальної ванни і буде відбуватися зашлаковування.

Однак слід пам'ятати, що надмірне збільшення струму може призводити до утворення у шві пор. При збільшенні струму вдвічі метал буде перегрітим, містити бульбашки газів, які залишаються у шві після застигання зварювальної ванни. При надмірному зашлаковуванні шва краще довше затримуватись на місцях його скупчення ніж завищувати зварювальний струм чи максимально форсувати дугу. Крім того, високі значення зварювального струму призводять до утворення підрізів під час зварювання кутових і таврових швів, що також є дефектом.

Оптимальним кутом нахилу електрода під час виправлення зашлакованих зварних швів є кут нахилу 70° . Вести електрод слід кутом назад, при цьому здійснюючи коливні рухи в площині, перпендикулярній осі зварного шва.

Висновки за розділом

Основною проблемою, яка виникає під час зварювання товстостінних деталей багатопрохідними швами є складність забезпечення якісного накладання першого кореневого шва. Дана операція вимагає хороших навиків зварювання, оскільки під час ведення електродами між двома стінками або кромками деталей важко тримати зварювальну дугу чітко на одній відстані між ними. Наслідками цього можуть бути виникнення дефектів зварного шва, таких як незплавлення кромки деталей в кореневій зоні, поява шлакових включень в структурі шва, незплавлення зварного шва з однією з кромки. Ці дефекти усувають переварюванням та виплавленням шлаку при струмі на 20-30 А вищому за струм зварювання. При цьому вести електрод слід кутом назад, здійснюючи коливні рухи в площині, перпендикулярній осі зварного шва.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Загальні вимоги безпеки під час експлуатації зварювальних інверторів

Зварювальний апарат інверторного типу належить до класу переносних зварювальних апаратів з електронними блоками управління процесом зварювання живленням від мережі 1-фазного змінного струму 220 В, на які поширюються вимоги правил безпечної експлуатації електроустановок, правил пожежної безпеки (особливо в зонах з можливими випарами легкозаймистих паливно-мастильних матеріалів (ПММ), газів та наявністю скупчення горючих матеріалів. Перед експлуатацією необхідно уважно ознайомитися з цією Інструкцією з експлуатації і дотримуватися її вимог для запобігання дії виникаючих небезпечних факторів – електричного струму з небезпечною напругою, випромінювання інфрачервоного та ультрафіолетового спектрів, наявності в повітрі робочої зони продуктів окислення мінералів захисних шарів електродів та металів, температури вище 1000 °С з відповідним рівнем пожежонебезпечності (зварювання належить до вогневих робіт), небезпеки висоти при відповідних роботах [11].

Використовувати зварювальний інвертор необхідно виключно за призначенням, згідно вимог цієї Інструкції, з дбайливим ставленням до виробу, своєчасно виконуючи заходи технічного обслуговування.

Під час роботи з інвертором обов'язково необхідно використовувати засоби індивідуального захисту (ЗІЗ): засоби захисту від ураження електричним струмом – діелектричні килимки та рукавички в зонах з підвищеною вологістю; засоби захисту очей – щиток зварника, робочий костюм зварника з важкозаймистих міцних матеріалів (брезент, повсть) в комплекті з взуттям, головним убором, рукавицями; засоби страхування при роботах на висоті – монтажні пояс та каска, надійні риштування. Всі ЗІЗ повинні бути підібрані за розмірами, одяг припасований до тіла без вільних кінцівок. Для зменшення впливу шкідливих речовин в повітрі, зварювальні роботи необхідно проводити на відкритих майданчиках, або за наявності достатнього рівня вентиляції.

Під час експлуатації виробу необхідно виконувати правила пожежної безпеки:

- виконувати вимоги улаштування тимчасових електромереж, запобігаючи випадків появи електричних іскор та підвищення температури на контактах, в проводах, в електроприладах;

- забороняється робота виробу в атмосфері випарів легкозаймистих ПММ та горючих газів;

- до початку зварювання зона вогневих робіт повинна бути відгороджена іскровідбійними екранами, звільнена від горючих матеріалів, або вони повинні бути накриті повстю;

- зона зварювання повинна бути забезпечена відкритою ємністю з водою для можливості охолодження розпечених деталей, поверхонь або гасіння осередків займання. Також повинні використовуватись первинні засоби пожежогасіння – вогнегасники, запас піску з лопатою, покривало з важкозаймистих матеріалів розміром $1 \times 1,5$ м.

Під час експлуатації виробу необхідно виконувати правила безпечної експлуатації електроустановок [11, 15]:

- температура, вологість, концентрація пилу середовища робочої зони повинні відповідати класу виконання захисту виробу;

- забороняється розташовувати електроустановки у звичайному виконанні по вибухонебезпечності в зонах з наявністю в повітрі горючих газів або випарів легкозаймистих речовин (5 м від джерела випарів);

- виріб повинен бути під'єднаним до захисного заземлення;

- щоразу до початку роботи виконувати технічний огляд і перевірку справності агрегатів та деталей виробу відповідно розділу «Підготовка до роботи» цієї Інструкції, експлуатувати несправний виріб забороняється;

- всі операції з підготовки виробу до роботи, технічного обслуговування та ремонту здійснювати з від'єднанням від електромережі шнуром живлення;

- до початку роботи оглянути та звільнити робоче місце, шляхи евакуації від будь яких перешкод;

- не починати роботу з виробом в стані втоми, під дією алкоголю, ліків та продуктів, які можуть погіршити увагу і швидкість реакції;

- невидиме ультрафіолетове випромінювання зварювальної дуги небезпечне для незахищених очей на відстані до 10 м, під час роботи не дозволяти знаходження в небезпечній зоні сторонніх осіб, дітей, тварин;

- під час користування виробом не торкатися мокрими руками до елементів електромережі: розетки, вилки, автомати захисту, тощо. Уникати контактів зварювального контуру з незахищеними частинами тіла;

- не піддавати виріб ударам, перевантаженням (довготривала та інтенсивна робота), не накривати виріб під час роботи та не розташовувати в місцях з недостатнім теплообміном або поряд з нагрівальними приладами;

- не використовувати для роботи виріб з ознаками несправності, помітними зовнішніми пошкодженнями, особливо зварювальних кабелів, електричного шнура та штепсельної вилки;

- забезпечити достатній обмін повітря на робочому місці;

- слідкувати за тим, щоб роз'єми підключення електромережі, електроприладів та рукоятки керування завжди були сухими та чистими;

- підтримувати достатній рівень освітлення на робочому місці;

- ніколи не класти виріб на тимчасові опори;

- не залишати без нагляду виріб, під'єднаний до електромережі;

- після закінчення робіт вимкнути живлення, від'єднати виріб від електромережі, підготувати до зберігання згідно з цією інструкцією та покласти в спеціально приготоване місце. Діти не повинні мати доступ до виробу.

Користувач повинен усвідомлювати небезпеки електричного струму. Електрострум створює на організм людини біологічну, електролітичну та термічну дії. Біологічна дія призводить до порушень клітин організму, що спричиняє судомні скорочення м'язів, порушення нервових функцій, роботи органів дихання і кровообігу. При цьому можуть спостерігатися втрата свідомості, розлад мови. Електролітична дія призводить до електролізу плазми крові та інших рідин тіла, що може привести до порушення їх фізико-хімічного складу і біологічних властивостей. Термічна дія електричного струму

супроводжується опіками окремих ділянок тіла і перегрівом окремих внутрішніх органів, викликаючи в них різні функціональні розлади і ушкодження. Вражаюча дія електричного струму на організм людини залежить від багатьох факторів. Користувач повинен володіти і вміти застосовувати методи оживлення (штучне дихання та непрямий масаж серця) постраждалих від ураження електричним струмом.

Користувач повинен забезпечувати електробезпеку використанням справних складових електромережі [15]:

- ізоляції струмоведучих частин, в тому числі захист від доступу вологи;
- огороження струмоведучих частин доступних для дотику;
- пристроїв захисного блокування, відключення, диференційних реле та подібних;
- подовжувачів електромережі, для роботи поза приміщеннями у вологозахисному виконанні.

Вимоги безпеки під час роботи на висоті:

- роботи на висоті понад 1,5 м можуть виконуватись тільки за умови відсутності медичних протипоказань у працівника;
- до початку робіт на висоті подбати про захист від основних небезпечних факторів – падіння працівника або предметів, для чого обирати надійні опори, засоби підйому, страхування від падіння, одягнути на голову захисну каску;
- роботи на висоті виконувати особливо уважно та обережно.

Під час користування виробом необхідно пам'ятати, що в конструкції використовуються консерваційні і робочі мастильні та інші матеріали, які не можна вважати безпечними для здоров'я при потрапленні в організм. Це стосується і відходів (пил, стружка, дрібні часточки тощо) матеріалів, які оброблюються виробом. Кожен користувач повинен обов'язково виконувати заходи гігієни:

- використовувати рекомендовані в цій інструкції з експлуатації ЗІЗ;
- не припускати контактів виробу з харчовими продуктами;

— після виконання робіт з виробом обов'язково мити руки, по можливості приймати душ із миючими засобами, а сам виріб і робоче місце чистити від бруду та звільняти від відходів.

4.2 Спеціальні вимоги безпеки

Вимоги безпеки до початку роботи з інвертором [13]:

- до самостійної роботи з виробом можуть бути допущені лише особи, які засвоїли вимоги безпеки та правила експлуатації наведені в цій інструкції;
- переконайтеся, що на виробі є заводська маркувальна табличка з основними технічними даними. Якщо маркувальна табличка відсутня, слід звернутися до постачальника. Не використовуйте для роботи виріб без маркувальної таблички;
- потужність і технічні можливості виробу повинні відповідати майбутньому завданню. Не використовуйте у виробничих професійних цілях виріб, призначений для робіт в побуті;
- прийняти заходи забезпечення достатньої вентиляції на робочому місці, пиловідведення та підготувати засоби індивідуального захисту, в першу чергу щиток зварника, одяг зварника та рукавички;
- забезпечити на робочому місці відсутність ПММ, їх випарів, горючих газів, горючих матеріалів (або захистити останні від іскор та крапель розплаву відбійними екранами з негорючих матеріалів. Розліт розжарених крапель металу, в залежності від висоти зварювання, може досягати більше 10 м) та наявність первинних засобів пожежогасіння;
- для роботи встановлювати виріб за допомогою штатних опор на рівній негорючій поверхні в місцях з мінімальним рівнем запилення, доступом повітря для нормальної роботи системи охолодження та в умовах відповідних класу виконання захисту корпусу (виріб захищений від попадання предметів довжиною більше 80 мм, діаметром більше 12 мм та від вертикально падаючих крапель води при непрацюючому виробі);

- виріб має достатній рівень електробезпеки для роботи в нормальних умовах за умови підключення заземлення до корпусних деталей. Для роботи виробу обов'язкове використання електричної мережі з додатковим третім проводом, підключеним до контуру захисного заземлення, відповідно розетка мережі повинна співпадати з конструкцією вилки виробу. Використання виробу без підключеного або з несправним заземленням забороняється;

- при внесенні виробу з холоду в тепле приміщення, необхідно його витримати в тарі не менше 2 годин для видалення конденсату. Після цього виріб можна під'єднати до електромережі;

- за необхідності підключення виробу на вулиці через мережевий подовжувач, – останній повинен бути у вологозахисному виконанні;

- подовжувачі та шнур живлення повинні відповідати потужності виробу і розмотуватися на повну їх довжину;

- перед початком робіт необхідно перевіряти зварювальні кабелі, затискачі на наявність пошкоджень. Пошкоджений інструмент необхідно замінити;

- надійно закріплювати штекери зварювальних кабелів в гніздах виробу.

Вимоги безпеки під час роботи з інвертором:

- забороняється експлуатувати виріб у приміщеннях з вибухонебезпечним, хімічно активним середовищем, яке руйнує метали та ізоляцію;

- під'єднувати виріб до електромережі тільки перед виконанням роботи. При цьому перемикач «Увімк/Вимк» виробу повинен бути у стані «Вимкнено»;

- не використовувати виріб в умовах впливу крапель і бризок, на відкритих майданчиках під

- від'єднувати виріб від електромережі перед перенесенням його з одного робочого місця на інше, при перерві в роботі, після закінчення роботи;

- відключати виріб вимикачем при раптовій зупинці процесу (зникнення напруги в електромережі, перевантаження). У випадках зупинки з причини спрацювання теплового захисту (ізоляція електронних блоків витримує нагрів не більше 155⁰C) – перед відключенням виробу зачекати 1 -2 хвилини для ефективного охолодження за допомогою вмонтованого вентилятору;

- при роботі слідкувати за достатнім рівнем вентиляції робочого місця;

- підпалювати зварювальну дугу тільки захистивши очі і обличчя щитком зварника, а відкриті поверхні шкіри одягом. Не допускати також дії випромінювання відбитого від поверхонь сторонніх предметів – стін, тощо;

- для запобігання пошкоджень, ніколи не тягніть за шнур, щоб вийняти вилку з розетки. Оберігайте шнур від впливу високих температур, мастильних матеріалів та предметів з гострими краями (шнур живлення рекомендується підвішувати);

- використовувати електроди, призначені тільки для даного виду робіт, не використовувати пошкоджені або дефектні електроди;

- роботи підвищеної небезпеки (зварювання на ємностях з під ПММ або токсичних речовин, балонах, в несприятливих умовах, тощо), які не можуть бути виконані в звичайному режимі – потребують попередньої підготовки та розробки відповідних заходів безпеки, наприклад, нейтралізація ємностей водяним паром;

- викиди в повітря на робочому місці можуть містити токсичні речовини, не приймайте їжу, напої, не паліть на робочому місці та не дозволяйте дітям або вагітним жінкам перебувати в робочій зоні;

- під час роботи не докладайте надмірних робочих зусиль на електродотримач;

- працюючи поза приміщенням користуйтеся подовжувачами у вологозахисному виконанні, які призначені для роботи на вулиці;

- працюючи поза приміщенням користуйтеся подовжувачами у вологозахисному виконанні, які призначені для роботи на вулиці;

- особливу увагу приділяйте контролю надійності кріплення зварювальних затискачів, цілісності корпусу та деталей електричного тракту – кабелів, перемикачів, шнура, вилок, розеток;

- не передавати виріб особам, які не мають права користування ним;

- не залишати без нагляду виріб підключений до електромережі;

- не допускати контакту елементів зварювального тракту працюючого виробу з сторонніми предметами;

- слідкувати за напрямком падіння розжарених крапель та іскор. Якщо вони потрапили у порожнини виробу – негайно вимкнути струм і не відновлювати роботу без профілактичного огляду виробу в сервісному центрі;

- електроди не плавити до самого кінця, а заміну їх виконувати після витримки для охолодження зварювального тракту;

- не перевантажувати виріб тривалою роботою з максимальною потужністю;

- використовувати виріб тільки з приладдям і запасними частинами, дозволеними підприємством-виробником. Використання ЗІП від виробника гарантує надійну роботу;

- під час роботи завжди тримати виріб за рукоятки або на штатній опорі;

- не торкатись звареного стику до його повного охолодження;

- за відсутності упевненості в надійності захисного заземлення та в умовах підвищеної вологості використовувати додаткові діелектричні засоби індивідуального захисту – рукавички, килимки, боти;

- забороняється експлуатувати виріб при виникненні під час роботи хоча б однієї з таких несправностей:

- 1) Пошкодження вилки або шнура електроживлення.

- 2) Несправний вимикач або його нечітка робота.

- 3) Корпус виробу перегрівається;

- 4) Поява диму або запаху горілої ізоляції;

- 5) Пошкодження або знос затискачів зварювальних кабелів;

- 6) Поламка або поява тріщин на корпусних деталях, рукоятках.

- 7) Поява струму на металевих елементах пристрою в результаті пошкодження внутрішньої ізоляції та захисного заземлення.

Вимоги безпеки по закінченню роботи:

- перед вимиканням струму вимикачем виробу надати деякий час для ефективного охолодження електронних блоків вмонтованим вентилятором, вимкнути виріб і від'єднати від електромережі, після чого надати час для повного охолодження робочих поверхонь;

- після закінчення роботи виріб має бути очищений від пилу і бруду, при цьому слід використовувати тканину зволожену миючими засобами не агресивними до деталей виробу без виникнення крапель;
- зберігати виріб при температурі від мінус 5 °C до плюс 40 °C з відотною вологістю не більше 80 %;
- при зберіганні виробу у приміщенні необхідно забезпечити нейтральне середовище, яке не руйнує метали та ізоляцію.

4.3. 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 вверх 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 [5].

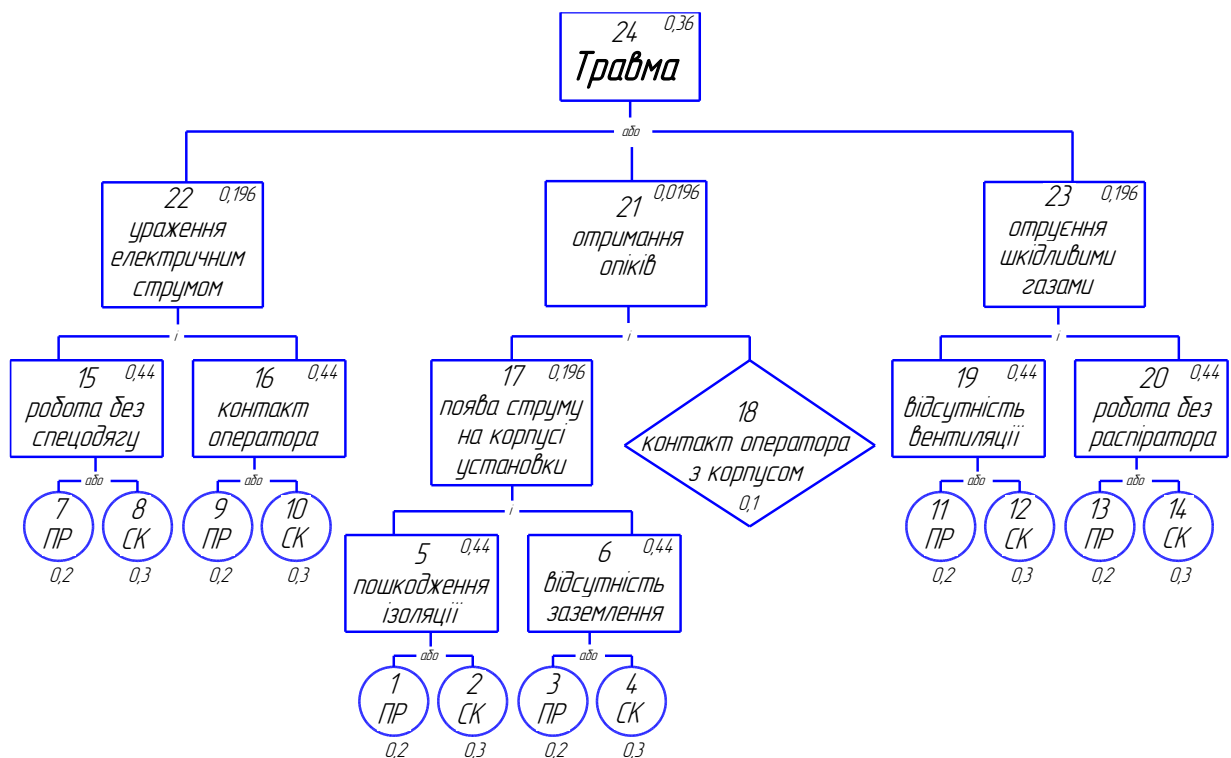


Рисунок 4.1. Модель процесу формування та виникнення травми

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

Ймовірність події P_5 визначаємо наступним чином

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

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

Ймовірність події P_{17}

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

Ймовірність події P_{21}

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

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

Ймовірність події P_{24}

$$\begin{aligned} P_{24} &= P_{21} + P_{22} + P_{23} - P_{21} \cdot P_{22} - P_{21} \cdot P_{23} - P_{22} \cdot P_{23} \\ P_{24} &= 0,0194 + 0,194 + 0,194 - 0,0194 \cdot 0,194 - \\ &\quad - 0,0194 \cdot 0,194 - 0,194 \cdot 0,194 = 0,36 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Таким чином, на робочому місті під час зварювання покритиими електродами апаратом для ручного електродугового зварювання за наявності і можливості виникнення існуючих небезпек та небезпечних діяч на 100 робочих місць ймовірність виникнення травмонебезпечної ситуації становить 0,36 (36 %).

Висновки за розділом

Аналіз загальних та спеціальних вимоги безпеки підчас експлуатації зварювального обладнання, зокрема інверторних джерел живлення для ручного дугового зварювання дозволив визначити основні небезпечні фактори, які впливають на безпеку праці у зварювальному виробництві. Результати аналізу стали вихідною інформацією для моделювання процесу формування і виникнення травмонебезпечної ситуації під час РДЗ.

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

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

Процес ручного електродугового зварювання штучними покритими електродами дозволяє виконувати нерознімні з'єднання деталей і металоконструкцій різної товщини в різних просторових положеннях. Сучасні джерела живлення забезпечують можливість підбору необхідних значень зварювального струму та напруги, полярності зварювання та інших технологічних параметрів. Даний вид зварювання широко використовується під час виготовлення зварних конструкцій з металу великої товщини, зокрема багатопрохідними швами.

Особливістю процесу зварювання деталей багатопрохідними швами є дотримання постійної довжини дуги та чітке положення електрода. Вибір оптимальної схеми накладання шарів шва дозволить отримати суцільне міцне з'єднання без дефектів та з високою продуктивністю процесу.

Основною проблемою, яка виникає під час зварювання товстостінних деталей багатопрохідними швами є складність забезпечення якісного накладання першого кореневого шва. Дана операція вимагає хороших навиків зварювання, оскільки під час ведення електродами між двома стінками або кромками деталей важко тримати зварювальну дугу чітко на одній відстані між ними. Все це може призводити до виникнення дефектів зварного шва, таких як незплавлення кромки деталей в кореневій зоні, поява шлакових включень в структурі шва, незплавлення зварного шва з однією з кромки.

Для зварювання деталей товщиною 8 мм і більше багатопрохідними швами електродом діаметром 3 мм оптимальне значення струму становить 130-140 А. Для проварювання кореневого шва струм зварювання рекомендується збільшувати до 160 А. Це дає можливість краще сплавляти кромки деталей та уникнути зашлаковування шва.

Можливі дефекти швів слід усувати переварюванням та виплавленням шлаку на зварювальному струмі, що на 20-30 А перевищує струм зварювання. При цьому вести електрод слід кутом назад, здійснюючи коливні рухи в площині, перпендикулярній осі зварного шва.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Биковский, О.Г., Пінковський І.В. Довідник зварника. Київ: Техніка, 2002. 336 с.
2. Биковський О. Г. Довідник зварника. Київ: «Основа». 2014. 442 с.
3. Види і техніка виконання зварювальних швів. https://zvarka.info/vidi-i-texnika-vikonannya-zvaryuvalnix-shviv/#google_vignette.
4. Власенко А.М. Основи зварювання. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2007. 106 с.
5. 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.
6. Гуменюк І.В. Іваськів О.В., Гуменюк О.В. Технологія електродугового зварювання: Підручник. Київ: Грамота, 2006. 512 с.
7. Дмитрик В. В., Погрібний М. А., Касьяненко І. В. Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Експериментальні методи у зварюванні». Харків: НТУ «ХП», 2024. 71 с.
8. ДСТУ-Н Б А.3.1-11:2008. Настанова з візуального і вимірювального контролю зварних з'єднань та наплавки металевих конструкцій. Національний стандарт України. Управління, організація і технологія. 2008. 71 с.
9. ДСТУ 3159-95. Ресурсозбереження. Нормування витрат зварювальних матеріалів. Загальні вимоги, методи визначення нормативів ручного і механізованого електрозварювання. Введений з 01.07.1996. Київ: Держстандарт України, 1995. 36 с.
10. ДСТУ EN ISO 18275:2019 Зварювальні матеріали. Електроди для ручного дугового зварювання жароміцних сталей. Класифікація. <https://uscc.ua/dstu-en-iso-182752019-zvaryuvalni-materiali-elektrodi-dlya-ruchnogo-dugovogo-zvaryuvannya-zharomitsnikh-staley-klasifikatsiya>.

11. ДСТУ 2456-94. Зварювання дугове і електрошлакове. Вимоги безпеки. [Чинний від 1995-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1994. 48 с.
12. 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.
13. Зварювальний апарат інверторний TEKHMANN TWI-300 PR. https://tekhmann.com/wp-content/uploads/2019/03/Manual-TWI-300-PR-2021_01.pdf.
14. 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.
15. Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві: Навч. посіб. для практ. робіт з охорони праці для студентів зварювальних спеціальностей. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 181 с.
16. Матвійчук О.А. Техніка виконання зварних швів покритими електродами. <https://rpl.ucoz.com/Navchannay/ZvarnicTehnicaZvarShviv.pdf>.
17. Підгурський М.І., Татарин Б.П., Окіпний І.Б., Сенчишин В.С. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Технологія та устаткування зварювання плавленням». Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2017. 95 с.
18. Савуляк В. І., Осадчук А. Ю. Ручне електродугове зварювання. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2004. 130 с.
19. Татарин Б.П., Береженко Б.М., Сенчишин В.С. Методичні вказівки до практичного заняття №1 з дисципліни «Матеріали для зварювання плавленням, наплавлення і напилення» на тему “Розрахунок і вибір параметрів режиму ручного дугового зварювання покритими електродами”. Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2016. 44 с.

20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

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

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

26. Як зварити багатопрохідний шов. <https://quikol.mirab.v.ua/articles/jak-zvariti-bagatoprohidnij-shov.html>.
27. Alfaro, S.C.A.; Vargas, J.A.R.; De Carvalho, G.C.; De Souza, G.G. Characterization of “humping” in the GTA welding process using infrared images. *J. Mater. Process. Technol.* 2015, 223, 216–224.
28. MANUAL METAL ARC (MMA) “STICK” WELDING. <https://www.weldingandwelder.com>.
29. MMA basics. <https://www.ewm-group.com/en/specialised-knowledge/mma-basics.html>.
30. Jamrozik, W.; Górka, J. Assessing MMA Welding Process Stability Using Machine Vision-Based Arc Features Tracking System. *Sensors* **2021**, 21, 84. <https://dx.doi.org/10.3390/s21010084>.
31. Jamrozik, W.; Górka, J.; Kiel-Jamrozik, M. Detection of slag inclusions in MMA joints with passive thermography techniques. *Diagnostyka* 2020, 21, 111–117.
32. Weman, K. Manual metal arc (MMA) welding with coated electrodes. In *Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining. Technologies*, 2nd ed.; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2012; pp. 99–103.