

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему «Дослідження процесу плавлення покритих електродів для
ручного електродугового зварювання»

Виконав: студент групи Маш-61

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

Євдокімов Сергій Володимирович

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

Дубляни 2024

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
Машинобудування
(назва кафедри)

(підпис)

професор Віталій ВЛАСОВЕЦЬ
(прізвище та ініціали)

“ _____ ” _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу студенту

Євдокімову Сергію Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження процесу плавлення покритих електродів для ручного електродугового зварювання»

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

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

2. Строк подання студентом роботи до 11 грудня 2024 року

3. Вихідні дані до работ: довідкова література, інструкції з експлуатації зварювальних інверторів, каталоги зварювальних покритих електродів для ручного електродугового зварювання, методики оцінки ефективності процесу зварювання та якості зварних з'єднань, інструкції з охорони праці.

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

4.1. Аналіз питання продуктивності зварювання покритими електродами;

4.2. Вплив полярності дуги на продуктивність розплавлення покритих електродів; 4.3. Вплив основних параметрів процесу на продуктивність розплавлення покритих електродів; 4.4. Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу:

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

6. Консультанти розділів роботи

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів роботи | Строк виконання етапів роботи | Відмітка про виконання |
|-------|--|-------------------------------|------------------------|
| 1 | Аналіз питання продуктивності зварювання покритими електродами | 27.09.24 | |
| 2 | Вплив полярності дуги на продуктивність розплавлення покритих електродів | 18.10.24 | |
| 3 | Вплив основних параметрів процесу на продуктивність розплавлення покритих електродів | 08.11.24 | |
| 4 | Охорона праці | 18.11.24 | |
| 5 | Оформлення пояснювальної записки | 29.11.24 | |
| 6 | Оформлення графічної частини | 11.12.24 | |

Студент

_____ (підпис)

Євдокімов С.В.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Швець О.П.

_____ (прізвище та ініціали)

УДК 621.791

Євдокімов С.В. Дослідження процесу плавлення покритих електродів для ручного електродугового зварювання. / Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет природокористування, 2024. 70 с.

Проведено технологічного процесу ручного електродугового зварювання покритими електродами. Досліджено щільність покриттів імпортованих електродів та характер зміни швидкості їх розплавлення електрода за часом на дузі прямої та зворотної полярності. Визначено вплив полярності зварювання на продуктивність розплавлення електродів. Досліджено коефіцієнт пропорційності швидкості розплавлення покритого електрода від часу горіння дуги. Встановлено, що характеристики нерівномірності швидкості розплавлення покритих електродів на мінімальних та максимальних рекомендованих струмах зварювання.

Табл. 27; рис. 17; бібліогр. джерел 21.

ЗМІСТ

| | | |
|-----|--|----|
| | ВСТУП | 6 |
| 1 | ПИТАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ЗВАРЮВАННЯ ПОКРИТИМИ ЕЛЕКТРОДАМИ | 7 |
| 1.1 | Сутність процесу РДЗ | 7 |
| 1.2 | Роль роду струму та його полярності | 11 |
| 1.3 | Формування шва при дуговому зварюванні | 16 |
| 1.4 | Поняття швидкості розплавлення електродів | 19 |
| | Висновки за розділом | 24 |
| 2 | ВПЛИВ ПОЛЯРНОСТІ ДУГИ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ РОЗПЛАВАННЯ ПОКРИТИХ ЕЛЕКТРОДІВ | 25 |
| 2.1 | Методика визначення щільності покриття та приведеної щільності електрода | 25 |
| 2.2 | Методика підготовки дослідних зразків | 27 |
| 2.3 | Опис експериментального обладнання | 30 |
| 2.4 | Дослідження впливу полярності зварювання на швидкість розплавлення покритих електродів | 34 |
| 2.5 | Результати дослідження швидкості розплавлення електродів марок МТГ-01К та 16 W | 44 |
| 2.6 | Дослідження розплавлення електродів МР-3 та МР-3С | 45 |
| | Висновки за розділом | 46 |
| 3 | ВПЛИВ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ РОЗПЛАВАННЯ ПОКРИТИХ ЕЛЕКТРОДІВ | 47 |
| 3.1 | Визначення залежності швидкості розплавлення електрода від струму дуги | 47 |
| 3.2 | Визначення залежності середньої швидкості розплавлення електрода від струму | 50 |

| | | |
|-----|---|----|
| 3.3 | Використання залежностей для середньої швидкості розплавлення для визначення коефіцієнтів | 53 |
| | Висновки за розділом | 55 |
| 4 | ОХОРОНА ПРАЦІ | 56 |
| 4.1 | Загальні вимоги безпеки під час експлуатації зварювальних інверторів | 56 |
| 4.2 | Спеціальні вимоги безпеки | 60 |
| 4.3 | Моделювання процесу формування і виникнення травмонебезпечної ситуації під час зварювання | 64 |
| | ВИСНОВКИ | 67 |
| | БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК | 68 |

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 70%. Тому питання продуктивності та якості зварювання для цього способу мають велике значення.

Відомо, що однією з причин значно нижчої продуктивності РДЗ штучними покритими електродами є використання низької густини струму на електроді, що обумовлено наявністю великого вильоту електрода при зварюванні. Це призводить до необхідності зниження струму дуги, щоб уникнути перегріву покриття та погіршення його властивостей.

Іншою причиною є використання в конструкції електрода покриття, яке забирає в себе частину потужності дуги, знижуючи швидкість його розплавлення. Незважаючи на те, що вивчення процесу РДЗ ведеться досить давно, далеко не всі питання, пов'язані з цим способом вважатимуться вирішеними.

У літературі присутні суперечливі думки щодо залежності продуктивності розплавлення електродів від полярності. Майже не використовується для зварювання дуга прямої полярності, що немає чіткого пояснення. Те ж саме відноситься і до провару основного металу. Немає чітких уявлень про рівень впливу нагрівання електрода у вильоті на продуктивність розплавлення. Недостатні критерії оцінки електродів за товщиною та щільністю покриття. Практично відсутні методи розрахунку продуктивності розплавлення електродів для конкретних умов зварювання: марка електрода, діаметр стрижня, діаметр покриття, струм дуги. Це суттєво ускладнює призначення оптимальних для даних умов режимів РДЗ, ускладнює нормування зварювальних робіт. Тому метою даної роботи є створення передумов для вибору оптимальної полярності дуги та режимів при ручному дуговому зварюванні покритими електродами.

1. ПИТАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ЗВАРЮВАННЯ ПОКРИТИМИ ЕЛЕКТРОДАМИ

1.1. Сутність процесу РДЗ

Незважаючи на широке застосування різних механізованих способів зварювання плавленням, близько 70% зварних конструкцій все ще виготовляються ручним дуговим зварюванням покритими електродами [21]. За кордоном цей спосіб отримав скорочене позначення ММА.

Абревіатура ММА в перекладі означає Manual Metal Arc - ручне дугове зварювання штучними (покритими) електродами.

Для РДЗ потрібно джерело живлення, кабель від джерела до виробу та зварювальний кабель з електродотримачем. Захисний газ не використовується, оскільки покриття в більшості випадків містить матеріали, які утворюють захисний газ та шлак у зоні зварювальної ванни (рис. 1.1).

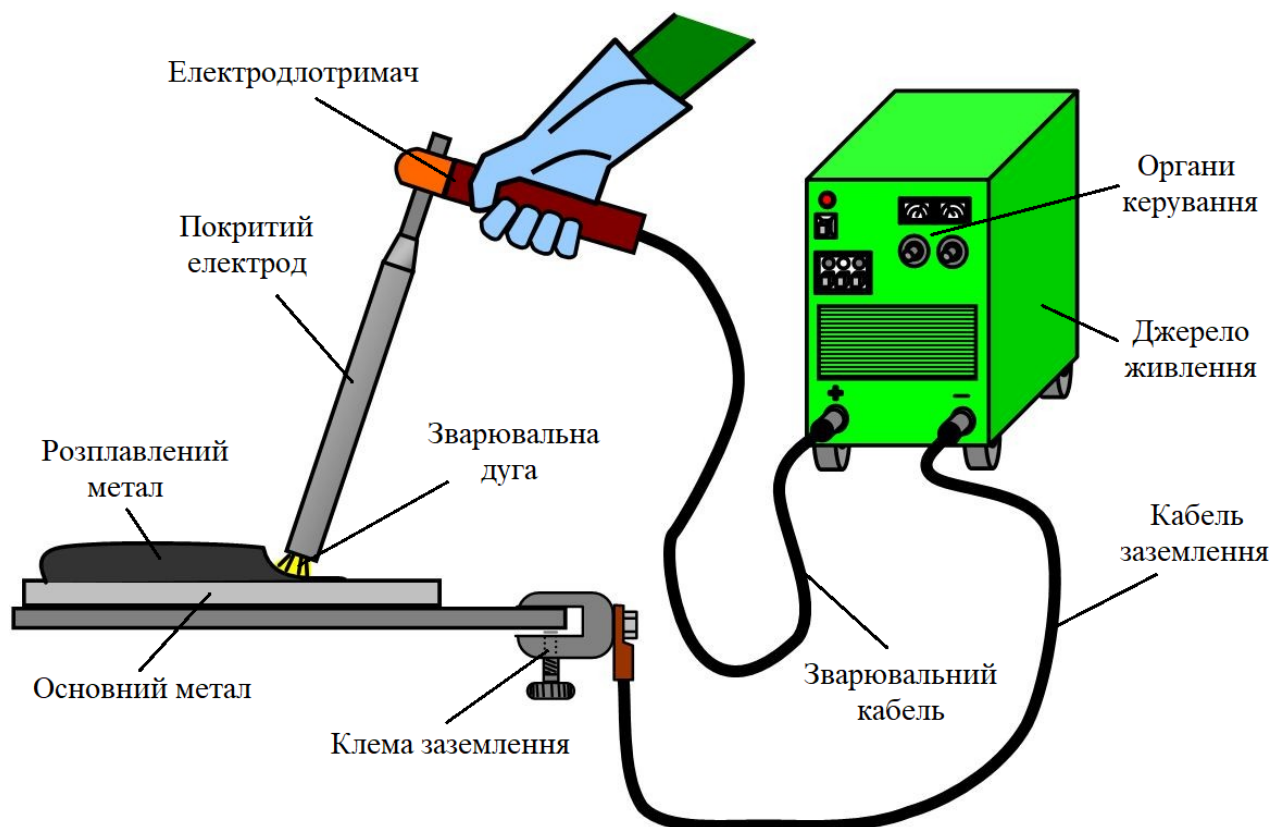


Рисунок 1.1 - Схема процесу ММА-зварювання

Дуга запалюється швидким дотиком торця електрода до поверхні зварюваного металу, який під впливом тепла дуги розплавляється, утворюючи зварювальну ванну. Запалювання дуги відбувається за рахунок утворення при контакт на торці електрода прошарку рідкого металу. При відриві електрода відбувається розрив цього прошарку і виникає потужне електричне поле, за допомогою якого виникає дуга [16].

Висока потужність розігріває кінчик стрижня, покриття та зварювані деталі, що призводить до появи області плавлення. Рідкий метал утворює своєрідну зону – зварювальну ванну. Метал стрижня, що плаває у вигляді окремих крапель, покритих шлаковими утвореннями, надходить у ванну. У ній змішуються метал електрода з металом виробу, а розплавлений шлак покриває поверхню розплаву. Відстань від поверхні деталі, на якій здійснюється плавлення матеріалу виробу, називається "глибина проплавлення" або "провар" (рис.1.2).

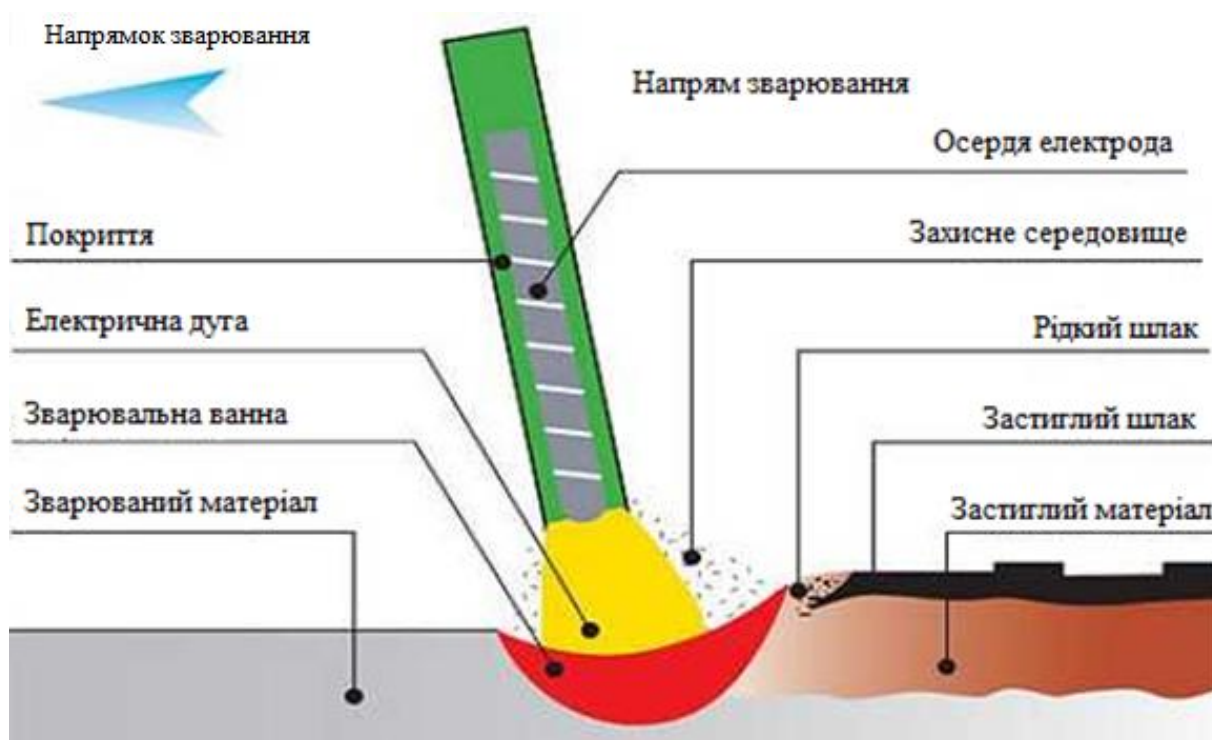


Рисунок 1.2 - Схема ручного дугового зварювання

Розміри зварювальної ванни залежить від режиму зварювання. При утворенні ванни внаслідок дії дуги частка основного металу в ній становить до 35% [14].

Плавлення електрода призводить до розплавлення його покриття, що сприяє утворенню в зоні формування ванни особливого газового режиму. Газу, які утворюються при плавленні покриття, сприяють витісненню повітря і формування захисного газового шару. Цей шар перешкоджає взаємодії розплаву з газами атмосфери. Газова оболонка місця зварювання містить у своєму складі пари розплавлених металів і легуючих елементів.

Виконання ручного електрозварювання передбачає збудження електричної дуги, переміщення електрода в процесі зварювання, визначення порядку накладання швів, який залежить від особливостей зварюваних виробів.

В зварювальних роботах рух електродом здійснюється у трьох напрямках. Перший рух – вздовж осі стрижня електрода. Швидкість руху має відповідати швидкості його плавлення. Другий здійснюється вздовж осі шва та визначає швидкість зварювання виробу. Третій – коливальний рух стрижня впоперек шва. Це переміщення стрижня забезпечує якісне проварювання кромek деталей. Тип поперечних коливань залежить від таких факторів, як форма шва, його розмір та просторове положення.

У процесі здійснення поперечного руху на поверхні шва відбувається утворення валика певної ширини. Тип руху стрижня залежить від фізичних якостей заготовок, які піддаються зварюванню та просторового положення, у якому проводиться робота.

Під час зварювання довжину дуги підтримують по можливості короткою, в межах 2...5 мм. При збільшенні довжини дуги погіршується захист зварювальної ванни від повітря та збільшуються втрати матеріалу стрижня на розбризкування. Стабільність довжини дуги впливає на якість шва і залежить від кваліфікації зварювальника.

При повному розплавленні електрода видаляють шлак у місці закінчення зварювання, щоб уникнути появи у шві шлакових включень. Необхідність частого переривання дуги через розплавлення електрода відноситься до основних недоліків цього способу зварювання.

У процесі плавлення покриття електрода на його торці утворюється невелика втулка, яка сприяє напрямку потоку утвореного газу у бік зварювальної ванни, що сприяє перенесенню крапель розплавленого електродного металу до неї. Потік газу настільки великий, що він здатний переносити краплі знизу вгору, забезпечуючи цим можливість зварювання у стельовому положенні [14].

Металевий стрижень має оголену ділянку довжиною 20...30 мм, яким він кріпиться в електродотримачі. На протилежному кінці стрижня наноситься спеціальне покриття, що полегшує запалювання дуги. Відомо безліч конструкцій електродотримачів, головними вимогами до яких є зручність, можливість швидкої заміни електрода, мала вага.

Марка або фірмова назва електрода вказуються на покритті поруч із оголеною ділянкою. Зазвичай наводиться також позначення класу електродів за класифікацією Американського товариства спеціалістів зі зварювання (AWS).

Діаметр зварювального електрода – це діаметр металевого дроту всередині електрода в мм.

Покриті електроди певного розміру та типу дозволяють виконувати зварювання на різних струмах, але тільки в межах певного вказаного виробником діапазону в залежності від діаметра стрижня, товщини та складу покриття, а також положення зварювання.

Покритий електрод в процесі зварювання поступово коротшає. Відстань від зони підведення струму на електрод до його торця в даний момент горіння дуги називають вильотом електрода. На відміну від механізованих способів дугового зварювання, в ММА є змінною величиною. Поняття вильоту електрода важливе тому, що в ньому відбувається додаткове по відношенню до дуги виділення енергії та підігрів електрода.

До переваг ММА над іншими способами дугового зварювання відносять:

- можливість зварювання у важкодоступних місцях;
- можливість зварювання у різних просторових положеннях;
- мінімальна вартість процесу при зварюванні коротких швів (ремонтне зварювання);

- висока якість наплавленого металу завдяки металургійній обробці шва через шлак та гарний захист зварювальної ванни;

- низька вартість зварювального обладнання.

До недоліків процесу РДЗ відносять:

- низька продуктивність розплавлення електрода, обумовлена використанням низьких щільностей струму на електроді через нагрівання вильоту електрода;

- зниження продуктивності зварювання через необхідність заміни електродів;

- значні відходи електродів;

- високі вимоги до умов зберігання електродів;

- висока стомлюваність зварювальника та вплив його стану на якість шва;

- значна залежність якості шва від кваліфікації зварювальника;

- складнощі отримання якісних швів на тонкому металі;

- великі витрати на підготовку кваліфікованих зварювальників.

До покритих електродів для РДЗ відповідно до стандартами висуваються такі основні вимоги:

- легке запалення та стійке горіння дуги;

- рівномірне розплавлення покриття;

- рівномірне покриття шва шлаком;

- легке видалення шлаку після зварювання, відсутність непроварів, пор та тріщин у металі шва [13].

1.2. Роль роду струму та його полярності

Більшість сучасних зварювальних джерел живлення на виході утворюють постійний зварювальний струм шляхом випрямлення змінного струму. Дуга змінного струму представляє собою дві дуги постійного струму, які чергуються в часі. Тому слід насамперед розглянути будову зварювальної дуги постійного струму. На відміну від металевих провідників полярність підключення для

зварювальної дуги відіграє важливу роль. Це обумовлено будовою зварювальної дуги.

Зварювальна дуга постійного струму може бути прямої або зворотної полярності. При прямій полярності до стрижневого електрода підводиться мінус від джерела живлення. Такий електрод називають катодом. До зварного виробу подають, і він є анодом. При зворотній полярності все відбувається навпаки (рис.1.3) [4].

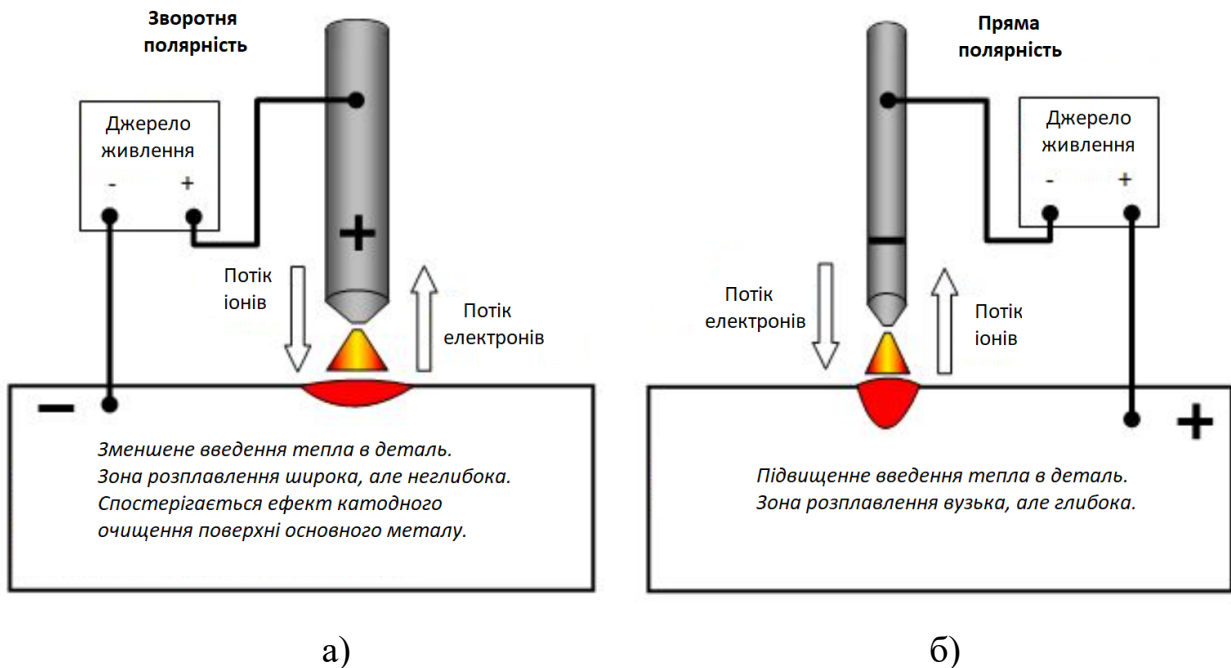


Рисунок 1.3 - Варіанти полярності зварювальної дуги

Дуга складається з трьох областей, які називаються катодною, анодною та стовпом дуги. Поверхні, через які зварювальний струм проходить до виробу і електрода називають катодною та анодною плямою (рис.1.4).

Електрична потужність, яка виділяється у зварювальній дузі, визначається за формулою [2]

$$P = U_d \cdot I_d, \quad (1.1)$$

де U_d - падіння напруги на дузі, В;

I_d - струм дуги, А.

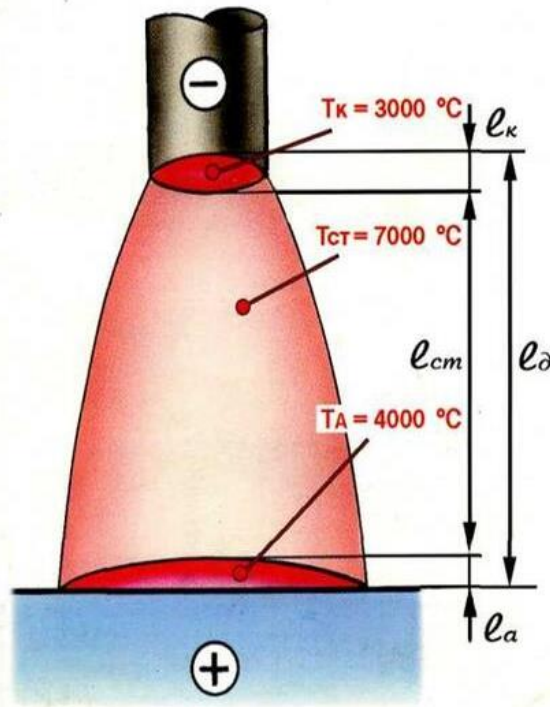


Рисунок 1.4 - Зони зварювальної дуги

Під час РДЗ напруга дуги знаходиться в діапазоні $U_d \approx 20 \dots 30$ В. Струми дуги змінюється в межах $I_d = 40\text{-}500$ А.

Так як дуга складається з трьох областей, то її напругу можна подати у вигляді суми напруг цих зон:

$$U_d = U_a + U_k + U_c, \quad (1.2)$$

де U_a та U_k – падіння напруги відповідно в анодній та катодній зонах, В;

U_c – падіння напруги у стовпі дуги, В.

Падіння напруги у всіх трьох зонах змінюється в межах одного порядку величин (від кількох вольт до 20 В). Однак довжини зон відрізняються досить сильно. Найменшу довжину має катодна область, $\approx 10^{-5}$ см. Довжина анодної Зони приблизно в 10 разів більше за катодну ($\approx 10^{-4}$ см). Звідси й випливає, що катодна та анодна зони мають дуже високу напруженість електричного поля, яка досягає сотень тисяч В/см. Саме це й забезпечує проходження струму в газовому розряді при порівняно низькій температурі цих зон.

Температура в стовпі дуги становить приблизно $6000\text{ }^\circ\text{K}$, а для електродів та матеріалу виробу вона не перевищує $2500\text{ }^\circ\text{K}$. Тому існують «холодні» перехідні області від стовпа до електродів, у яких температура має проміжне

значення. Це і зумовлює високу напруженість електричного поля у приелектродних зонах.

Відповідно до теорії зварювальної дуги [2] потужність, що виділяється в катод зварювальної дуги P_k , можна приблизно визначити за формулою

$$P_k \approx (U_k - U_B) \cdot I_d, \quad (1.3)$$

де U_B – напруга, чисельно рівна роботі виходу електрона з металу катода, В.

Потужність, що виділяється в анод зварювальної дуги P_a , можна приблизно визначити за формулою

$$P_a \approx (U_a + U_B) \cdot I_d, \quad (1.4)$$

При зварюванні плавленням, в тому числі покритим електродом, потужність, яка міститься в краплях електродного металу, переноситься до виробу. Тому потужність, яка вноситься дугою у виріб від приелектродних зон, можна визначити як суму формул (1.3) та (1.4).

$$P_B = P_k + P_a \approx (U_k + U_a) \cdot I_d. \quad (1.5)$$

Певна потужність передається виробу і зі стовпа дуги, наприклад випромінюванням. Однак в основному потужність, що виділяється в стовпі дуги, розсіюється в навколишній простір.

Потужність, яка надається зварювальним джерелом тепла до виробу, називається ефективною потужністю q_i . Відношення ефективної потужності до повної потужності зварювального джерела тепла називають ефективним ККД:

$$\eta_i = q_i / P_i. \quad (1.6)$$

При ММА-зварюванні η_i лежить у межах 0,7...0,8 [16].

Потужність за формулами (1.3) і (1.4) зазвичай неоднакова, тому електрод та виріб плавляться різними потужностями. Саме це показує важливість полярності зварювальної дуги.

Якщо живлення дуги відбувається змінним струмом, то полярність електрода та виробу, а також умови існування дугового розряду періодично змінюються [19]. Так, дуга змінного струму промислової частоти 50 Гц згасає і знову збуджується 100 разів на секунду, або двічі за кожний період. Тому гостро постає питання стійкості горіння дуги змінного струму. Зниження струму

супроводжується відповідним зменшенням температури в стовпі дуги та ступеня іонізації дугового проміжку. При переході струму через нуль та зміні полярності на початку та в кінці кожного напівперіоду дуга гасне. Одночасно падає і температура активних плям на аноді та катоді. Падіння температури дещо відстає по фазі при переході струму через нуль, що пов'язано з тепловою інерційністю процесу. Особливо інтенсивно падає температура активної плями, розташованої на поверхні зварювальної ванни, у зв'язку з інтенсивним відведення теплоти в середину деталі. У наступний після згасання дуги момент змінюється полярність напруги на дуговому проміжку (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 - Форми струму та напруги дуги змінного струму

Одночасно змінюється і напрямок руху заряджених частинок у дугового проміжку. В умовах зниженої температури активних плям та ступеня іонізації в дуговому проміжку повторне запалювання дуги на початку кожного напівперіоду відбувається тільки при підвищеній напрузі між електродами. Таке підвищення називають піком запалювання або напругою повторного запалення дуги. Пік запалення завжди вищий за напругу дуги, що відповідає стабільному режиму її горіння. При цьому величина піку запалення дещо вища в тих випадках, коли катодна пляма знаходиться на основному металі.

Величина піку запалювання суттєво впливає на стійкість горіння дуги змінного струму. Деіонізація та охолодження дугового проміжку зростають зі збільшенням довжини дуги, що призводить до необхідності додаткового

підвищення піку запалення та тягне за собою зниження стійкості дуги. Тому згасання та обрив дуги змінного струму за інших рівних умов завжди відбуваються при меншій її довжині, ніж постійного струму. За наявності в дуговому проміжку парів елементів, які легко-іонізуються, пік запалювання зменшується та стійкість горіння дуга змінного струму підвищується.

Зі збільшенням сили струму фізичні умови горіння дуги покращуються, що також призводить до зниження піку запалення та підвищення стійкості дугового розряду. Таким чином, величина піку запалювання є важливою характеристикою дуги змінного струму і істотно впливає на її стійкість. Чим гірші умови для повторного збудження дуги, тим більшою є різниця між піком запалювання та напругою дуги. Чим вищим є пік запалення, тим вищою має бути напруга холостого ходу джерела живлення.

1.3. Формування шва при дуговому зварюванні

В процесі РДЗ зварювальний шов утворюється шляхом змішування основного та електродного металу (рис 1.6) [5]. Кількісно це змішування оцінюється за допомогою частки основного металу в металі шва:

$$\Psi_o = F_o / (F_o + F_n) = F_o / F_{ш}, \quad (1.7)$$

де F_o – площа поперечного перерізу проплавлення основного металу;

F_n - площа поперечного перерізу додаткового металу;

$F_{ш}$ – площа поперечного перерізу шва.

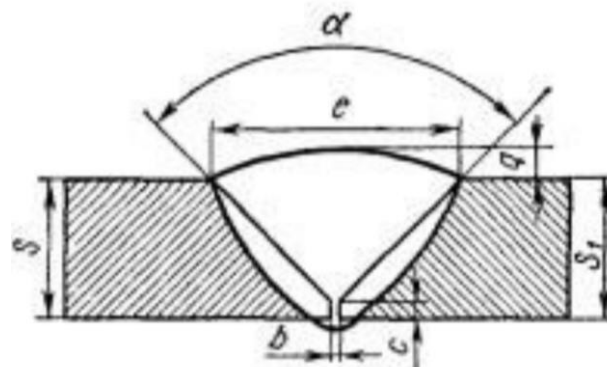


Рисунок 1.6 - Поперечний переріз зварного з'єднання з обробкою кромки

Якщо не враховувати хімічні реакції та вигорання металу під час зварювання, то вміст будь-якого хімічного елемента у шві визначається за формулою [5]:

$$C_e^{\text{ш}} = C_e^{\circ} \Psi_0 + C_e^{\text{Д}} (1 - \Psi_0), \quad (1.8)$$

де C_e° - вміст елемента в основному металі, %;

$C_e^{\text{Д}}$ - вміст елемента у додатковому металі, %.

Формула (1.8) підходить для зварювання в інертних газах. При зварюванні сталей покритими електродами під $C_e^{\text{Д}}$ можна розуміти вміст елемента в так званій «чистій» наплавці. Такий вміст отримують при сертифікації електродів шляхом наплавлення кількох шарів. Метал на аналіз хімічного складу береться з верхніх шарів такого наплавлення. Хімічний склад наплавленого металу даного типу електродів наводиться у стандартах та довідковій літературі [6].

Площа поперечного перерізу наплавленого металу $F_{\text{н}}$ визначається з рівняння збереження маси [5]:

$$F_{\text{н}} \cdot V_{\text{с}} = (1 - \varphi_{\text{п}}) \cdot F_{\text{е}} \cdot V_{\text{е}}, \quad (1.9)$$

де $V_{\text{с}}$ – швидкість зварювання;

$V_{\text{е}}$ – швидкість плавлення електрода;

$F_{\text{е}}$ – площа поперечного перерізу стрижня електрода.

Звідси

$$F_{\text{н}} = (1 - \varphi_{\text{п}}) F_{\text{е}} \cdot V_{\text{е}} / V_{\text{с}}, \quad (1.10)$$

де $\varphi_{\text{п}}$ - коефіцієнт втрат додаткового металу на угар і розбризкування, який при РДЗ становить 0,03...0,1 [13].

Згідно з формулою (1.10) переріз наплавленого металу в стільки разів більший за переріз стрижня, у скільки разів швидкість розплавлення електрода більша за швидкість зварювання (з урахуванням втрат).

Коефіцієнт втрат залежить від складу електрода та його покриття, режиму зварювання та виду зварного з'єднання. Так, наприклад, коефіцієнт втрат зростає зі збільшенням щільності струму та довжини дуги.

Швидкість розплавлення електрода $V_{\text{е}}$ можна визначати за допомогою коефіцієнта розплавлення $\alpha_{\text{р}}$ [19].

Коефіцієнт розплавлення [18] показує продуктивність розплавлення електродного металу на 1 Ампер струму дуги:

$$\alpha_p = M_p / I_d t_d, \text{ г/(А}\cdot\text{год)}. \quad (1.11)$$

де M_p - маса розплавленого електродного металу, г;

t_d - час горіння дуги, год.

Коефіцієнт наплавлення [18] показує продуктивність наплавлення електродного металу на 1 Ампер струму дуги:

$$\alpha_n = M_n / I_d t_d, \quad (1.12)$$

де M_n - маса наплавленого електродного металу, г;

Зазвичай α_p більше за α_n за винятком, електродів, які містять залізний порошок у покритті.

Відносна різниця α_p і α_n представляє коефіцієнт втрат на угар і розбризування φ_b

$$\varphi_b = [(M_p - M_n) / M_p] \cdot 100\%, \quad (1.13)$$

або

$$\varphi_b = 100\% (\alpha_p - \alpha_n) / \alpha_p. \quad (1.14)$$

Маса наплавленого металу у шві визначається за формулою

$$M_n = \rho \cdot F_n \cdot L_{ш}, \quad (1.15)$$

де ρ – густина металу, для сталі 7,8 г/см³; $L_{ш}$ – довжина шва, див.

За допомогою формули 1.15 можна визначити основний час зварювання, необхідне для нормування зварювальних робіт

$$t_d = M_n / I_d \cdot \alpha_n, \text{ год}. \quad (1.16)$$

Для замовлення електродів можна скористатися коефіцієнтом витрати покритих електродів K_b , який дуже часто наводиться у довідниках та змінюється для різних марок електродів в межах 1,6...1,8. [13].

$$M_e = M_n \cdot K_p. \quad (1.17)$$

Тоді формулу 1.11 для коефіцієнта розплавлення можна подати у вигляді:

$$\alpha_p = M_p / I_d \cdot t_d = F_e \cdot L_e \cdot \rho / I_d \cdot t_d = V_e \cdot \rho / j, \quad (1.18)$$

де L_e – довжина розплавленої частини електрода, см;

j - щільність струму на електроді, А/см².

1.4. Поняття швидкості розплавлення електродів

Швидкість розплавлення електрода у спеціальній літературі часто наводять в м/год. Щоб перевести значення в більш зручний для розрахунків вид у см/с потрібно розділити швидкість в м/год на 36.

На основі балансу потужностей у дузі можна скласти рівняння для нагрівання електрода

$$Q_e = U_e \cdot I_d = V_e \cdot F_e \cdot H_e, \quad (1.19)$$

де Q_e - потужність, яка витрачається на розплавлення електрода, Вт;

H_e – тепловміст рідкого електродного металу, Дж/см³.

U_e – еквівалент потужності, яка витрачається на плавлення електродного металу.

Для покритих електродів $H_e \approx 15600$ Дж/см³ [4]. Для розплавлення сталі достатньо 7800 Дж/см³. Таким чином, електрод вдвічі перегрітий порівняно з кількістю тепла, необхідного для його розплавлення, пояснюється тим, що тепло розповсюджується в електроді одновимірно. Зниження H_e – це резерв підвищення продуктивності розплавлення електрода.

За даними, що наводяться в [15] тепловміст крапель електродного металу на прямій та зворотній полярностях відрізняється. На зворотної полярності ентальпія крапель приблизно на 400 Дж вища, ніж на прямій. Аналогічний результат отримано під час аналізу режимів автоматичного зварювання під флюсом дуги з різнополярними імпульсами струму.

Потужність Q_e можна записати як:

$$Q_e = Q_i - Q_{\text{п}}, \quad (1.20)$$

де Q_i - електрична потужність, яка передається стержню, Вт;

$Q_{\text{п}}$ – потужність втрат ена випромінювання з поверхні та випаровування рідкого металу.

Електрична потужність Q_i , складається з 2-х доданків

$$Q_i = Q_{\text{д}} + Q_{\text{в}}, \quad (1.21)$$

де Q_d - електрична потужність, яка передається в електрод від приелектродної зони дуги (катодної або анодної);

Q_v – потужність Джоуля-Ленца, яка виділяється у вильоті електрода.

Величина Q_d - залежить від полярності дуги, Q_v - від полярності дуги майже не залежить. Залежність Q_d від полярності визначається формулами (1.3) та (1.4).

У дузі змінного струму

$$Q_d \approx (U_k + U_a) \cdot I_d / 2, \quad (1.22)$$

Найпростіше визначити потужність від дуги в електрод саме для змінного струму, тому що суму $U_k + U_a$ можна визначити за допомогою досліду короткого замикання.

Формули 1.3, 1.4 та 1.22 пояснюють різницю за продуктивністю розплавлення електрода в залежності від полярності дуги, але не пояснюють різницю у проплавленні основного металу, так як ефективна потужність згідно з формулою (1.5) не залежить від полярності дуги.

Пояснення різниці проплавлення виробу при зварюванні під флюсом залежно від полярності наведено у [10].

Розглянемо докладніше потужність, яка виділяється у вильоті електрода. Ця потужність виділяється відповідно до закону Ома

$$Q_v = I_d^2 \cdot R_v, \quad (1.23)$$

де R_v - опір вильоту, Ом.

У свою чергу

$$R_v = \rho_m \cdot L_v / F_e, \quad (1.24)$$

де L_v – довжина вильоту, см;

ρ_m – питомий електричний опір матеріалу стрижня, Ом/см.

Проблема полягає в тому, що питомий опір металу вильоту ρ_m залежить від температури і визначити R_v дуже непросто.

Відома формула Б.Є. Патона [4], але застосувати її досить складне. Визначення потужності, яка виділяється у вильоті електрода, ускладнюється тим, що відбувається одночасне зменшення опору за рахунок зменшення довжини вильоту. Зміна падіння напруги у вильоті може призводити до зміни струму

ланцюга, що в свою чергу впливає на опір вильоту. В літературі немає даних про втрати потужності з поверхні покритого електрода. Таким чином, теоретичне визначення нагріву вильоту є дуже складним завданням.

Формулу 1.19 можна перетворити, помноживши обидві частини на щільність металу.

$$\alpha_p = U_c / H_c, \quad (1.25)$$

Формула (1.25) показує, що можливості регулювання продуктивності розплавлення електрода невеликі. Потрібно знижувати тепловміст крапель електродного металу та збільшувати вольтовий еквівалент приелектродних зон дуги. Відомо, що регулюванню піддається катодна зона дуги за рахунок нанесення на електрод різних елементів.

Коефіцієнт розплавлення електрода відповідно до видів електричної потужності $Q_i = Q_d + Q_v$, які забезпечують його плавлення, поділяють на дві складові:

$$\alpha_p = \alpha_{рд} + \alpha_{рв}.$$

де $\alpha_{рд}$ - забезпечується за рахунок потужності від приелектродної зони дуги Q_d ,

$\alpha_{рв}$ - забезпечується за рахунок електричної потужності, що виділяється у вильоті.

Перший доданок залежить від полярності струму дуги, другий від полярності майже не залежить.

Ці залежності наводяться для зварювання під флюсом. Для дуги зворотної полярності при зварюванні під флюсом дугова складова $\alpha_{рд}$ не залежить від параметрів дуги: $\alpha_{рд} = 11,6 \pm 0,4$ (г/А·год). Це пояснюється тим, що анодне падіння напруги мало залежить від струму дуги та діаметра електрода.

Виділення енергії у вильоті тонкого електродного дроту при зварюванні CO_2 розглянуто в [10]. Ними встановлено, що приблизно 30 % потужності, яка виділяється у вильоті, втрачається в навколишній простір. Досліди проводилися на покритих електродах та стрижнях для них.

Дані щодо коефіцієнтів розплавлення вітчизняних електродів наводяться іноді в паспортах електродів. Для деяких марок електродів наводиться одне

значення α_p , для інших – діапазон значень. Головне, що відсутні рекомендації щодо вибору α_p залежно від режиму зварювання. Це ускладнює точне нормування зварювальних робіт. Для кожного діаметра електрода наводиться діапазон рекомендованого струму. Відомі формули, які рекомендують вибір струму від діаметра стержня. Однак, вони враховують вплив виду покриття та його товщини, тобто є дуже наближеними.

Зміна вильоту покритого електрода при зварюванні надає способу РДЗ ще одну важливу особливість. Оскільки плавлення електрода відбувається з прискоренням, то вміст електродного металу в шві по його довжині збільшується, а основного – знижується. Відповідно до формули (1.7) це призводить до зміни хімічного складу шва за його довжиною. Отже, має місце підвищена хімічна та структурна неоднорідності металу шва в порівнянні зі способами автоматичного зварювання.

До недоліків РДЗ можна віднести також низьку гнучкість технологічного процесу зварювання. Низька гнучкість властива всім поширеним способам дугової зварювання. Під гнучкістю в даному випадку розуміється складність незалежного регулювання співвідношення основного та наплавленого металу у шві. Основні параметри режиму не дозволяють незалежно регулювати проплавлення основного та розплавлення електродного металів. Так зі збільшенням струму дуги збільшується проплавлення основного металу, але одночасно збільшується й швидкість розплавлення електродного металу. При цьому їхнє співвідношення практично не змінюється, що не дозволяє регулювати хімічний склад шва режимами зварювання.

Коефіцієнт розплавлення значно підвищується з струмом. Менше це відбувається для дуги зворотної полярності, оскільки збільшення викликається підігрівом вильоту. Зі зменшенням діаметра електрода криві розташовуються вище. На основі аналізу залежностей для зворотної полярності можна виділити складову коефіцієнта розплавлення струму від дуги.

Графічно продуктивність представляє площу прямокутника зі сторонами α_p та I_d на графіках $\alpha_p = f(I_d)$ [13]. Звідси випливає, що за однакового струму

продуктивність розплавлення вища для електродів меншого діаметра. Формула для продуктивності розплавлення має вигляд:

$$\Pi = \alpha_p \cdot I_d. \quad (1.26)$$

Так як α збільшується зі струмом, то згідно з формулою (1.26) Π зі збільшенням струму росте з підвищенням. Тому, незважаючи на більш низькі значення α_p , продуктивність розплавлення збільшується зі збільшенням діаметра електрода. Продуктивність розплавлення грає важливу роль при зварюванні з'єднань з обробкою кромки.

Найважливіша роль отримання якісного шва належить покриттю електрода. Останнім часом з'явилися роботи, спрямовані на оцінку показників якості покриття. У роботі [15] пропонується використовувати коефіцієнт умовної щільності покриття $K_{пу}$:

$$K_{пу} = M_{пкр} / (D_2 - d_2), \quad (1.27)$$

де $M_{пкр}$ - маса електродного покриття на стержні,

D - діаметр електрода з покриттям,

d - діаметр стрижня.

Знаменник формули (1.27) характеризує площу покриття. Таким чином, коефіцієнт $K_{пу}$ показує, яка маса покриття припадає на одиницю площі його перерізу. Розмірність цього коефіцієнта $г/см^2$.

Дослідами, які проводилися на зворотній полярності для електродів марки УОНІ13/45А було встановлено, що зі збільшенням струму з 130 до 190 А коефіцієнт розплавлення знижується з 9,08 $г/(А \cdot год)$ до 7,64 $г/(А \cdot год)$, тобто майже на 16%. Автори зробили висновок про недоцільність підвищення продуктивності праці за рахунок збільшення струму. Вони пояснюють такий висновок підвищенням розбризкування металу та погіршенням зовнішнього вигляду шва.

Висновки за розділом

В даному розділі проаналізовано особливості виконання технологічних процесів електродугового зварювання штучними покритими електродами. Розглянуто теоретичні передумови, які описують процес формування зварного шва та вплив роду і полярності струму зварювання на параметри зварювальної електричної дуги.

На підставі проведеного огляду можна сформулювати наступні завдання роботи:

1. Визначити основні характеристики покритих електродів, які застосовуються під час виготовлення металоконструкцій.
2. Дослідити вплив полярності дуги на швидкість розплавлення електродів.
3. Дослідити вплив струму дуги на продуктивність розплавлення електродів.

2. ВПЛИВ ПОЛЯРНОСТІ ДУГИ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ РОЗПЛАВАННЯ ПОКРИТИХ ЕЛЕКТРОДІВ

2.1. Методика визначення щільності покриття та приведеної щільності електрода

Приведена щільність покритого електрода це така щільність, при якій вся маса покриття вважається такою, що входить до складу стержня. Приведена щільність може використовуватися для розрахунку швидкості розплавлення покритого електрода, якщо відома швидкість розплавлення електродного дроту при автоматичному зварюванні під флюсом.

Приведену щільність електрода ρ_e можна визначити за формулою:

$$\rho_e = \rho_{ш} (D^2/de^2 - 1) + \rho_{ст} , \quad (2.1)$$

де $\rho_{ст}$ – густина матеріалу стержня, г/см³,

$\rho_{ш}$ – густина матеріалу покриття, г/см³;

D – діаметр електрода з покриттям, см;

de – діаметр металевого стержня, см.

Щільність покриття $\rho_{ш}$ визначали шляхом зважування маси всього електрода на технічних вагах марки GF-1200 з точністю до 0,01 г та віднімання розрахованої за його довжиною та діаметром маси стержня. При розрахунках приймали густину сталевих стержнів $\rho_{ст} = 7,8$ г/см³.

В процесі досліджень виконували ряд вимірів (рис. 2.1) діаметра електрода з покриттям, діаметра стержня, маси електрода M_e , довжини оголеної частини електрода $L_{ог}$. Довжину електрода $L_{ел}$, приймали за паспортними даними, зазначеним на упаковці електрода. Отримані вихідні дані для досліджених марок електродів, представлені у табл. 2.1.

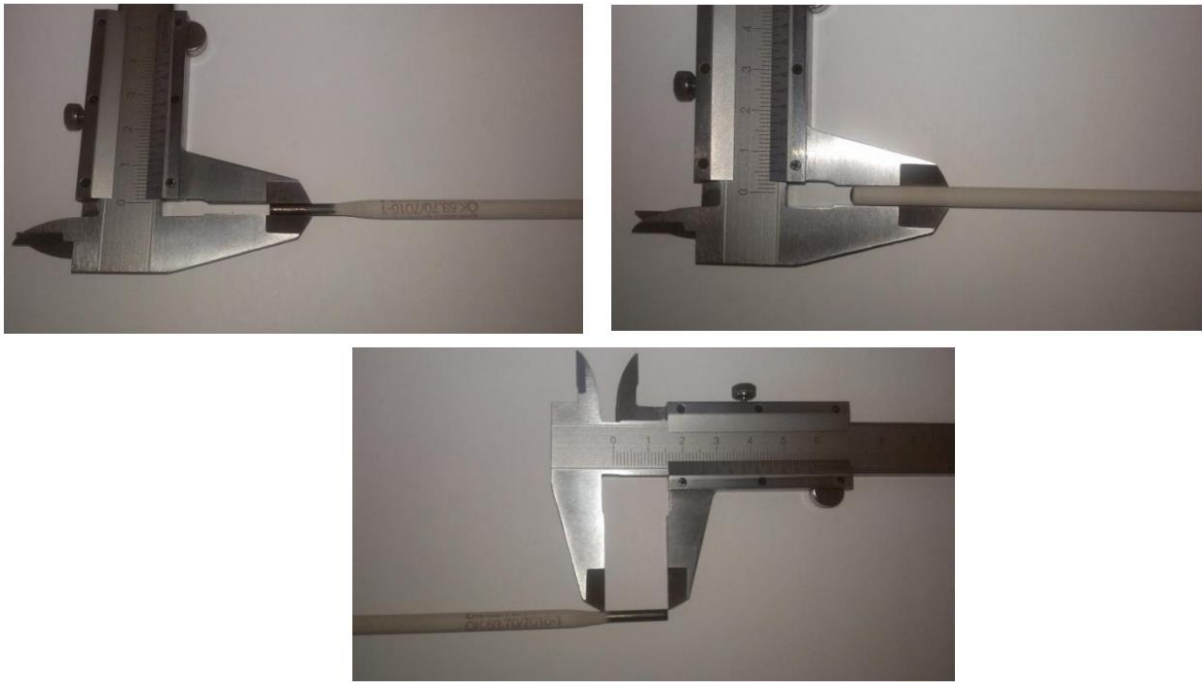


Рисунок 2.1 - Вимірювання розмірів електрода

Таблиця 2.1 - Вихідні дані досліджуваних електродів

| №п/п | Марка електрода | d, мм | D, мм | L _{ел} , мм | L _{огол} , мм | I _{зв} , А | Маса, г |
|------|-----------------|-------|-------|----------------------|------------------------|---------------------|---------|
| 1 | ЛБ 52U | 2,6 | 4,0 | 350 | 21 | 60÷90 | 20,28 |
| 2 | | 3,2 | 5,0 | 350 | 22 | 80÷130 | 30,61 |
| 3 | ОК 53.70 | 3,2 | 5,0 | 350 | 22 | 80÷130 | 30,61 |
| 4 | | 4,0 | 6,0 | 450 | 20 | 115÷190 | 63,10 |
| 5 | ОК 74.70 | 3,2 | 5,0 | 450 | 26 | 80÷140 | 43,18 |
| 6 | | 4,0 | 7,0 | 450 | 20 | 90÷190 | 65,94 |
| 7 | МР-3 | 3,0 | 5,0 | 350 | 12 | 100÷140 | 26,58 |
| 8 | | 2,0 | 3,5 | 250 | 16 | 35÷50 | 9,48 |
| 9 | УОНИ13/55 | 3,0 | 5,0 | 350 | 17 | 80÷100 | 26,64 |
| 10 | МТГ-01К | 3,0 | 5,0 | 350 | 17 | 90÷130 | 28,38 |
| 11 | МТГ-02 | 4,0 | 6,0 | 450 | 19 | 140÷180 | 60,31 |
| 12 | Nittetsu 16W | 2,6 | 4,0 | 350 | 24 | 40÷80 | 20,26 |

Після отримання вихідних даних проводили ряд обчислень, результати яких представлені у табл. 2.2.

Суттєва відмінність у щільності покриття для однієї марки електрода з різним діаметром стержня. Це стосується марок, ОК 53.70, ОК 74.70, МР-3, для яких робили виміри для двох діаметрів. Для марки ЛВ-52U такої відмінності немає. Також спостерігається, що приведена щільність електродів не має такої значної різниці, як щільність покриття. Найменшу щільність покриття отримали

для електродів марки УОНИ13/55 з $d_e = 3$ мм (1,71 г/см³), а найбільшу для електродів марки ОК 74.70 з діаметром $d_e = 3,2$ мм (3,04 г/см³). Різниця щільностей становить близько 80 %.

Таблиця 2.2 - Результати розрахунку щільності покриття та приведеної щільності

| №п/п | Марка електрода | d_e , мм | M_c , г | $M_{п}$, г | $V_{п}$, см ³ | $\rho_{ш}$, г/см ³ | $\rho_{п}$, г/см ³ |
|------|-----------------|------------|-----------|-------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 | LB- 52U | 2,6 | 14,49 | 5,77 | 2,386 | 2,42 | 11,10 |
| 2 | | 3,2 | 21,96 | 8,87 | 3,84 | 2,31 | 11,13 |
| 3 | ОК 53.70 | 3,2 | 21,96 | 8,76 | 3,84 | 2,28 | 11,09 |
| 4 | | 4,0 | 44,09 | 19,03 | 6,72 | 2,83 | 11,34 |
| 5 | ОК 74.70 | 3,2 | 28,23 | 14,96 | 4,92 | 3,04 | 12,18 |
| 6 | | 4,0 | 44,09 | 21,86 | 11,06 | 1,98 | 11,88 |
| 7 | MP-3 | 3,0 | 19,27 | 7,3 | 4,25 | 1,72 | 10,9 |
| 8 | | 2,0 | 6,13 | 3,35 | 1,52 | 2,21 | 12,36 |
| 9 | УОНИ13/55 | 3,0 | 19,27 | 7,37 | 4,3 | 1,71 | 10,84 |
| 10 | МТГ-01К | 3,0 | 19,27 | 9,1 | 4,18 | 2,18 | 11,68 |
| 11 | МТГ-02 | 4,0 | 44,09 | 16,22 | 6,75 | 2,4 | 10,8 |
| 12 | Nittetsu 16W | 2,6 | 14,49 | 5,87 | 2,36 | 2,48 | 11,19 |

Приведена щільність впливає на швидкість розплавлення електродів. Тому можна припустити, що за подібних металургійних складів покриття при зміні діаметра електродів до покриття додають нейтральні речовини, що змінюють щільність покриття, але зберігають приведену щільність.

2.2. Методика підготовки дослідних зразків

На даному етапі нами визначалась відмінність у швидкостях розплавлення електродів марок LB-52U, ОК 53.70 та голого стержня від ОК 53.70 в залежності від полярності дуги.

Методика досліджень полягала у тому, що спочатку вимірювалась довжина розплавленої частини електрода в залежності від часу горіння дуги при наплавленні на пластину і потім за отриманими даними визначали залежність для зміни швидкості розплавлення електродів у часі. Для даної марки електродів певного діаметра проводилися по черзі досліди на постійному струмі прямої полярності та зворотної полярності. При зміні полярності струм дуги не

змінювався. Розмір пластин низьковуглецевої сталі (Ст3пс) для наплавлення становив 150x125x10 мм.

Проведення зварювання виконували з підтриманням стабільної довжини дуги, яка рекомендується для зварювання. Наплавлення виконували з поперечними коливаннями електрода

Досліди проводились на зварювальному апараті INVERTEC V350-PRO фірми Lincoln Electric. За паспортними даними вказаними на упаковці (рис. 2.2), вибирали мінімальний та максимальний рекомендовані струми.



Рисунок 2.2 - Зовнішній вигляд упаковок деяких досліджуваних марок електродів

Час розплавлення ділянки електрода засікали механічним секундоміром марки СОСпр-2б-2-010. Довжину нерозплавленої частини електрода вимірювали металевою вимірювальною лінійкою зі шкалою 1 мм, штангенциркулями – Шц-I-125 та Шц-II-250. Для серії дослідів на марці електродів одного діаметра використовували три електроди. На одному з них покриття повністю розплавляли. На двох інших довжина покритої частини попередньо розмічалася в співвідношенні 1/3 та 2/3 від повної довжини рис. 2.3.



Рисунок 2.3 - Розмітка електродів у співвідношенні $1/3$ та $2/3$ від повної довжини

Ці частини потім розплавлялися з наступним уточненням розплавленої довжини (рис. 2.4, 2.5). Частина електрода, що залишилася при розплавленні використовували для інших дослідів тільки після її повного охолодження до температури приміщення.

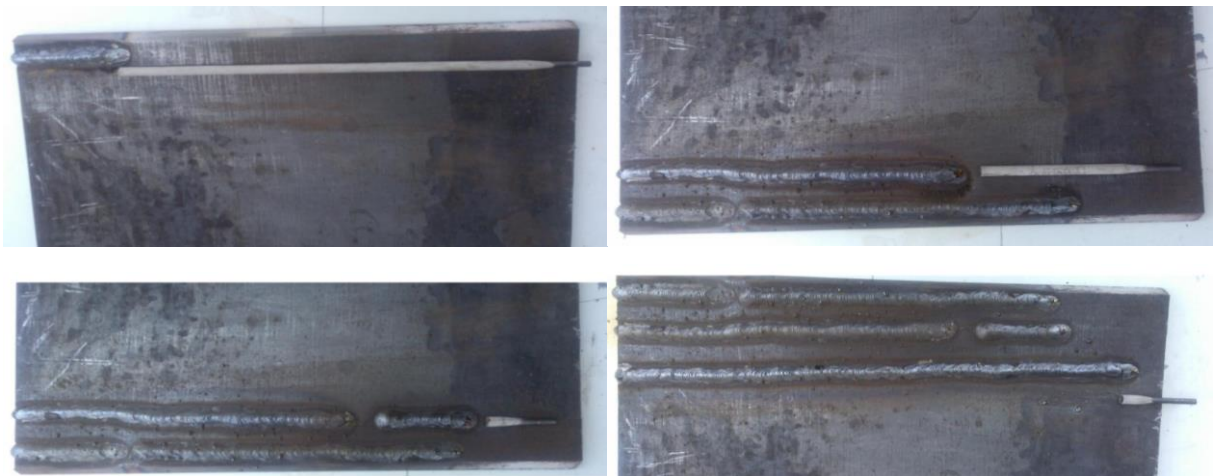


Рисунок 2.4 - Розплавлення електродів частинами у співвідношенні $1/3$ і $2/3$ від повної довжини та цілого електрода.



Рисунок 2.5 - Розплавлення «голих» (оббитих) електродів частинами у співвідношенні 1/3 і 2/3 від повної довжини та цілого електрода

Отримані дослідні дані обробляли за допомогою стандартної комп'ютерної програми, підбираючи коефіцієнти параболічної функції. При цьому разом із значеннями, взятими з дослідів, вводилися нульові значення, оскільки відомо, що в момент $t = 0$, довжина розплавленої частини також дорівнює нулю.

При зміні полярності дуги зварювальний струм не змінювали. Напруга дуги становило в середньому 25 В. Наплавку вели на мінімальних та максимальних струмах, рекомендованих для даної марки електродів.

2.3. Опис експериментального обладнання

Усі досліді проводились з використанням зварювального інвертора Invertec V350 Pro. Зовнішній вигляд джерела живлення подано на рис 2.6.



Рисунок 2.6 - Джерело живлення Invertec V350 Pro

Таблиця 2.3 - Основні технічні характеристики джерела живлення

| Назва | Номер за каталогом | Мережа живлення | Звар. струм / Напруга / ПВ | Діапазон рег. звар. струму | Габаритні розміри ВхШхД (мм) | Вага, (кг) |
|-----------------------|--------------------|--------------------------------------|--|----------------------------------|---------------------------------------|---------------|
| Invertec V-350 Pro | K1728-8 | 200-220/380-400 415-440/1/3/50/60 | 350A/34V/60% (3 ф.) 320A/33V/60% (1 ф.) 300A/32V/100% (3 ф.) 275A/31V/100% (1 ф.) | 5-425A Max. OCV: 80V | 376 x 388x 709 | 37,4 |

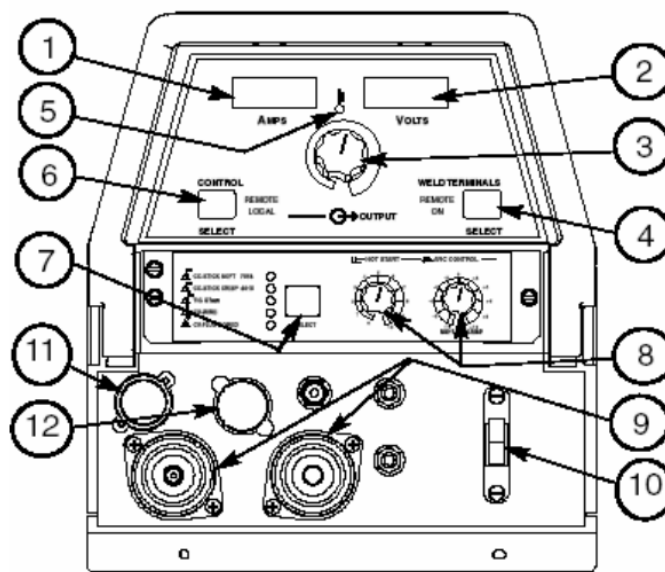


Рисунок 2.7 - Передня панель джерела живлення Invertec V350-PRO

Джерело живлення Invertec V350-PRO нормоване на струм 350 А при ПВ = 60 %. Також апарат забезпечує зварювальний струм 300 А при роботі на ПВ=100%. Базовий цикл при вимірюванні показника ПВ – 10 хвилин.

Розглянемо призначення та функціонування органів управління на верхній панель керування.

1. Цифровий амперметр (“Amps”). Перед початком ручного дугового зварювання штучним електродом або аргонодугового зварювання неплавким електродом цифровий амперметр відображає попередньо встановлену величину зварювального струму з точністю +/- 2 А на струмах до 100 А або +/- 3% на струмах понад 100 А (3 А при 100 А). У процесі зварювання вольтметр

відображає діючу напругу дуги. Після закінчення зварювання вольтметр протягом 5 секунд висвічує останнє значення напруги дуги. При цьому дисплей буде блимати. Перед початком ручного дугового зварювання штучними електродами або аргонодугового зварювання неплавким електродом вольтметр відображає напруга холостого ходу джерела або висвічує лише точки, якщо зварювальні термінали Invertec V350-PRO вимкнено. У процесі зварювання вольтметр відображає діючу напругу дуги. Після закінчення зварювання вольтметр протягом 5 секунд висвічує останнє значення напруги дуги, що діяло. При цьому дисплей буде блимати.

2. Регулятор вихідної потужності (OUTPUT) використовується для регулювання вихідної потужності (зварювального струму або напруги дуги) проводиться за допомогою лише одного потенціометра. Встановлене значення зварювального параметра відображається або на амперметрі, або вольтметрі.

3. Кнопка вибору зварювального процесу (“WELD MODE”) – будівельна та заводська модель (див. рис. 2.7.) Кнопка дозволяє вибрати потрібний зварювальний процес. При цьому джерело формує необхідну для даного процесу вихідну вольтамперну характеристику. За допомогою кнопки можна встановити наступні процеси зварювання:

В режимі ручного дугового зварювання штучним електродом на крутопадаючій характеристиці (“CC-STICK SOFT”) забезпечується плавне регулювання зварювального струму в діапазоні від 5 до 425 А. Дана вольтамперна характеристика застосовується в основному для ручного дугового зварювання електродами з основним видом покриття та дугового стружки вугільним електродом. Дугове стругання вугільним електродом: зварювальний струм регулюється до 425 А. Його величина визначається залежно від діаметра вугільного електрода. Максимальний діаметр вугільного електрода – 5/16” (8,0 мм).

Регулятор “Гарячий старт” (“HOT START”) керує стартовим струмом в момент запалення дуги. Діапазон регулювання стартового струму від “0” – мінімуму (у момент запалення дуги діє встановлена величина зварювального

струму) до “10” – максимуму (у момент запалення дуги діє подвоєна встановлена величина зварювального струму).

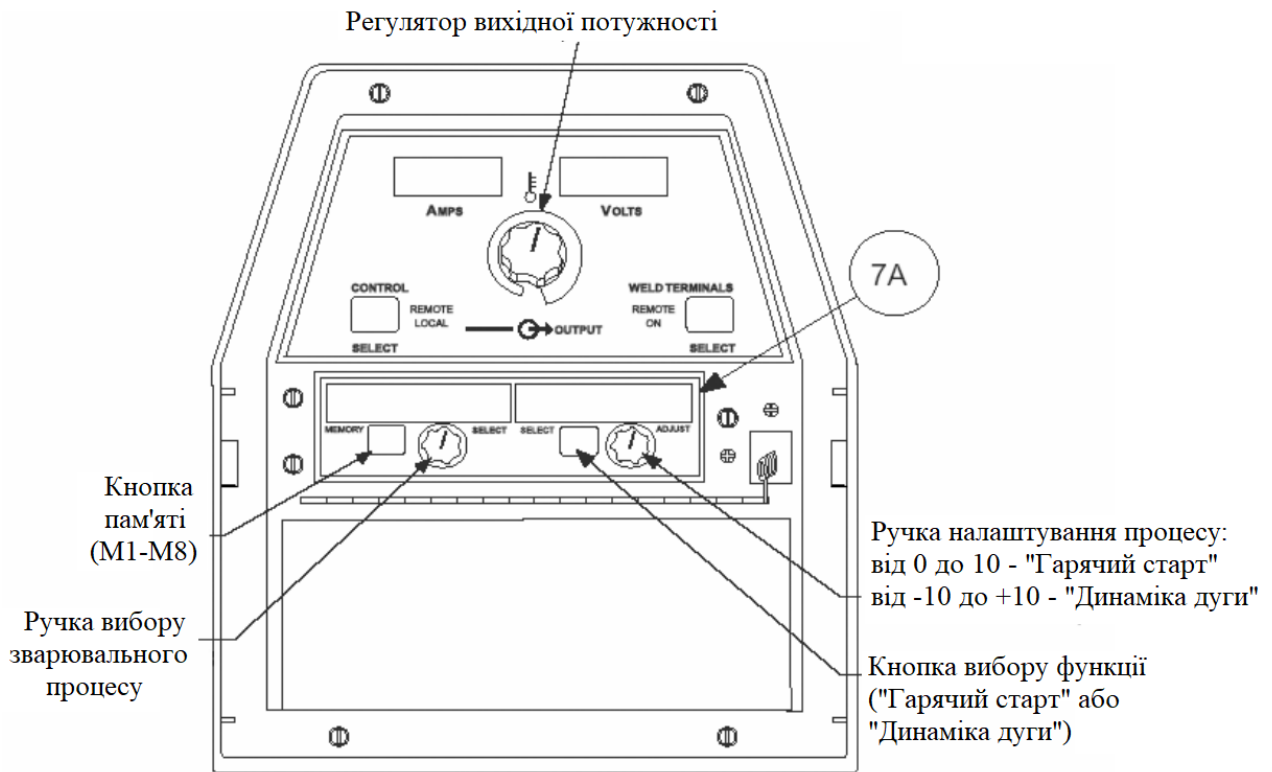


Рисунок 2.8 - Панель спеціальних процесів

Регулятор “Індуктивності вихідного зварювального контуру” (“ARC CONTROL”) керує струмом короткого замикання. При встановленні регулятора в позицію “-10” зварювальна дуга стає більш “м'якою” та знижується рівень розбрикування. Максимальне значення - "+ 10" наводить до "жорсткішої" дуги і дозволяє уникнути залипання електрода.

В режимі ручного дугового зварювання штучним електродом на пологопадаючій характеристиці (“CC-STICK CRISP”) забезпечується плавне регулювання зварювального струму в діапазоні від 5 до 425 А. Дана вольтамперна характеристика рекомендується для ручної роботи дугового зварювання електродом з целюлозним видом покриття та в першу чергу для зварювання трубопроводів.

Регулятор “Гарячий старт” (“HOT START”) керує стартовим струмом момент запалення дуги. Стартовий струм збільшується або зменшується на 25 % від попередньо встановленої величини зварювального струму. При встановленні

регулятора в позицію "5" стартовий струм дорівнює попередньо встановленій величині зварювального струму. У цьому режимі регулятор "Індуктивності вихідного зварювального контуру" ("ARC CONTROL") керує струмом короткого замикання. При встановленні регулятора в позицію "-10" зварювальна дуга стає більш "м'якою" та знижується рівень розбризкування. Максимальне значення - "+ 10" наводить до "жорсткішої" дуги і дозволяє уникнути залипання електрода.

2.4. Дослідження впливу полярності зварювання на швидкість розплавлення покритих електродів

У табл. 2.4 як приклад представлені дані експериментів з одним із типорозмірів електродів однієї марки.

Таблиця 2.4 - Таблиця дослідів для електродів марки МР-3 (d = 3,0 мм)

| Пряма полярність, струм 110 А | | | | | | |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Час, с | 59,12 | 44,11 | 19,5 | 60,6 | 24,33 | 38,52 |
| Лс, см | 31,9 | 23,2 | 8,9 | 31,6 | 11,7 | 19,8 |
| Пряма полярність, струм 140А | | | | | | |
| Час, с | 42,81 | 20,45 | 32,17 | 45,12 | 36,85 | 15,77 |
| Лс, см | 31,5 | 11,9 | 20,2 | 31,8 | 23,1 | 9,1 |
| Зворотня полярність, струм 110 А | | | | | | |
| Час, с | 62,56 | 26,74 | 40,72 | 61,61 | 46,89 | 19,22 |
| Лс, см | 31,7 | 11,6 | 20,2 | 31,5 | 23,0 | 8,9 |
| Зворотня полярність, струм 140 А | | | | | | |
| Час, с | 47,77 | 20,96 | 34,79 | 48,59 | 37,2 | 14,55 |
| Лс, см | 31,4 | 11,4 | 20,3 | 32,2 | 23,0 | 9,0 |

Отримані дані апроксимували за методом найменших квадратів з допомогою комп'ютерної програми та отримували залежність довжини розплавленої ділянки від часу $L_c(t)$ у вигляді

$$L_c(t) = L_0 + B_1 \cdot t + B_2 \cdot t^2, \quad (2.2)$$

де L_0 - довжина згорілої ділянки в початковий момент часу;

B_1 та B_2 – коефіцієнти апроксимації.

Швидкість розплавлення з формули (2.2) можна знайти, взявши похідну DL_c/dt .

Коефіцієнт B_1 характеризує швидкість розплавлення електрода початковий момент часу, а коефіцієнт B_2 - наростання швидкості розплавлення за рахунок підігріву у вильоті.

Дані розрахунків коефіцієнтів за результатами дослідів для електродів LB-52U, ОК 53.70 наведено в табл. 2. 5.

Дані таблиці. 2.5 показують, що початкова швидкість розплавлення на прямій полярності на 10-15% нижче, ніж на зворотній, що відрізняє ручне зварювання від автоматична під флюсом. Причиною такої відмінності, швидше за все, є те, що формули, наведені в [4] для зварювання під флюсом, справедливі для великих струмів, характерних для автоматичного зварювання, а при невеликих струмах ручного зварювання дають інші результати.

Таблиця 2.5 - Результати визначення параметрів розплавлення електродів

| Електроди LB-52U d=3,2 мм | | | | | |
|-----------------------------|------------|-----------------------|--------------|---------------------------|--------------------|
| Струм, А | Полярність | L_0 , см | B_1 , см/с | B_2 , см/с ² | $\Delta L/L_p$, % |
| 140 | зворотня | $5,9 \cdot 10^{-2}$ | 0,50 | $1,78 \cdot 10^{-3}$ | 1,6 |
| | пряма | $6,6 \cdot 10^{-2}$ | 0,44 | $1,54 \cdot 10^{-3}$ | 1,4 |
| 90 | зворотня | $2,8 \cdot 10^{-2}$ | 0,39 | $4,52 \cdot 10^{-4}$ | 1,3 |
| | пряма | $1,54 \cdot 10^{-1}$ | 0,34 | $4,16 \cdot 10^{-4}$ | 3,4 |
| Електроди ОК 53.70 d=3,2 мм | | | | | |
| 130 | зворотня | $1,1 \cdot 10^{-1}$ | 0,43 | $1,9 \cdot 10^{-3}$ | 2,3 |
| | пряма | $8,4 \cdot 10^{-2}$ | 0,40 | $1,48 \cdot 10^{-3}$ | 1,9 |
| 80 | зворотня | $1,36 \cdot 10^{-1}$ | 0,30 | $4,4 \cdot 10^{-4}$ | 2,4 |
| | пряма | $9,4 \cdot 10^{-2}$ | 0,25 | $5,3 \cdot 10^{-4}$ | 2,7 |
| Стержень ОК 53.70 d=3,2 мм | | | | | |
| 130 | обратная | -0,124 | 0,682 | $3,0 \cdot 10^{-4}$ | 3,0 |
| | пряма | $-6,46 \cdot 10^{-2}$ | 0,395 | $4,12 \cdot 10^{-3}$ | 2,9 |
| 80 | зворотня | $-4,9 \cdot 10^{-3}$ | 0,422 | $7,77 \cdot 10^{-4}$ | 1,0 |
| | пряма | $-5,17 \cdot 10^{-2}$ | 0,34 | $3,28 \cdot 10^{-4}$ | 2,05 |

Середнє відхилення у табл. 2.5 розрахункових даних від експериментальних за абсолютною величиною становить 2 %.

Також було виконано порівняння швидкостей розплавлення голого (непокритого) стрижня та покритого електрода (табл. 2.5).

Як і для покритого електрода для стрижня швидкість розплавлення на зворотній полярності вища. Співвідношення початкових швидкостей струму 130 А - 1,73 для струму 80 А - 1,24.

Співвідношення початкових швидкостей для голого та покритого електродів для зворотної полярності 1,59 на струмі 130 А та 1,41 на струмі 80 А.

Для даних, наведених у табл.2.5, розраховували початковий коефіцієнт розплавлення, кінцеву швидкість розплавлення покритої частини електрода, середню швидкість розплавлення покритої частини електрода, середній коефіцієнт розплавлення покритої частини та продуктивність розплавлення. Перелічені характеристик зведено в табл. 2.6

Таблиця 2.6 - Позначення досліджуваних параметрів

| Назва параметра | Позначення параметра |
|---|----------------------|
| Початковий коефіцієнт розплавлення з дослідний, г/(А·год) | $\alpha_{од}$ |
| Початковий коефіцієнт розплавлення розрахунковий, г/(А·год) | $\alpha_{ор}$ |
| Середній коефіцієнт розплавлення, г/(А·год) | α_c |
| Середня швидкість розплавлення, см/с | V_{ec} |
| Кінцева швидкість розплавлення, см/с | $V_{ек}$ |
| Продуктивність розплавлення, г/год | Π |

Для визначення кінцевої швидкості розплавлення інтегрували вираз (2.2), яке дає довжину розплавленої частини та вирішували отримане квадратне рівняння щодо часу. Після цього розраховували середнє значення швидкості розплавлення та середній коефіцієнт розплавлення.

Розрахунковий метод визначення початкової швидкості розплавлення для дуги зворотної полярності полягає в тому, що початковий коефіцієнт розплавлення приймається як для голого електрода при зварюванні під флюсом і зменшується в стільки разів, у скільки приведена щільність електрода більша щільності стрижня. Оскільки відповідно до табл. 2.1, приведена щільність електродів ОК 53.70 діаметром 3,2 мм становить 11,09 г/см³, то початковий коефіцієнт розплавлення буде $\alpha_{op} = 11,6 / (11,09 / 7,8) = 8,16$ А·год).

Для розрахунку $\alpha_{од}$ на зворотній полярності для голого стрижня була використана формула, приведена у [13]. При цьому привертає увагу, що вона дає суттєво відрізняються результати струмі 130 А (розрахункове значення на 28% вище), тоді як на струмі 80 А менше вже розрахункове значення (на 16%).

За даними табл. 2.7 можна дійти невтішного висновку, що методика визначення α_o , не підходить для дуги прямої полярності. Причиною може бути те, що формула для голого дроту, приведена в роботі [13], не діє у сфері малих струмів.

Таблиця 2.7 - Основні параметри електродів відповідно до даних табл. 2.5

| Електроди LB-52U d=3,2 мм | | | | | |
|-----------------------------|------------|---------------|---------------|------------|----------|
| Струм, А | Полярність | $\alpha_{од}$ | α_{op} | α_c | П, г/год |
| 140 | зворотня | 8,12 | 8,13 | 9,62 | 1347 |
| | пряма | 7,14 | 6,48 | 8,60 | 1205 |
| 90 | зворотня | 9,85 | 8,13 | 10,66 | 959 |
| | пряма | 8,59 | 5,7 | 9,4 | 847 |
| Електроди ОК 53.70 d=3,2 мм | | | | | |
| 130 | зворотня | 7,52 | 8,16 | 9,45 | 1228 |
| | пряма | 6,99 | 6,35 | 8,63 | 1122 |
| 80 | зворотня | 8,52 | 8,16 | 9,92 | 794 |
| | пряма | 7,1 | 5,6 | 8,9 | 712 |
| Стержень ОК 53.70 d=3,2 мм | | | | | |
| 130 | зворотня | 11,92 | 11,6 | 12,2 | 1580 |
| | пряма | 6,9 | 9,0 | 10,8 | 1402 |
| 80 | зворотня | 11,99 | 11,6 | 13,85 | 1108 |
| | пряма | 9,66 | 8,0 | 10,8 | 861 |

Для додаткової перевірки отриманих результатів було виконано такі експерименти. Два однакові електроди однієї марки розплавлялися дугою непрямої дії, що горіла з-поміж них (рис. 2.9). Один із електродів закріплювався в штативі горизонтально з підведенням до оголеної частини полюса зварювального джерела живлення. Інший електрод зварювальник подавав за допомогою звичайного електродотримача у напрямку першого у міру його розплавлення.

Горизонтальне розплавлення електродів призводило до того, що краплі електродного металу безперешкодно падали на підкладку із сталевієї пластини. При запаленні дуги вмикався секундомір. При досягненні майже повного розплавлення покриття одного з електродів гасили дугу. Після цього заміряли довжини частини, що розплавилася кожного з електродів. Розрахунком визначали середню швидкість розплавлення кожного електрода, середній коефіцієнт розплавлення та продуктивність розплавлення Π . Досліди проводилися на мінімальному та максимальному рекомендованих для даної марки електроди струмах. Досліди повторювали шляхом перемикання полярності джерела живлення на електродотримачі. Для однієї полярності електрода кожен дослід повторювався двічі.

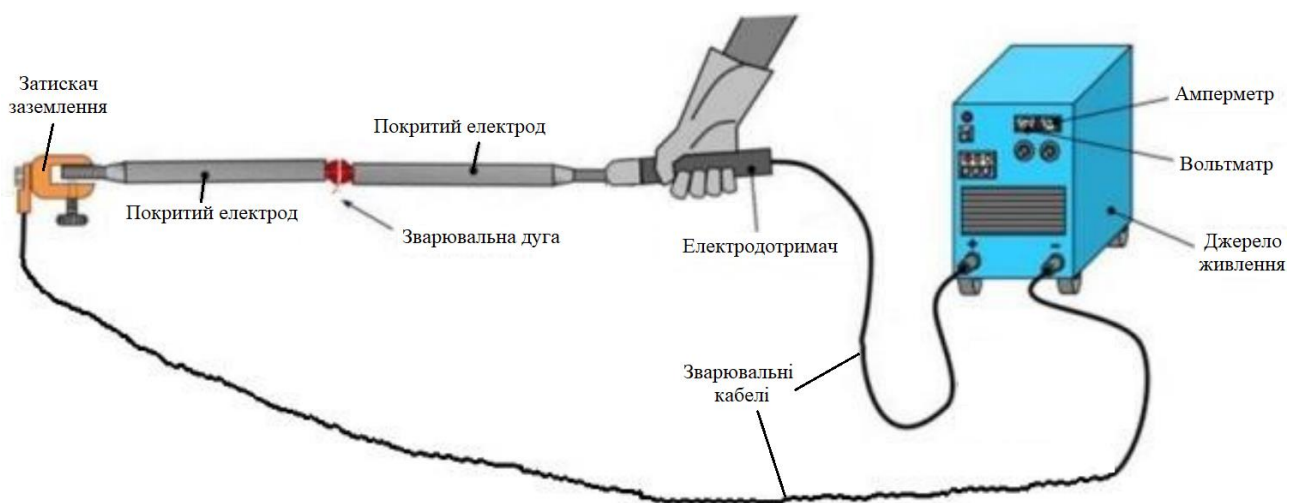


Рисунок 2.9 - Схема досвіду для дуги непрямої на постійному струмі



Рисунок - 2.10. Запалювання та горіння дуги у дослідах із дугою непрямої дії

Візуально відразу було видно, що електрод плавиться швидше, коли він є анодом. Під час проведення дослідів було відзначено деякі особливості горіння дуги в залежності від полюса, підключеного до електродотримача.

Результати дослідів для електродів марки ОК 53.70 наведено у табл. 2.8

Таблиця 2.8 - Форма запису під час виконання дослідів

| Струм дуги, А | Час горіння, с | Довжина згорілої частини, см | |
|---------------|----------------|------------------------------|--------------|
| | | Тримач (+) | Електрод (-) |
| 60 | 70,97 | 30,8 | 28,3 |
| 85 | 54,78 | 30,5 | 28,0 |

Примітка: діаметр електрода $d=2,5$ мм.

По довжині частини, що розплавилася, відразу видно, що швидкість розплавлення при позитивному електроді на обох струмах на 10,8-10,9% більша.

Формула для розрахунку середнього коефіцієнта розплавлення:

$$\alpha_p = 3600 \cdot V_{ec} \cdot \rho / j, \quad (2.3)$$

де V_{ec} - середня швидкість розплавлення електрода, см/с;

j - оільність струму, А/см².

Щільність сталевго стрижня приймалася $\rho = 7,85$ г/см³. Результати розрахунків зведені у табл. 2.9

Таблиця 2.9 - Результати розрахунків з дослідів із дугою непрямої дії

| Ід, А | J, А/см ² | V_{ec} , см/с | | α_p , г/(Агод) | | $\Pi = \alpha_p I_d$, г/год | |
|-------|----------------------|-----------------|-------|-----------------------|------|------------------------------|-----|
| | | Т+ | Е- | Т+ | Е- | Т+ | Е- |
| 60 | 1222 | 0,434 | 0,399 | 10,04 | 9,23 | 602 | 554 |
| 85 | 1731 | 0,557 | 0,511 | 9,09 | 8,34 | 773 | 709 |

Вийшло, що для електродів цієї марки коефіцієнт розплавлення дещо знижується із збільшенням струму від мінімального до максимального.

Відхилення від середнього значення коефіцієнта розплавлення знаходиться в межах 5%.

Аналогічні досліди для електродів ОК 53.70 були проведені діаметром 3,2 мм. Результати досвіду наведені в табл. 2.10.

Таблиця 2.10 - Вихідні дані електродів марки ОК 53.70

| Струм дуги, А | Час горіння, с | Довжина згорілої частини, см | |
|---------------|----------------|------------------------------|--------------|
| | | Тримач (+) | Електрод (-) |
| 80 | 91,37 | 30,3 | 27,8 |
| 130 | 58,30 | 30,1 | 27,9 |

Для даного діаметра електрода також швидкість розплавлення при позитивному електроді на 10,8-10,9% вище, ніж на негативному. Можна припустити, що співвідношення продуктивностей для електродів однієї марки різних діаметрах не змінюється.

За даними табл. 2.10, також були виконані розрахунки, наведені в табл. 2.11.

Таблиця 2.11 - Результати розрахунків з дослідів із дугою непрямої дії для електродів ОК 53.70

| Ід, А | J, А/см ² | V _{ес} , см/с | | α _р , г/(Агод) | | Π= α _р I _д , г/ГОД | |
|-------|----------------------|------------------------|-------|---------------------------|------|--|------|
| | | Т+ | Е- | Т+ | Е- | Т+ | Е- |
| 80 | 995 | 0,332 | 0,304 | 9,43 | 8,63 | 754 | 690 |
| 130 | 1617 | 0,516 | 0,479 | 9,02 | 8,37 | 1172 | 1088 |

Для діаметра 3,2 мм коефіцієнт розплавлення також зменшився з збільшенням струму. Відхилення від середнього значення коефіцієнта розплавлення знаходиться в межах 2,2%, що більш ніж удвічі менше електродів діаметром 2,5 мм.

Серія дослідів з діаметром 3,2 мм була повторена із підключенням електродотримача не тільки до позитивного, а й негативного електрода. Результати дослідів зведені у табл. 2.12.

Таблиця 2.12 - Вихідні дані при підключенні різних полюсів до електродотримача та штатива

| Струм дуги, А | Час горіння, с | Довжина згорілої частини, см | |
|---------------|----------------|------------------------------|--------------|
| | | Тримач (+) | Електрод (-) |
| 80 | 96,92 | 31,7 | 29,2 |
| 130 | 59,96 | 31,9 | 28,8 |
| | | Тримач (-) | Електрод (+) |
| 80 | 98,0 | 27,6 | 31,0 |
| 130 | 60,51 | 29,3 | 31,1 |

При підключенні електродотримача до позитивного полюса співвідношення продуктивностей збереглося як і в попередній серії та становило для двох струмів 10,8-10,9%. При дублюванні дослідів із підключенням електродотримача до негативного полюса ситуація дещо змінилася.

На малому струмі продуктивність негативного електрода менша на 12,3%, а на великому лише на 6,4%. Середнє зниження продуктивності становить 9,4%. Воно практично однаково з дослідом, коли позитивний електрод підключався до електродотримача. Отриману відмінність можна пов'язати з відсутністю у зварювальника навички підтримувати зварювальну дугу при негативний полюс на тримачі. Внаслідок цього стабільність горіння дуги може бути дещо знижена. Тому достовірнішими можна вважати результати, отримані при підключенні електродотримача до позитивний полюс. Для даних табл. 2.12 також було виконано розрахунки (табл. 2.13).

Аналогічні досліді були виконані також для електродів марки LB-52U діаметром 2,6 мм. Площа перерізу електрода у разі становить 5,31 мм².

Таблиця 2.13 - Розрахункові дані щодо табл. 2.12

| Ід, А | J, А/см ² | V _{ес} , см/с | | α _р , г/(Агод) | | Π= α _р I _д , г/год | |
|-------|----------------------|------------------------|-------|---------------------------|------|--|------|
| | | Т+ | Е- | Т+ | Е- | Т+ | Е- |
| 80 | 995 | 0,327 | 0,301 | 9,29 | 8,55 | 743 | 684 |
| 130 | 1617 | 0,532 | 0,480 | 9,30 | 8,39 | 1209 | 1091 |
| | | Т(-) | Е+ | Т(-) | Е+ | Т(-) | Е+ |
| 80 | 995 | 0,282 | 0,316 | 8,0 | 8,98 | 640 | 719 |
| 130 | 1617 | 0,484 | 0,514 | 8,46 | 8,98 | 1100 | 1168 |

Досліди проводилися з підключенням електродотримача як до позитивного, і негативному полюсам джерела живлення. Результати зведені у табл. 2.14.

Таблиця 2.14 - Результати дослідів із дугою непрямої дії для електродів LB-52U

| Струм дуги, А | Час горіння, с | Довжина згорілої частини, см | |
|---------------|----------------|------------------------------|--------------|
| | | Тримач (+) | Електрод (-) |
| 60 | 80,18 | 31,7 | 29,8 |
| 90 | 55,96 | 32,0 | 28,5 |
| | | Тримач (-) | Електрод (+) |
| 60 | 80,32 | 28,6 | 31,3 |
| 90 | 56,69 | 27,8 | 31,6 |

При підключенні електродотримача до позитивного полюса співвідношення продуктивностей збереглося як і для марки ОК складо для двох струмів 104,-11,2%. Середнє значення становить 10,6%. При дублюванні дослідів із підключенням електродотримача до негативного полюс ситуація також дещо змінилася аналогічним чином. На малому струмі продуктивність негативного електрода менше на 10,9%, а на Велика різниця збільшилася до 13,7%. Середнє зниження продуктивності складає 12,3%. Середня відмінність продуктивності дещо вища, ніж при підключення електродотримача до позитивного полюса

Для даних табл. 2.14 також були виконані розрахунки (табл. 2.15).

Таблиця 2.15 – Розрахункові дані щодо табл. 2.14

| Ід, А | J, А/см ² | V _{ес} , см/с | | α _р , г/(А·год) | | Π= α _р I _д , г/год | |
|-------|----------------------|------------------------|-------|----------------------------|------|--|-----|
| | | Т+ | Е- | Т+ | Е- | Т+ | Е- |
| 60 | 1130 | 0,395 | 0,372 | 9,89 | 9,3 | 593 | 558 |
| 90 | 1695 | 0,572 | 0,509 | 9,53 | 8,49 | 858 | 764 |
| | | Т(-) | Е+ | Т(-) | Е+ | Т(-) | Е+ |
| 60 | 1130 | 0,356 | 0,39 | 8,9 | 9,75 | 534 | 585 |
| 90 | 1695 | 0,49 | 0,557 | 8,19 | 9,29 | 737 | 836 |

У цих дослідах також спостерігається деяке зниження коефіцієнта розплавлення зі збільшенням струму дуги для будь-якого полюса на електроді. Тому продуктивність розплавлення відстає від зростання струму.

Загалом підбиваючи підсумки визначення впливу полярності на продуктивність розплавлення електродів можна помітити, що результати непрямого виміру шляхом визначення коефіцієнтів у рівнянні та прямих дослідів з дугою непрямої дії збігаються досить добре.

Розглянемо формули для коефіцієнтів розплавлення електродів під час зварювання під флюсом, наведені в [10] та оцінимо можливість їх застосування для ручного зварювання покритими електродами. Для прямої полярності та нульового вильоту електрода формула має вигляд:

$$\alpha_p^0 = 6,3 + (70,2 \cdot 10^{-3}/d_e^{1,035}) I_d. \quad (2.4)$$

У цій формулі діаметр електрода d_e береться в мм, струм дуги в А.

Для дуги під флюсом зворотної полярності $\alpha_p^0 = 116 \pm 04$ г/(А·год). Прирівнявши значення α_p^0 для прямої та зворотної полярності, отримаємо значення струму, при якому коефіцієнти розплавлення однакові.

$$I_d = 75,5 \cdot d_e^{1,035}. \quad (2.5)$$

Розмір такого струму майже пропорційна діаметру електрода. При струмах більше, ніж отримані за формулою (2.5), продуктивність розплавлення буде більше на прямій полярності дуги. При струмі 600 А та діаметрі електрода 4 мм матимемо для прямої полярності 16,43 г/(А·год). Граничне значення струму 317 А. Формула справедлива і для голого електродного дроту. Для діаметра електрода 2,6 мм граничне значення струму 203 А, а діаметру 3,2 мм – 252 А.

При використанні формули для покритих електродів граничне значення струмів потрібно знижувати в стільки разів, скільки приведена щільність електрода більше щільності стержня. Відповідно до табл. 2.2 маємо наведену щільність для електродів ОК 53.70 11,9 г/см³ для електродів LB-52U 11,1 г/см³. Тому для електродів ОК діаметром 3,2 мм критичне значення струму

$$7,85 \cdot 252 / 11,1 = 178 \text{ А.}$$

Це набагато більше максимального рекомендованого струму для електродів. Тому закономірно, що продуктивність розплавлення покритих електродів цієї марки менше на прямій полярності дуги.

Для електродів марки LB-52U аналогічно критичний струм діаметром 2,6 мм 143 А також набагато більший за рекомендований максимальний струм 90 А. Тому формулою (2.4) не слід користуватися для визначення початкової швидкості розплавлення покритих електродів для прямої полярності дуги. У табл. 2.7 такі розрахункові дані виділено курсивом.

2.5. Результати дослідження швидкості розплавлення електродів марок МТГ-01К та 16 W

Діаметр сержня електродів МТГ-01К становив 3,0 мм, а електродів 16 W – 2,6мм. Результати визначення параметрів розплавлення цих покритих електродів представлені у табл. 2. 16.

Таблиця 2.16 - Коефіцієнти формули 2.1

| Електроди МТГ-01К d=3,0мм | | | | | |
|---------------------------|------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------------|
| Ток, А | Полярність | L ₀ , см | V ₁ , см/с | V ₂ , см/с ² | ΔL/L _p , % |
| 130 | зворотня | 2,5·10 ⁻² | 0,444 | 1,8·10 ⁻³ | 2,65 |
| | пряма | 5,0·10 ⁻² | 0,378 | 3,33·10 ⁻³ | 1,35 |
| 90 | зворотня | -1,0·10 ⁻² | 0,357 | 2,84·10 ⁻⁴ | 1,2 |
| | пряма | 1,19·10 ⁻¹ | 0,279 | 8,73·10 ⁻⁴ | 6,5 |

Продовження таблиці 2.16

| Електроди 16 W d=2,6 мм | | | | | |
|-------------------------|----------|----------------------|-------|----------------------|-----|
| 100 | зворотня | $-3,7 \cdot 10^{-2}$ | 0,372 | $2,78 \cdot 10^{-3}$ | 6,1 |
| | пряма | $2,3 \cdot 10^{-2}$ | 0,529 | $2,12 \cdot 10^{-3}$ | 0,5 |
| 50 | зворотня | $1,17 \cdot 10^{-1}$ | 0,263 | $1,02 \cdot 10^{-4}$ | 6,0 |
| | пряма | $4,1 \cdot 10^{-2}$ | 0,287 | $1,73 \cdot 10^{-4}$ | 1,2 |

Загалом результати по електродах марок МТГ-01К та 16 W аналогічні до результатів електродів LB=52U і ОК 53.70. Дещо підвищені відхилення розрахункової довжини від дослідних значень, які досягають до 6% слід віднести до недостатньої акуратності зварювальника. У цих випадках маємо високі значення та коефіцієнта L_0 , що перевищує 1 мм. Водночас така похибка при довжині покриття 328 мм цілком допустима.

2.6. Дослідження розплавлення електродів МР-3 та МР-3С

Незважаючи на те, що електроди марок МР-3 та МР-3С не рекомендовані для зварювання відповідальних конструкцій, їх дослідження цікавить у зв'язку з великим обсягом робіт, що виконуються ними в інших галузях. Також представляє інтерес, наскільки марка МР-3С, яка з'явилася останніми роками, близька за своїми характеристиками до марки МР-3.

Таблиця 2.17 - Результати визначення параметрів розплавлення покритих електродів

| Електроди МР-3 d=3,0 мм | | | | | |
|-------------------------|------------|----------------------|--------------|---------------------------|--------------------|
| Ток, А | Полярність | L_0 , см | V_1 , см/с | V_2 , см/с ² | $\Delta L/L_p$, % |
| 100 | зворотня | $3,64 \cdot 10^{-2}$ | 0,437 | $3,38 \cdot 10^{-4}$ | 2,7 |
| | пряма | $1,73 \cdot 10^{-2}$ | 0,406 | $1,388 \cdot 10^{-3}$ | 1,2 |
| 140 | зворотня | 0,125 | 0,517 | $2,805 \cdot 10^{-3}$ | 2,3 |
| | пряма | $8 \cdot 10^{-2}$ | 0,478 | $4,528 \cdot 10^{-3}$ | 1,9 |

Продовження таблиці 2.17

| Електроди МР-3С d=3,0 мм | | | | | |
|--------------------------|----------|-----------------------|-------|-----------------------|-----|
| 100 | зворотня | $8,92 \cdot 10^{-4}$ | 0,479 | $-5,34 \cdot 10^{-5}$ | 3,8 |
| | пряма | $-4,69 \cdot 10^{-2}$ | 0,556 | $4,83 \cdot 10^{-4}$ | 2,3 |
| 140 | зворотня | $-3,82 \cdot 10^{-2}$ | 0,61 | $1,02 \cdot 10^{-3}$ | 3,1 |
| | пряма | $6,17 \cdot 10^{-3}$ | 0,777 | $9,45 \cdot 10^{-4}$ | 1,9 |

Електроди марки МР-3С мають діаметр електрода з покриттям 4 мм на відміну від діаметра 5 мм для електродів МР-3. Очевидно, цим пояснюється, що швидкість розплавлення електродів марки МР -3С вище, ніж у МР-3. У електродів МР-3, як і в електродів ОК 53.70 і LB-52U, швидкість розплавлення на зворотній полярності вища, ніж на прямій. У електродів МР-3С залежність протилежна.

Висновки за розділом

Щільність покриттів імпортованих електродів однієї марки може мати значний розкид залежно від відношення D/d_e . Щільність електрода загалом, приведена до об'єму стержня, при цьому практично постійна.

Лінійний характер зростання швидкості розплавлення електрода за часом підтверджений для ряду марок імпортованих та вітчизняних електродів не тільки для дуги зворотної полярності, а й для дуги прямої полярності, а також для голого стержня електрода.

Розроблена методика дослідів із розплавленням електродів дугою непрямої дії дозволяє достовірно та просто визначати співвідношення швидкостей розплавлення електродів залежно від полярності дуги.

Продуктивність розплавлення електродів на прямій полярності дуги на 10-15% нижче продуктивності на зворотній полярності для більшості марок електродів.

Для прямої полярності визначення початкової швидкості розплавлення вимагає уточнення відомої формули у сфері малих струмів.

3 ВПЛИВ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ РОЗПЛАВАННЯ ПОКРИТИХ ЕЛЕКТРОДІВ

3.1. Визначення залежності швидкості розплавлення електрода від струму дуги

У [4, 15] встановлено, що швидкість розплавлення електрода пов'язана з часом горіння дуги лінійною залежністю. Коефіцієнт пропорційності для даної марки електрода залежить від діаметра стрижня і струму дуги. Найцікавіше визначення виду залежності швидкості розплавлення від струму дуги. Представляли залежність коефіцієнта пропорційності у вигляді статечної функції:

$$V(t) = V_0 + A \cdot I^M \cdot t. \quad (3.1)$$

Оскільки відомі граничні рекомендовані паспортом струми на електроди, то можна записати систему рівнянь:

$$V_1 - V_{01} = A \cdot I_1^M \cdot t_1, \quad (3.2)$$

$$V_2 - V_{02} = A \cdot I_2^M \cdot t_2, \quad (3.3)$$

де t_1, t_2 – час розплавлення покриття електрода в 1-му та 2-му досліді;

V_1, V_2 – максимальні швидкості розплавлення електрода наприкінці розплавлення покриття для струмів I_1 та I_2 відповідно.

I_2 - це максимально допустимий струм для повної довжини електрода;

I_1 – мінімальний струм, рекомендований паспортом на електроди.

Склавши відношення виразів (3.2) і (3.3), отримаємо значення показника ступеня M . Потім з будь-якого рівняння (3.2,3.3) розраховується коефіцієнт A .

Після цього можна скласти рівняння для відшукування необхідної швидкості розплавлення в кінці розплавлення будь-якої довжини покритої частини електрода без перегріву покриття. У табл. 3.1 наведено вихідні дані та розрахункові значення коефіцієнтів для електродів марок LB-52U та ОК 53.70.

Таблиця 3.1 - Розрахунок коефіцієнтів М та А для формули (3.1)

| Струм, А | V_o , см/с | V_k , см/с | $\alpha_{po}, \Gamma/(Ac)$ | t, с | М | А |
|-------------------|--------------|--------------|----------------------------|------|-------|----------------------|
| LB-52U, d=3,2 мм | | | | | | |
| 140 | 0,50 | 0,70 | $2,2 \cdot 10^{-3}$ | 55 | 2,835 | $2,99 \cdot 10^{-9}$ |
| 90 | 0,39 | 0,47 | $2,7 \cdot 10^{-3}$ | 77 | | |
| OK 53.70 d=3,2 мм | | | | | | |
| 130 | 0,43 | 0,67 | $2,07 \cdot 10^{-3}$ | 60,2 | 2,786 | $5,15 \cdot 10^{-9}$ |
| 80 | 0,29 | 0,39 | $2,39 \cdot 10^{-3}$ | 97,0 | | |

Значення показника ступеня виявилися досить близькими, а коефіцієнт пропорційності суттєво залежить від марки електрода. Середнє значення показника ступеня за даними двох марок електродів однакового діаметра $M = 2,8105$. Помилка при використанні середнього значення показника ступеня M становитиме при струмі 90 А близько 10%, що небажано. Тому для кожної марки електрода коефіцієнти формули (3.1) слід визначати окремо.

Запропоновану методику використовували для розрахунку допустимого значення струму, який не викликає перегріву покриття електрода під час розплавлення половини довжини покриття. Виходили з того, що в цьому випадку максимальна швидкість розплавлення повинна дорівнювати швидкості розплавлення в кінці плавлення цілого електрода на максимально допустимому струмі.

$$V_3 = V_2 = V_{o3} + A \cdot I_3^M \cdot t_3, \quad (3.4)$$

де V_{o3} - початкова швидкість розплавлення при шуканому струмі дуги;

I_3 – шуканий струм дуги для розплавлення половини довжини покриття, А;

t_3 - шуканий час розплавлення половини довжини покриття, с.

Початкова швидкість розплавлення V_{o3} , як і будь-яка інша початкова швидкість може бути виражена через початковий коефіцієнт розплавлення електрода

$$V_{o3} = \alpha_{po} \cdot J / \rho, \quad (3.5)$$

де α_{po} - початковий коефіцієнт розплавлення електрода при запаленні дуги при нульовому підігріві вильоту, г/(А·с);

J – густина струму дуги на електроді, А/см²;

ρ - щільність металевого стрижня, г/см³.

Тоді вираз (3.4) з урахуванням (3.5) можна подати у вигляді

$$V_3 = V_2 = 4 \cdot \alpha_{po} \cdot I_3 / (\pi \cdot D_e^2 \cdot \rho) + A \cdot I_3^M \cdot t_3, \quad (3.6)$$

Другим незалежним рівнянням є інтеграл за часом t виразу (3.6), який повинен давати обрану довжину розплавлюваної покритої частини. Значення такого інтегралу:

$$L_e \cdot \varphi = 4 \alpha_{po} \cdot I_3 \cdot t_3 / (\pi \cdot D_e^2 \cdot \rho) + A \cdot I_3^M \cdot t_3^2 / 2, \quad (3.7)$$

де φ – частка довжини від повної довжини L_e покриття стандартного електрода відомої конструкції. Розв'язання системи рівнянь (3.6-3.7) при знайдених раніше значення коефіцієнтів A і M дає значення струму I_3 і часу згоряння t_3 обраної довжини $L_e \cdot \varphi$ покритої частини. Для електродів марки LB-52U попередньо було скориговано розрахунковий час розплавлення повної довжини, при максимальному рекомендованому струмі 130 А. Дані розрахунків наведено у табл.3.2.

Таблиця 3.2 - Значення параметрів під час розплавлення половини довжини покритої частини

| I_3, A | $V_o, \text{см/с}$ | $t_3, \text{с}$ | $+\Delta I/I, \%$ | $-\Delta t/t, \%$ |
|----------|--------------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| LB-52U | | | | |
| 150 | 0,53 | 28,0 | 15,4 | 7,6 |
| OK 53.70 | | | | |
| 155 | 0,49 | 28,2 | 19,2 | 6,3 |

Після цього проводили досліди на розрахованому струмі зварювання з розплавлення половини покритої частини електрода. Порівнювали розрахунковий та досліджений час зварювання. В результаті подібність розрахункових та дослідних значень за абсолютною величиною становила 2%. Для електродів LB-52U вищим є підвищення продуктивності розплавлення електродів і меншим збільшення струму, а для електродів OK 53.70 – навпаки.

Використовуємо знайдені коефіцієнти для розрахунку середніх швидкостей розплавлення електрода, одержаних вище (табл. 2.10).

Розрахунок виконаємо для струму 80 А.

Початкову швидкість розплавлення для зворотної полярності знайдемо за допомогою коефіцієнта для дуги під флюсом. 7,48 г/(Агод). Тоді $V_0 = 0,265$ см/с.

$$V_k = V_0 + 80^{2,786} \cdot 5,15 \cdot 10^{-9} = 0,265 + 91,37 \cdot 1,032 \cdot 10^{-3} = 0,359 \text{ см/с.}$$

$$V_c = (0,265 + 0,359) / 2 = 0,312 \text{ см/с.}$$

Для струму 130 А $V_0 = 0,43$ см/с.

$$V_k = V_0 + 130^{2,786} \cdot 5,15 \cdot 10^{-9} = 0,43 + 58,3 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 0,663 \text{ см/с.}$$

$$V_c = (0,43 + 0,663) / 2 = 0,547 \text{ см/с.}$$

Подібність розрахункових та вимірних середніх швидкостей задовільна, враховуючи, що електроди розташовувалися горизонтально та це могло впливати на процеси формування крапель.

3.2. Визначення залежності середньої швидкості розплавлення електрода від струму

Для розробки оптимальної технології ручного зварювання та більш точного нормування зварювальних робіт необхідно знати залежність коефіцієнта розплавлення електрода від струму дуги. Це можна виконати за наведеною вище методикою, визначивши для двох значень струму коефіцієнти рівняння. Це вимагає побудови двох залежностей швидкості розплавлення від струму для визначення початкової швидкості розплавлення електрода. Початкову швидкість для зворотної полярності можна розрахувати за початковим коефіцієнтом розплавлення. Необхідно провести кілька дослідів на кожному струмі з розплавлення 0,5 довжини електрода та цілого електрода. Можливе застосування й іншої методики визначення коефіцієнтів у рівнянні (2.1).

Можна отримати залежність середньої швидкості розплавлення від струму дуги та використовувати отриману залежність для визначення коефіцієнтів чи безпосередньо для розрахунків. Для цього були виконані спеціальні

експерименти, які проводилися при наплавлення електродами на пластину на зворотній полярності дуги. Значення струмів були обрані в межах рекомендованого діапазону та в його середині. Використовували електроди марок ОК 53.70 та LB-52U. Результати досліджень для електродів марки ОК наведено у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 - Залежність часу розплавлення покриття від струму дуги

| I, A | J, A/cm ² | t, c | Lc, cm |
|------|----------------------|-------|--------|
| 60 | 1222 | 78,33 | 31,14 |
| 72 | 1466 | 63,32 | 31,09 |
| 85 | 1731 | 53,85 | 31,39 |

Примітка: $d = 2,5$ мм $S = 4,91$ мм².

При розрахунках коефіцієнта розплавлення приймали щільність $\rho = 7,85$ г/см³.

Таблиця 3.4 - Дослідні дані щодо швидкості та коефіцієнта розплавлення

| I _д , A | V _{ес} , см/с | $\alpha_{рс}$, г/(Агод) | $\Pi = \alpha_p I_d$, г/ГОД |
|--------------------|------------------------|--------------------------|------------------------------|
| 60 | 0,398 | 9,2 | 552 |
| 72 | 0,491 | 9,46 | 681 |
| 85 | 0,583 | 9,52 | 809 |

Середнє значення для трьох струмів у табл. 3.4. $\alpha_{рс} = 9,37$ г/(Агод). Відхилення: $0,17/9,37 = 1,8\%$ та $0,09/9,37 = 1,0\%$, а також $0,15/9,37 = 1,6\%$. Середнє відхилення по абсолютній величині $1,47\% = 1,5\%$. Це можна віднести до випадкових відхилень. Тому середню швидкість розплавлення електрода від струму можна розраховувати по середньому α_p . Те ж саме стосується й продуктивність розплавлення.

Аналогічні досліді було виконано для електродів LB-52U (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 - Залежність часу розплавлення покриття від струму дуги

| I, A | J, A/cm ² | t, c | Lc, cm |
|------|----------------------|-------|--------|
| 60 | 1130 | 79,65 | 29,59 |
| 75 | 1412 | 67,1 | 30,51 |
| 90 | 1695 | 56,06 | 30,59 |

Примітка: $d = 2,6$ мм, $S = 5,31$ мм².

Розрахунки наведені у табл. 3.6.

Таблиця 3.6 - Дослідні дані щодо швидкості та коефіцієнта розплавлення

| I _д , A | V _{ес} , см/с | α_p , г/(Агод) | $\Pi = \alpha_p I_d$, г/год |
|--------------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|
| 60 | 0,372 | 9,29 | 557 |
| 75 | 0,455 | 9,1 | 683 |
| 90 | 0,546 | 9,1 | 819 |

Середнє значення $\alpha_{pc} = 9,16$ г/(Агод). Відхилення: $0,06/9,16 = 0,66$ %x2 та $0,13/9,16 = 1,4$ %. Середнє за абсолютною величиною $0,9$ %. Це можна віднести до випадкових відхилень. Тоді середню швидкість розплавлення електрода від струму можна розраховувати за середнім α_p . Те саме стосується і продуктивності розплавлення.

У електродів марки LB-52U на відміну від ОК 53.70 є тенденція до зменшення α_p зі збільшенням струму. Результати розрахунку коефіцієнта розплавлення електродів марки LB-52U порівнювали для дослідів при горінні дуги непрямої дії та при наплавленні. Результати зведені у табл. 3.7.

Таблиця 3.7 Порівняння дослідних даних з різних дослідів

| Струм, A | Дуга | |
|----------|--------------|------------|
| | Непрямої дії | Прямої дії |
| 60 | 9,89 | 9,29 |
| 90 | 9,53 | 9,10 |

Виходить, що у дузі непрямої дії коефіцієнт розплавлення позитивного електрода на 5-6% вище, ніж при звичайній наплавці. Це можна пояснити деякою зміною умов формування, відриву та переносу крапель електродного металу в залежності від просторового становища електрода.

3.3. Використання залежностей для середньої швидкості розплавлення для визначення коефіцієнтів

Для використання даних необхідно проінтегрувати вираз (3.1).

Отримаємо

$$L_e = V_o \cdot t_c + A \cdot I^M t_c^2 / 2,$$

де L_e - довжина згорілої ділянки електрода, см;

t_c - час горіння дуги, с.

Середня швидкість розплавлення

$$V_{ec} = L_e / t_c = V_o + A \cdot I^M t_c / 2,$$

На основі цього виразу також можна отримати три нелінійних рівняння для трьох значень струмів. Якщо розраховувати початкову швидкість розплавлення за коефіцієнтом розплавлення для зварювання під флюсом, тоді достатньо проведення двох дослідів і має проводитися розв'язання системи двох рівнянь. Використовуємо отримані у табл. 3.6 дані для другого підходу. За трьома дослідями можна отримати три системи з двох рівнянь і вирішуючи їх, порівняти отримані коефіцієнти виразу 3.1.

Розглянемо спочатку систему крайніх значень струму 60 і 90 А, а потім виконаємо перевірку для струму 75 А. Система матиме вигляд:

Для струму 60 А

$$0,372 = V_{o1} + A \cdot 79,65 \cdot 60^M / 2,$$

Для струму 90 А

$$0,546 = V_{o2} + A \cdot 56,06 \cdot 90^M / 2,$$

Приведена густина LB-52U 11,1 г/см³. Тоді

$$V_{o1} = 8,15 \cdot 1130 / (3600 \cdot 7,8) = 0,328 \text{ см/с.}$$

$$V_{o2} = 0,328 \cdot 1,5 = 0,492 \text{ см/с.}$$

Система набуде вигляду

$$0,044 = A \cdot 79,65 \cdot 60^M / 2,$$

$$0,054 = A \cdot 56,06 \cdot 90^M / 2.$$

Розділивши 2-е рівняння на 1-е, отримаємо

$$1,2273 = 0,704 \cdot 1,5^M$$

Звідси $M = 1,3728$. $A_1 = 4,00176 \cdot 10^{-6}$. $A_2 = 3,99323 \cdot 10^{-6}$. Середнє значення $A_c = 4 \cdot 10^{-6}$.

Розрахуємо тепер за цими даними значення середньої швидкості розплавлення для струму 75 А. Початкове значення швидкості дорівнює половині швидкостей при 60 та 90 А, тобто 0,41 см/с. Тоді

$V_{ec} = 0,41 + 67,1 (4 \cdot 10^{-6} \cdot 75^{1,3728}) / 2 = 0,41 + 0,05 = 0,46$. Дослідне значення 0,455 см/с.

Аналогічні розрахунки було виконано для електродів марки ОК 53.70.

Розглянемо спочатку систему для крайніх значень струму 60 та 85 А, а потім виконаємо перевірку для струму 72 А. Система матиме вигляд:

Для струму 60 А

$$0,398 = V_{o1} + A \cdot 78,33 \cdot 60^M / 2,$$

Для струму 85 А

$$0,583 = V_{o2} + A \cdot 53,85 \cdot 85^M / 2,$$

Наведена щільність ОК 53.70 $\rho_{np} = 7,8 \text{ г/см}^3$. Тоді

$$V_{o1} = 8,15 \cdot 1222 / (7,8 \cdot 3600) = 0,328 \text{ см/с.}$$

$$V_{o2} = 0,328 \cdot 1,417 = 0,465 \text{ см/с.}$$

Система набуде вигляду

$$0,07 = A \cdot 78,3360^M / 2,$$

$$0,118 = A \cdot 53,85 \cdot 85^M / 2.$$

Розділивши 2-е рівняння на 1-е отримаємо

$$1,6889 = 0,687 \cdot 1,417^M$$

$$1,417^M = 2,458.$$

Звідси $M = 2,58$. $A_1 = 4,619 \cdot 10^{-8}$. $A_2 = 4,61 \cdot 10^{-8}$. Середнє значення $A = 4,615 \cdot 10^{-8}$.

Розрахуємо тепер за цими даними значення середньої швидкості розплавлення для струму 72,0 А. Початкове значення швидкості дорівнює половині швидкостей при 60 та 85 А, тобто 0,3965 см/с. Тоді

$V_{ec} = 0,3965 + 63,32 (4,615 \cdot 10^{-8} \cdot 72^{2,58}) / 2 = 0,3965 + 0,18 = 0,577$. Дослідне значення 0,583 см/с. Подібність дуже висока.

Отже, запропонована спрощена методика з визначенням початкової швидкості розрахунковим шляхом дозволяє за двома дослідними з високую точністю розраховувати коефіцієнти рівняння та точно виконувати нормування зварювальних робіт.

Висновки за розділом

1. Швидкість розплавлення імпортованих покритих електродів, що використовуються для зварювання корневих шарів відповідальних конструкцій, на максимальних струмах збільшується до кінця розплавлення в межах 20-40%, що може призвести до зміни їх частку в металі шва по його довжині.

2. Коефіцієнт пропорційності лінійної залежності швидкості розплавлення покритого електрода від часу горіння дуги зростає приблизно майже на тритину від струму дуги і залежить від властивостей покриття.

3. Нерівномірність швидкості розплавлення покритих електродів на мінімальному струмі рекомендованого діапазону мінімальна. Тому для зниження хімічної неоднорідності корневих шарів швів з'єднань з обробкою кромки їх доцільно зварювати на мінімальному струмі рекомендованого діапазону.

4. Максимальна швидкість розплавлення, яка досягається на максимальному рекомендованому струмі може служити критерієм для призначення підвищених струмів при використанні для зварювання неповної довжини електрода.

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.

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

Під час роботи з виробом 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 1×1,5 м.

Під час експлуатації виробу необхідно виконувати правила безпечної експлуатації електроустановок:

- 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'єднаним 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 утоми, 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:

- 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 потраплянні 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 виробом:

- 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. Оберегайте 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 °С до плюс 40 °С з відносною 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 верх починаючи з базових подій і закінчуючи головною. Значення подій вказуємо безпосередньо на символи зображення події. Ймовірності виробничих подій визначаємо за даними виробництва. Наприклад, базова подія “охорона праці”. Для визначення ймовірності ми повинні встановити наскільки (%) від ідеального рівня здійснюється відповідний контроль на об’єкт. Якщо буде встановлено, що такий рівень контролю становить 20 або 30%, то ймовірність відповідно становить 0,2 і 0,3. При відсутності контролю ймовірність “не здійснення контролю” становитиме 1, якщо контроль ідеальний, то відповідна ймовірність дорівнює 0. Для виконання математичних обчислень ймовірностей випадкових подій логіко-імітаційної моделі застосовують складені формули відповідно до положень [3].

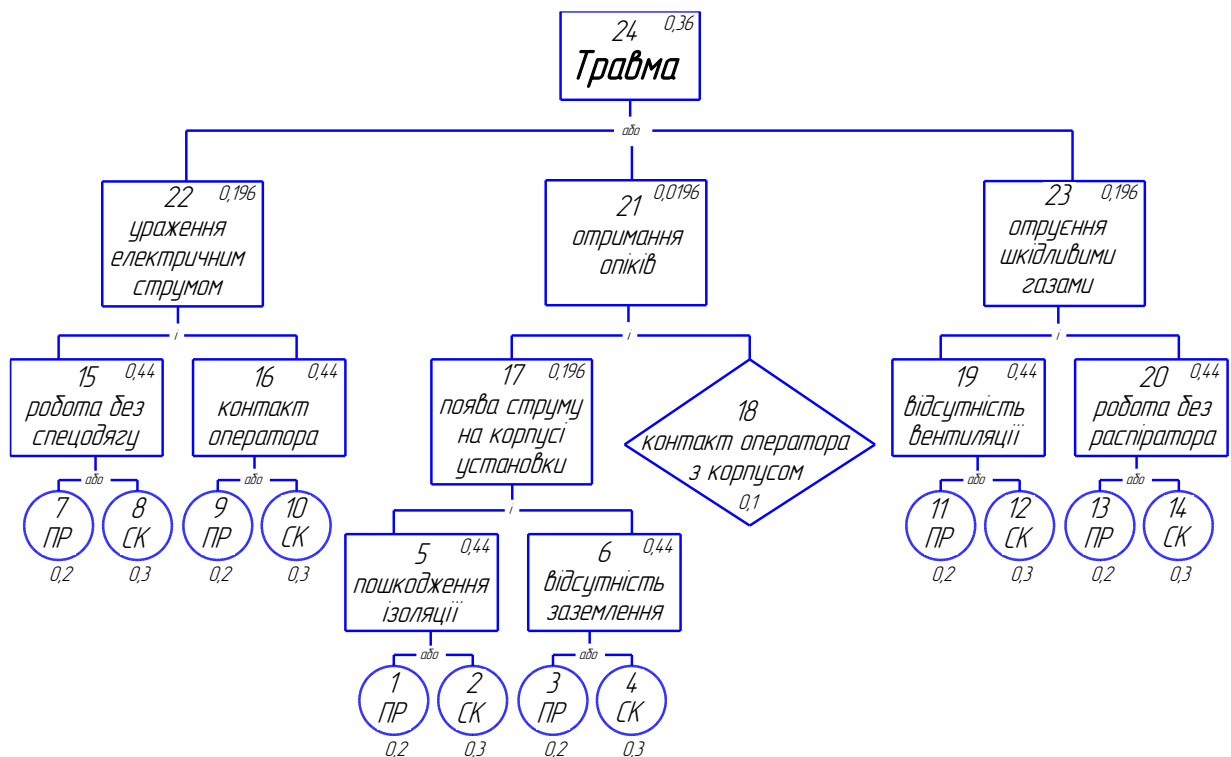


Рисунок 4.1. Модель процесу формування та виникнення травми

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}

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

Таким чином, на робочому місті під час зварювання покритими 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 %).

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

ВИСНОВКИ

Щільність покриттів імпортованих електродів однієї марки може мати значну різницю, залежно від відношення D/d_e , а щільність електрода, приведена до об'єму стержня, при цьому залишається практично незмінною.

Лінійний характер зростання швидкості розплавлення електрода за часом підтверджений для низки марок імпортованих та вітчизняних електродів не тільки для дуги зворотної полярності, а й для дуги прямої полярності.

Розроблена методика досліджень із розплавленням електродів дугою непрямої дії дозволяє достовірно та просто визначати співвідношення швидкостей розплавлення електродів залежно від полярності зварювальної дуги.

Продуктивність розплавлення електродів при прямій полярності дуги на 10-15% нижча за продуктивність на зворотній полярності для більшості марок електродів.

Коефіцієнт пропорційності лінійної залежності швидкості розплавлення покритого електрода від часу горіння дуги зростає приблизно в третій степені від струму дуги і залежить від властивостей покриття.

Нерівномірність швидкості розплавлення покритих електродів на мінімальному струмі рекомендованого діапазону мінімальна. Тому для зниження хімічної неоднорідності корневих шарів швів з'єднань з обробкою кромки їх доцільно зварювати на мінімальному струмі рекомендованого діапазону.

Максимальна швидкість розплавлення досягається на максимальному рекомендованому струмі і може бути критерієм призначення підвищених струмів при використанні зварювання електродом неповної довжини.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Биковський О. Г. Довідник зварника. Київ: «Основа». 2014. 442с.
2. Власенко А.М. Основи зварювання. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2007. 106 с.
3. Городецький І. В, О. Тимочко. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях: методичні рекомендації до виконання розділу у роботах ОКР "Магістр" студентами факультету механіки та енергетики. Львів: Львівський НАУ, 2011. 16 с.
4. Гуменюк І.В. Іваськів О.В., Гуменюк О.В. Технологія електродугового зварювання: Підручник. Київ: Грамота, 2006. 512 с.
5. Драган С.В., Лабарткава А.В. Практикум зі зварювання: Навчальний посібник. Миколаїв: НУК, 2008. 68 с.
6. ДСТУ EN ISO 18275:2019 Зварювальні матеріали. Електроди для ручного дугового зварювання жароміцних сталей. Класифікація. <https://uscc.ua/dstu-en-iso-182752019-zvaryvalni-materiali-elektrodi-dlya-ruchnogo-dugovogo-zvaryuvannya-zharomitsnikh-staley-klasifikatsiya>
7. ДСТУ 2456-94. Зварювання дугове і електрошлакове. Вимоги безпеки. [Чинний від 1995-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1994. 48 с.
8. ДСТУ ISO 18275:2008 Матеріали зварювальні. Покриті електроди для ручного дугового зварювання високоміцних сталей. Класифікація (ISO 18275:2005, IDT). https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=66697
9. Каталог НД України on-line ВЕРСІЯ +: <http://csm.kiev.ua/>
10. Квасницький В. В. Спеціальні способи зварювання. Навчальний посібник. Миколаїв: УДМТУ, 2003. 437 с.
11. 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.

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

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

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

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

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

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

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