

УДК 621.791.75.001.24

Корінець І. П.

**МЕТОД РОЗРАХУНКУ РЕЖИМУ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ
В СЕРЕДОВИЩІ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ**

В процесі навчання в технічному університеті студенти виконують курсові роботи, курсові і дипломні проекти з застосуванням інженерних розрахунків. Не є виключенням виконання подібних робіт при підготовці інженерів (бакалаврів, спеціалістів) за напрямом зварювання. Виконання курсової роботи або дипломного проекту, як правило, пов'язане з застосуванням найбільш поширених способів дугового зварювання і з необхідністю призначення режимів зварювання. Робота в журі на протязі декількох років при проведенні Всеукраїнської олімпіади студентів за спеціальністю «Технологія та устаткування зварювання» показала, що найчастіше студенти використовують метод розрахунку режимів автоматичного дугового зварювання під флюсом і в середовищі вуглекислого газу (CO₂), який наведено у підручнику А. И. Акулова, Г. А. Бельчука і В. П. Демянцевича «Технология и оборудование сварки плавлением» [1]. У переважній більшості студенти не володіють цим методом розрахунку, роблять багато помилок. На мій погляд, причина такого стану пов'язана не стільки з недостатніми навичками студентів, скільки з недосконалістю методу розрахунку. Наприклад, не логічно є послідовність розрахунку сили зварювального струму через вибір коефіцієнту k_h в залежності від діаметру дроту, який далі (діаметр дроту) рекомендується розрахувати через той же струм і щільність струму в електродному дроті. Занадто складним є розрахунок коефіцієнту форми шва, ширини і опуклості шва з метою оцінки відповідності їх критеріям якості [2–3].

Наведений у підручнику метод розрахунку режиму зварювання передбачає один вхідний геометричний параметр шва – глибину проплавлення h . Далі по отриманим параметрам режиму визначається ширина шва, і перевіряється в ітеративному режимі допустимість форми шва і валика. Виникає питання: «Чому не використати в якості вхідних геометричних параметрів одразу глибину і ширину шва і, отже, коефіцієнт форми шва?».

Метою роботи є ідея створити альтернативний метод розрахунку режиму зварювання за двома вхідними розмірами шва: глибиною h і шириною шва e . При розробці цього методу розрахунку режиму виникла необхідність у створенні двох математичних моделей: моделі плавлення основного металу і форми шва і моделі плавлення електродного дроту.

При розробці математичної моделі плавлення основного металу використано відомий розрахунок максимальної температури при нагріванні напівобмеженого тіла потужним швидкодіючим джерелом нагріву згідно М. М. Рикаліна [2] і припущення В. І. Дятлова відносно форми проплавлення у вигляді напівеліпсу [3]. Згідно цих даних глибина h (1) і ширина шва e (2) дорівнюють:

$$h = \sqrt{\frac{1}{c_p \cdot g \cdot T_{пл}}} \cdot \sqrt{\frac{h_e \cdot h_t}{P/4 \cdot \psi_{ш}}} \cdot \frac{I_3^{0,5} \cdot U_3^{0,5}}{V_3^{0,5}}; \quad (1)$$

$$e = \sqrt{\frac{1}{c_p \cdot g \cdot T_{пл}}} \cdot \sqrt{\frac{h_e \cdot h_t \cdot \psi_{ш}}{P/4}} \cdot \frac{I_3^{0,5} \cdot U_3^{0,5}}{V_3^{0,5}}, \quad (2)$$

де c_p , g і $T_{пл}$ – питома теплоємність, густина і температура плавлення основного металу; η_e , і η_t – ефективний і термічний коефіцієнти термічної дії джерела нагріву; $\psi_{ш}$ – коефіцієнт форми шва (проплавлення); I_3 , U_3 і V_3 – параметри режиму дугового зварювання: сила струму, напруга і швидкість зварювання.

Ці теоретично отримані вирази показують, що розміри шва h і e можливо представити показниковими функціями в залежності від основних параметрів режиму зварювання I_3 і V_3 , які найбільш суттєво впливають на розміри шва [4, 5]:

$$e = B \cdot \frac{I_3^u}{V_3^v}; \quad h = A \cdot \frac{I_3^x}{V_3^y}. \quad (3)$$

Далі експериментально було визначено корегувальні коефіцієнти (A , B) і показники (x , y , u , v), щоб врахувати вплив на розміри шва теплофізичних властивостей (c_p , γ і $T_{пл}$) основного металу, ККД (η_e , η_i) дуги, коефіцієнту форми шва ($\psi_{ш}$) і напруги зварювання (U_3). За результатами серії експериментів при зварювання у CO_2 розміри шва в залежності від I_3 і V_3 прийняли вид:

$$e = 0,8 \cdot \frac{I_3^{0,6}}{V_3^{0,49}}; \quad h = 0,83 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{I_3^{1,25}}{V_3^{0,4}}. \quad (4)$$

Вирішення системи рівнянь (4) відносно I_3 і V_3 дозволило розрахувати основні параметри режиму дугового зварювання I_3 і V_3 через вихідні дані, розміри шва h і e , і, отже, відомому коефіцієнту форми шва $\psi_{ш} = e/h$:

$$I_3 = 430 \cdot \frac{h_p^{1,32}}{e^{1,07}}; \quad V_3 = 1060 \cdot \frac{h_p^{1,61}}{e^{3,36}}. \quad (5)$$

Розрахунок швидкості плавлення (подачі) дроту.

Для цього була розроблена фізична і математична моделі плавлення дроту [5, 6] на основі складання балансу енергії, а саме: надходження енергії від нагрівання вильоту струмом $Q_в$ і від дії дуги з торця електродного дроту $Q_{ме}$. Витрачається енергія на нагрів і плавлення дроту $Q_{пл}$:

$$Q_в + Q_{ме} + Q_{пл}. \quad (6)$$

Отримана теоретично залежність (7) для визначення лінійної швидкості плавлення дроту $V_{пл}$ від фізичних властивостей електродного металу ($\gamma_{ем}$, $\rho_{ем}$, $H_{кр}$), фізичних процесів в дузі на аноді (U_a , $\varphi_в$) і параметрів режиму дугового зварювання ($d_{ед}$, I_3 , $L_в$) має вид:

$$V_{пл} (+) = \frac{4 \cdot (U_a + \varphi_в)}{\rho \cdot H_{кр} \cdot \gamma_{ем}} \cdot \frac{I_3}{d_{ед}^2} + \frac{16 \cdot r_{ем}}{\rho^2 \cdot H_{кр} \cdot \gamma_{ем}} \cdot \frac{L_в \cdot I_3^2}{d_{ед}^4}. \quad (7)$$

Якщо фізичні характеристики об'єднати у сталі коефіцієнти A і B , то отримаємо просту формулу (8) для інженерного розрахунку швидкості плавлення дроту $V_{пл}$ від трьох параметрів режиму $d_{ед}$, I_3 , $L_в$:

$$V_{пл} = A \cdot \frac{I_3}{d_{ед}^2} + B \cdot \frac{L_в \cdot I_3^2}{d_{ед}^4}. \quad (8)$$

Якщо довжину вильоту прийняти $L_e = 10 \cdot d_e$, то формула для розрахунку $V_{пл}$ приймає вид (9):

$$V_{пл} = A \cdot \frac{I_3}{d_{ед}^2} + C \cdot \frac{I_3^2}{d_{ед}^3}. \quad (9)$$

Для зварювання у CO_2 , наприклад, дротом Св-08Г2С швидкість плавлення дроту дорівнює:

$$V_{пл} = 0,53 \cdot \frac{I_3}{d_{ед}^2} + 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{I_3^2}{d_{ед}^3}. \quad (10)$$

Метод розрахунку режиму дугового зварювання в CO_2 за геометричними розмірами шва і величини зазору (e , h і b).

Метод [5, 7, 8] застосовується для розрахунку режиму дугового зварювання в CO_2 стикових з'єднань (типи С2, С3, С4, С5, С6 і С7, ГОСТ 14771-76) на низьковуглецевих і низьколегованих сталях зварювальними дротами Св-08ГС, Св-08Г2С і Св-08ХГ2С в усіх положеннях шва (рис. 1).

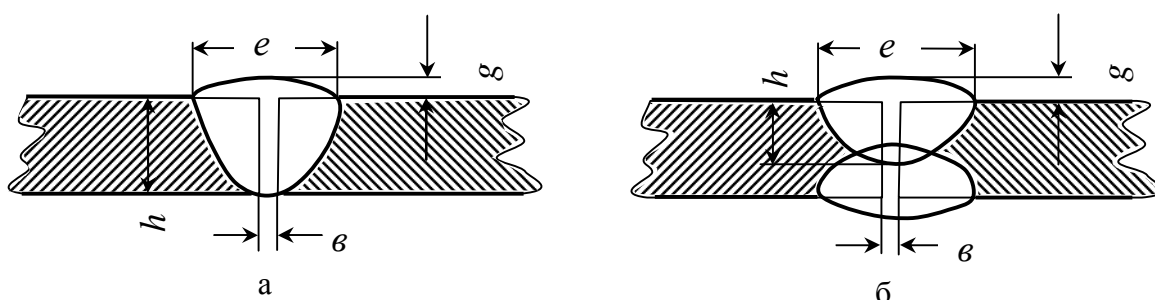


Рис. 1. Розміри одно- (а) і двохпрохідного (б) стикового шва

Метод розрахунку повинен визначити такі параметри режиму дугового зварювання в CO_2 : $d_{ед}$; V_3 ; I_3 ; U_3 ; L_e ; $V_{ед}^{(+)}$; і $q_{зз}$.

1. Приймаємо глибину проплавлення для одnobічного однопрохідного шва $h = S$ і для двобічного двохпрохідного шва – $h = 0,6 \cdot S$. Визначаємо розрахункову глибину проплавлення h_p , яка враховує збільшення глибини проплавлення при наявності зазору b :

$$h_p = h - 0,5 \cdot b \text{ [мм]}. \quad (11)$$

2. В залежності від розрахункової глибини проплавлення розраховуємо діапазон діаметрів електродного дроту і приймаємо найближчий із стандартних: 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 2,0 мм.

$$d_{ед} = \sqrt[4]{h_p} \pm 0,05 \cdot h_p \text{ [мм]}. \quad (12)$$

Враховуємо обмеження діаметру в залежності від положення шва:

нижнє – $d_{ед} \leq 2,0$ мм, вертикальне – $d_{ед} \leq 1,6$ мм, горизонтальне і стельове – $d_{ед} \leq 1,2$ мм.

3. За розмірами h_p і e визначаємо швидкість зварювання, яка при автоматичному зварюванні має бути в межах $V_3 = 4...20$ мм/с (14,4...72 м/год), при механізованому зварюванні – в межах $V_3 = 4...10$ мм/с (14,4...36 м/год).

$$V_3 = (1050...1150) \cdot \frac{h_p^{1,61}}{e^{3,36}} [\text{мм/с}]. \quad (13)$$

Якщо розрахована швидкість зварювання виходе за межі допустимої, то у нас є можливість її скорегувати за рахунок ширини шва, залишаючи незмінною глибину проплавлення.

4. За розмірами h_p і e визначаємо зварювальний струм I_3 :

$$I_3 = (350...450) \cdot \frac{h_p^{1,32}}{e^{1,07}} [A]. \quad (14)$$

Зварювальний струм повинен бути в межах допустимого діапазону для визначеного діаметру дроту. Для нижнього положення зварювання цей діапазон можна розрахувати:

$$I_3 = (90...180) \cdot d_{e\partial}^{1,5} [A]. \quad (15)$$

При зварюванні у вертикальному положенні струм не повинен перевищувати $I_3 \leq 220$ А, в горизонтальному і стельовому положеннях – $I_3 \leq 180$ А.

Наступні параметри визначаємо через попередні і їх оптимізація або корегування не потрібні.

5. Визначаємо напругу зварювання U_3 , яка залежить в основному від величини струму:

$$U_3 = 7 \cdot \sqrt[4]{I_3} [B]; \quad U_3 = 14 + 0,05 \cdot I_3 [B]. \quad (16)$$

6. Довжину вильоту L_6 розраховуємо через діаметр дроту:

$$L_6 = 10 \cdot d_{e\partial} \pm 2 \cdot d_{e\partial} [\text{мм}]. \quad (17)$$

7. Швидкість плавлення дроту, яка в умовах стабільного процесу зварювання дорівнює швидкості подачі дроту $V_{nl}^{(+)} = V_{e\partial}^{(+)}$, визначаємо за формулою:

$$V_{e\partial}^{(+)} = 0,53 \cdot \frac{I_3}{d_{e\partial}^2} + 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{I_3^2}{d_{e\partial}^3} [\text{мм/с}]. \quad (18)$$

8. Витрати CO_2 змінюються в межах $q_{32} = 5...25$ л/хв і залежать переважно від сили зварювального струму. Витрати захисного газу рахуємо за формулою:

$$q_{32} = 0,2 \cdot I_3^{0,5} [\text{л/хв}]. \quad (19)$$

Приклад розрахунку режиму дугового зварювання у CO_2 [8].

Вихідні дані:

Основний метал ВСт3сп.

Зварювальний дріт Св-08Г2С.

Стикове з'єднання типу С5, ГОСТ 14771-76 (рис. 2).

Положення шва – нижнє.

Товщина металу $S = 7$ мм.

Ширина шва $e \leq 12$ мм.

Зазор $\epsilon = 2,0 + 2,0$ мм.

Опуклість шва $g = 2,0 \pm 1,0$.

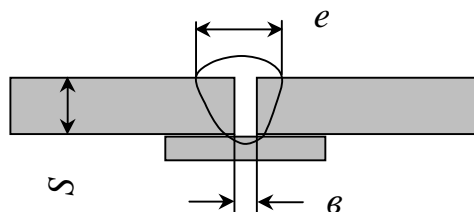


Рис. 2. Стикове з'єднання з однібічним стиковим швом на сталевій підкладці

Необхідно визначити параметри режиму: $d_{e\partial}$; V_3 ; I_3 ; U_3 ; L_6 ; $V_{e\partial}^{(+)}$; q_{32} .

Розрахунок параметрів режиму.

1. Визначаємо глибину проплавлення і розрахункову глибину проплавлення:

$$h = S = 7 \text{ мм}; \quad h_p = h - 0,5 \cdot b = 7 - 0,5 \cdot 2 = 6 \text{ мм}.$$

2. Визначаємо діаметр електродного дроту:

$$d_{e\partial} = \sqrt[4]{h_p} \pm 0,05 \cdot h_p = \sqrt[4]{6} \pm 0,05 \cdot 6 = 1,265 \dots 1,865 \text{ мм}.$$

Приймаємо стандартний діаметр дроту $d_{e\partial} = 1,6$ мм.

3. Визначаємо швидкість зварювання:

$$V_3 = (1050 \dots 1150) \cdot \frac{h_p^{1,61}}{e^{3,36}} = (1050 \dots 1150) \cdot \frac{6^{1,61}}{12^{3,36}} = 4,44 \dots 4,86 \text{ мм/с} = 16 \dots 17,5 \text{ м/год}.$$

Швидкість зварювання знаходиться в межах допустимих значень і не потребує коригування.

4. Визначаємо силу зварювального струму:

$$I_3 = (350 \dots 450) \cdot \frac{h_p^{1,32}}{e^{1,07}} = (350 \dots 450) \cdot \frac{6^{1,32}}{12^{1,07}} = 260 \dots 335 \text{ А}.$$

Для діаметра $d_{e\partial} = 1,6$ мм струм знаходиться в допустимих межах:

$$I_3 = (90 \dots 180) \cdot d_{e\partial}^{1,5} = (90 \dots 180) \cdot 1,6^{1,5} = 182 \dots 364 \text{ А}.$$

5. Визначаємо напругу зварювання:

$$U_3 = 14 + 0,05 \cdot I_3 = 14 + 0,05 \cdot (260 \dots 335) = 27,0 \dots 30,7 \text{ В}.$$

6. Визначаємо довжину вильоту:

$$L_g = 10 \cdot d_{e\partial} \pm 2 \cdot d_{e\partial} = 10 \cdot 1,6 \pm 2 \cdot 1,6 = 12,8 \dots 19,2 \text{ мм} .$$

7. Визначаємо швидкість подачі дроту:

$$V_{e\partial}^{(+)} = 0,53 \cdot \frac{I_3}{d_{e\partial}^2} + 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{I_3^2}{d_{e\partial}^3} = 0,53 \cdot \frac{(260 \dots 335)}{1,6^2} + 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{(260 \dots 335)^2}{1,6^3} =$$

$$= (53,82 \dots 69,3) + (11,5 \dots 19,1) = 63,3 \dots 88,4 \text{ мм/с} = 227,9 \dots 318,2 \text{ м/год} .$$

8. Визначаємо витрати захисного газу:

$$F_H = F_1 + F_2 = b \cdot S + 0,7 \cdot e \cdot g .$$

Перевірка відповідності розмірів шва стандарту і вимогам якості.

1. Визначаємо висоту опуклості шва. За розмірами шва площа наплавленого металу дорівнює (рис. 3):

$$F_H = F_1 + F_2 = b \cdot S + m_g \cdot e \cdot g .$$

Звідси висота опуклості дорівнює:

$$g = \frac{F_H - b \cdot S}{m_g \cdot e} .$$

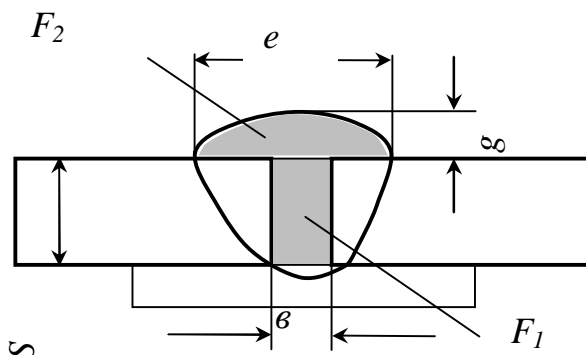


Рис. 3. Схема площі наплавленого металу по зазору (F_1) і в опуклості шва (F_2)

2. Визначаємо площу наплавленого металу за параметрами розрахованого режиму зварювання. Відомо, що кількість наплавленого металу дорівнює кількості розплавленого електродного металу за відрахуванням його втрат на розбризкування (приймаємо $\psi_p = 0,1$):

$$F_H \cdot V_3 = F_{e\partial} \cdot V_{e\partial} \cdot (1 - \psi_p) .$$

Звідси знаходимо площу наплавленого металу за параметрами режиму:

$$F_H = \frac{F_{e\partial} \cdot V_{e\partial} \cdot (1 - \psi_p)}{V_3} = \frac{p \cdot d_{e\partial}^2 \cdot V_{e\partial} \cdot (1 - \psi_p)}{4 \cdot V_3} .$$

3. Розраховуємо площу наплавленого металу за параметрами режиму:

$$F_H = \frac{p \cdot d_{ed}^2 \cdot V_{ed} \cdot (1 - \gamma_p)}{4 \cdot V_3} = \frac{p \cdot 1,6^2 \cdot (66,3 \dots 88,4) \cdot (1 - 0,1)}{4 \cdot (4,44 \dots 4,86)} = 27 \dots 33 \text{ мм}^2.$$

4. Розраховуємо висоту опуклості шва:

$$g = \frac{F_H - b \cdot S}{m_g \cdot e} = \frac{(27 \dots 33) - 2 \cdot 7}{0,7 \cdot 12} = 1,5 \dots 2,3 \text{ мм.}$$

Висота опуклості шва $g = 1,5 \dots 2,3$ мм знаходиться в межах стандарту $g = 2,0 \pm 1,0$ мм.

5. Розраховуємо коефіцієнт форми шва:

$$\gamma_w = \frac{e}{h} = \frac{12}{7} = 1,7.$$

Коефіцієнт форми шва $\gamma_w = 1,7$ знаходиться в оптимальному діапазоні $\gamma_w = 1,5 \dots 3,0$ і відповідає вимогам якості.

ВИСНОВКИ

1. Обґрунтована необхідність розробки інженерного методу розрахунку режиму дугового зварювання в CO_2 за двома вхідними розмірами шва: глибиною проплавлення і шириною шва. Показано, що розробка цього методу ґрунтується на основі математичних моделей плавлення основного металу і формування шва, а також на математичній моделі плавлення електродного металу.

2. Приведено метод розрахунку режиму зварювання в CO_2 і приклад розрахунку для стикового з'єднання з однопрохідним швом на сталевій підкладці. Показана перевірка відповідності розмірів і форми шва вимогам стандарту і якості.

3. Метод розрахунку доцільно застосовувати студентам при виконанні курсових і дипломних проєктів, а також при проєктуванні технології зварювання в умовах виробництва.

ЛІТЕРАТУРА

1. Акулов А. И. *Технология и оборудование сварки плавлением* : учебник. / А. И. Акулов, Г. А. Бельчук, В. П. Демянцевич. – М. : Машиностроение, 1977. – 432 с.
2. Рыкалин Н. Н. *Расчеты тепловых процессов при сварке* / Н. Н. Рыкалин. – М. : Машиностроение, 1951. – 296 с.
3. Дятлов В. И. *Расчет режимов автоматической сварки* / В. И. Дятлов. – Киев : Гостехиздат, 1959. – 16 с.
4. Коринец И. Ф. *Детерминированно-статистическая модель формы шва при дуговой сварке* / И. Ф. Коринец, Чун Цзи Чжень // *Автоматическая сварка*. – 2001. – № 10. – С. 1–7.
5. Коринец И. Ф. *Разработка инженерных методов расчета режима дуговой сварки* / И. Ф. Коринец // *Применение математических методов в сварке : сборник научных трудов*. – Киев : ИЭС им. Е. О. Патона, 1988. – С. 80–86.
6. Коринец И. Ф. *Математическая модель плавления электродной проволоки при дуговой сварке* / И. Ф. Коринец // *Автоматическая сварка*. – 1995. – № 10. – С. 39–43.
7. Коринец И. Ф. *Разработка метода расчета сварки в CO_2 для автоматизированного проектирования технологии сварки плавлением* / И. Ф. Коринец, Ю. И. Охай // *Пути повышения эффективности процессов сварки и наплавки : тез. докл. научн.-техн. конф.* – Липецк : ДНТП, 1987. – С. 21–22.
8. Коринец И. Ф. *Методические указания к курсовой работе по дисциплине «Технология и оборудование сварки плавлением»* / И. Ф. Коринец. – Киев : КПИ, 1988. – 76 с.