

УДК 621.791

Пліс С. Г.

**МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ПО ПЕРЕРІЗУ
ДЖГУТОВОГО ДРОТУ НА ВИЛЬОТІ ЗВАРЮВАЛЬНИМ СТРУМОМ**

Процеси плавлення і переносу електродного металу при дуговому зварюванні (наплавленні) завжди були і є предметом вивчення багатьох дослідників [1]. Це пов'язано з тим, що характер плавлення і переносу електродного металу у зварювальну ванну чинить вирішальний вплив на хімічний склад та властивості наплавленого металу, його формування і утворення дефектів. В наш час відомо багато робіт, в яких всебічно вивчені фактори, що впливають на характеристики плавлення порошкових електродів. Суттєвий вплив на параметри переносу чинить конструкція порошкового дроту і його властивості [2]. Дослідження показали, що у порошкового дроту складної конструкції і порошкової стрічки прогрівання наповнювача більш ефективно, ніж у електродів простої конструкції, однак передбачена оцінка ефективності конструкції порошкового електрода не враховує теплофізичні властивості наповнювача, від яких залежить шунтування струму наповнювачем, теплопередача від оболонки до наповнювача і, в кінцевому рахунку, співвідношення швидкостей процесів плавлення оболонки і наповнювача [3, 4]. Співвідношення швидкостей процесів їх плавлення залежить від розподілу теплової потужності на плавлення оболонки і наповнювача (обумовлюється різними умовами нагрівання, плавлення і поглинання тепла оболонкою і наповнювачем).

Метою даної роботи є розробка математичної моделі нагрівання джгутового порошкового дроту зварювальним струмом та дугою в залежності від точки на його перерізу і відстані від дуги.

На вильоті порошковий дріт нагрівається від зварювального струму, а на торці ще і від зварювальної дуги. На нагрівання звичайного електрода витрачається від 15 до 30 % загальної теплової потужності дуги. Ця теплота витрачається на підвищення теплоємності оболонки та серцевини на довжині вильоту, а також на випромінювання в навколишній простір. В зв'язку з тим, що джгутовий дріт складається з декількох порошкових дротів трубчатого типу [5], а дуга горить на торці одного з цих дротів, то тільки цей дріт нагрівається струмом, а теплота від нагрітого струмом електрода через контактну поверхню передається до оболонки сусіднього дроту. Зі збільшенням струму можливо, що дуга займає частину оболонок сусідніх дротів, а значить до інших частин оболонок теплота передається методом теплопровідності.

Така модель теплопередачі по перерізу порошкового дроту представлена на рис. 1.

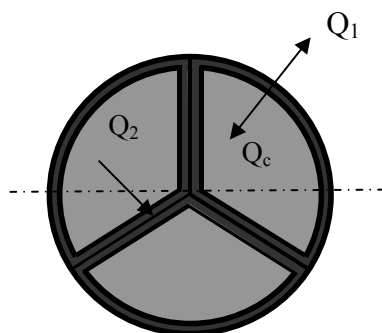


Рис. 1. Модель теплопередачі по перерізу джгутового порошкового дроту:

Q_c – теплота від зварювального струму – Ленц-Джоулеве тепло; Q_1 – теплота, що випромінюється з оболонки в навколишній простір; Q_2 – теплота, що передається до оболонки сусіднього порошкового дроту

Довжину ділянки джгутового дроту, що нагрівається зварювальним струмом на вильоті можна визначити по наступній формулі :

$$l = V_{n.d.} t, \quad (1)$$

де $V_{n.d.}$ – швидкість подачі дроту, м/с; t – час переміщення точки дроту на вильоті, с.
Теплоту, що випромінюється можна визначити по правилу Ньютона, згідно з яким:

$$q_k = \alpha_k (T - T_0), \quad (2)$$

де q_k – питомий потік конвективної тепловіддачі в навколишній простір з одиниці поверхні за одиницю часу; α_k – коефіцієнт конвективної тепловіддачі, кВт/см²·К; T – температура поверхні твердого тіла; T_0 – температура навколишнього середовища.

Значення коефіцієнту α_k непостійне, він може змінюватися в залежності від факторів: від властивостей навколишнього середовища (теплопровідності, густини, в'язкості) і її руху відносно поверхні; від фізичних властивостей поверхні, що віддає теплоту; від форми поверхні тіла і її положення у просторі; від різниці температур $T - T_0$ [2–4].

Питомий тепловий потік, який виділяє струм може бути визначений двома методами:
– або по закону Ленца-Джоуля:

$$q_c = I^2 R,$$

де I – зварювальний струм, А; R – опір зварювального кола, Ом;
– або шляхом рішення загального диференційного рівняння теплопровідності в циліндричних координатах:

$$\frac{dT_c}{dt} = a \left(\frac{\partial^2 T_c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_c}{\partial r} \right), \quad (3)$$

де a – коефіцієнт температуропроводності, см²/с;

r – полярний радіус, см;

T_c – температура від нагрівання зварювальним струмом серцевини порошкового дроту, град.

Накопичення теплом від зварювального струму в оболонці та серцевині порошкового дроту можна виразити через збільшення їх тепловмісту:

$$dQ_{o,c} = (c\gamma)_{o,c} \frac{dT_{o,c}}{dt} F_{o,c} V_{n.d.} dt, \quad (4)$$

де $F_{o,c}$ – площа перетину дроту; $V_{n.d.}$ – швидкість подачі порошкового дроту;
 $c\gamma$ – об'ємна теплоємність.

Теплопередачу від однієї оболонки до іншої можна моделювати як передачу в твердих тілах, тобто методом теплопровідності, або методом конвективної теплопередачі, у зв'язку з тим, що на границі прилягання суміжних складових порошкових дротів в джгутовому дроті може утворюватись контактний ефект, який утрудняє теплопередачу методом теплопровідності.

Відомо, що ефективність нагрівання і плавлення серцевини залежить від складу наповнювача та конструкції порошкового дроту [5–7].

Нами прийнята одна і та ж шлакова основа – рутил-флюорит – карбонатного типу. Співвідношення між складовими цієї основи – рутиловим концентратом, мармур та плавиковим шпатом прийняте відоме, те що забезпечує властивості звичайного порошкового дроту, такі, що відповідають сучасним вимогам. Кількість жужелегазоутворюючих компонентів складає 30 % від шихти серцевини.

В склад шихти серцевини входять також розкислювачі (феромарганець та феросиліцій), решту складає залізний порошок.

Теплопередача залежить також від ущільнення серцевини, в зв'язку з цим в усіх дослідженнях по теплопередачі прийнятий постійний процес волочіння, який забезпечує стале ущільнення шихти.

Нагрівання порошкового дроту зварювальним струмом розраховується згідно з загальним диференціальним рівнянням та початковими і граничними умовами, притаманними процесу нагрівання електроду.

Для серцевини самозахисного порошкового дроту трубчатої конструкції це рівняння теплопровідності в циліндричних координатах (3)

Рішення цього рівняння знаходимо при наступних граничних умовах:

$$\begin{aligned} T_c|_{r=0} &= T_0 = 0; \\ T_c|_{r=R} &= T_{об} = C(\exp(At) - 1), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{де } R = \frac{d_B}{2} \text{ – внутрішній радіус оболонки;} \quad (6)$$

C і A – невідомі постійні коефіцієнти;

$$t = \frac{l}{V_{n.д}} \text{ – час нагрівання,} \quad (7)$$

l – довжина ділянки дроту, що нагрівається, м;

$$\frac{\partial T_c}{\partial r}|_{r=0} = 0 \text{ – умови симетричності.}$$

Умови симетричності відображають той факт, що форма серцевини – прямий круговий циліндр і що температура нагрівання не залежить від полярного кута r :

$$T_c(r) = \text{const}; \quad \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = 0. \quad (8)$$

Із цих умов витікає, що ізотермами є поверхні обертання.

Для рішення загального рівняння теплопровідності в циліндричних координатах використовуємо безрозмірні критерії:

$$F_0 = \frac{at}{R^2} \text{ – безрозмірний час нагрівання;} \quad (9)$$

$$P_d = \frac{AR^2}{a} \text{ – безрозмірна швидкість нагрівання;} \quad (10)$$

$$\eta = \frac{r}{R} \text{ – відносний радіус;} \quad (11)$$

$$Q_c = \frac{T_c + C}{C} \text{ – відносна безрозмірна температура.} \quad (12)$$

Підставлення цих перемінних в загальне диференціальне рівняння теплопровідності (3) в циліндричних координатах приводить до виразу:

$$\frac{dQ}{dF_0} = \frac{\partial^2 Q_c}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{\partial Q_c}{\partial \eta}. \quad (13)$$

З граничними умовами:

$$Q_c(0, \eta) = 1; \quad Q_c(F_0, 1) = Q = e^{P_d F_0};$$

$$Q_c(F_0, \eta) \neq \pm \infty;$$

$$\left. \frac{\partial \theta_c}{\partial \eta} \right|_{\eta=0} = 0.$$

Рішення цього рівняння має такий вигляд:

$$Q_c(F_0, \eta) = \frac{I_0(\eta\sqrt{P_d})}{I_0(\sqrt{P_d})} e^{P_d F_0} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2j_0(\mu_n \eta)}{\mu_n J_1(\mu_n)} \left(1 - \frac{\mu_n^2}{P_d + \mu_n^2} \right) e^{-\mu_n^2 F_0}, \quad (14)$$

де I_0 – модифікована функція Беселя I роду нульового порядку; j_0 – функція Беселя I роду нульового порядку; μ_n – корінь характеристичного рівняння $I_0(\mu_n) = 0$; j_1 – функція Беселя I роду першого порядку.

Вираз для $Q_c(F_0, \eta)$ дозволяє розрахувати відносну безрозмірну температуру в будь-якій точці серцевини самозахисного порошкового дроту, що знаходиться на вильоті.

На вісі дроту, тобто при $\eta = 0$, цей вираз приймає вигляд:

$$Q_c(F_0, 0) = \frac{e^{P_d F_0}}{I_0 \sqrt{P_d}} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{P_d}{P_d + \mu_n^2} \frac{1}{\mu_n j_1(\mu_n)} e^{-\mu_n^2 F_0}. \quad (15)$$

Таким чином, можна зробити висновок, що температура вісі дроту мінімальна на даній ділянці дроту, так як $I_0(0) = 1 = \min(I_0)$. Вона найбільш залежить від початкового розподілу температур.

Теплота, що накопичується в металі оболонки та порошку серцевини від проходження зварювального струму дорівнює:

$$\left((c\gamma)_0 \Delta T_0 \cdot (d_0^2 - d_c^2) + (c\gamma)_c d_0^2 \right) \cdot V_{n.d} \cdot t \cdot \frac{1}{4} \pi = Q_c. \quad (16)$$

Згідно з моделлю теплопередачі тепловий баланс в джгутовому дроті складається з трьох частин:

$$\Theta C = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (17)$$

де Q_1 – випромінювання тепла в навколишній простір:

$$Q_1 = \alpha (T_n - T_0) \frac{1}{3} \pi R V_{n.d} t, \quad (18)$$

де α – коефіцієнт поверхневої тепловіддачі; T_n – температура;
 Q_2 – теплопередача через оболонки джгутового порошкового дроту до сусідніх:

$$Q_2 = -\lambda \frac{\partial T_n}{\partial r} \frac{2}{3} \pi R V_{n.d.} t, \quad (19)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності; $\frac{\partial T_n}{\partial r}$ – нерівномірність розподілу температури, градієнт температури по перерізу джгутового порошкового дроту;
 Q_3 – теплопередача від сумісного плавлення внутрішніх перетинок дугою;

$$Q_3 = \frac{1}{3} \eta_e I_{зв} U_{д} t, \quad (20)$$

де η_e – ККД (коефіцієнт корисної дії) нагрівання сердцевини дротів дугою; $I_{зв}$ – величина зварювального струму, А; $U_{д}$ – напруга зварювальної дуги, В.

Таким чином, диференційне рівняння теплового балансу в джгутовому дроті при нагріванні зварювальним струмом та електричною дугою має вигляд:

$$\left[(c\gamma)_0 \Delta T_0 (d_0^2 - d_c^2) + (c\gamma)_c Q_c d_c^2 \right] \frac{1}{4} \pi V_{п.д} t = \alpha (T_n - T_0) \frac{1}{6} \pi d_0 V_{п.д} t + \lambda \frac{\Delta T_n}{\Delta r} \frac{2}{6} \pi d V_{п.д} t + \frac{1}{3 \eta_e} I_{зв} U_{д} t \quad (21)$$

ВИСНОВКИ

Рішення рівняння (20) дозволяє одержати температуру точки перерізу джгутового порошкового дроту в залежності від часу і на будь-якій відстані від електродної плями.

Розроблено модель теплопередачі по перерізу джгутового самозахисного порошкового дроту, яка відповідає фізичним процесам, що протікають при проходженні зварювального струму на вильоті електроду. Завершеність цих процесів до моменту оплавлення дроту залежить від складу сердечнику та умов підводу тепла до нього, що визначаються режимом зварювання, а також розмірами та конструкцією дроту і фізико-хімічними властивостями сердечнику.

ЛІТЕРАТУРА

1. Деклараційний патент на винахід (21)2001052978 (46). Джгутовий порошковий дріт для зварювання і наплавлення. – 15.10.2002, Бюл. № 10.
2. Теплофизические свойства веществ. Справочник / Под ред. проф. Н. Б. Варгафтика. – Москва–Ленинград : Энергия, 1956. – 367 с.
3. Сварочные материалы для сварки сталей и чугуна. Справочник / Под ред. канд. техн. наук В. Н. Горпенюка. – Киев, 1996. – 530 с.
4. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике. Справочник / Под ред. канд. техн. наук Б. Е. Неймарка. – Москва–Ленинград : Энергия, 1967. – 300 с.
5. Юзвенко Ю. А. Модель плавления самозащитной порошковой проволоки / Ю. А. Юзвенко, Г. А. Кирилюк, С. Ю. Кривчинов // Автоматическая сварка. – 1983. – № 1. – С. 26–29.
6. Кирилюк С. А. Особенности нагрева и плавления сердечника порошковой проволоки при различных конструкциях ее оболочки / С. А. Кирилюк // Автоматическая сварка. – 1989. – № 7. – С. 23–27.
7. Коринец И. Ф. Математическая модель плавления электродной проволоки при дуговой сварке / И. Ф. Коринец // Автоматическая сварка. – 1995. – № 10. – С. 39–43.