УДК 621.791.01.04

Корінець І. П., Бойко В. П., Мисечко В. В.

МОДЕЛЮВАННЯ НАГРІВУ МЕТАЛЕВОГО ПОКРИТОГО ЕЛЕКТРОДУ ПРИ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

Дугове зварювання металевим покритим електродом залишається сучасним поширеним способом зварювання. Не зважаючи на те, що розроблено сотні марок покритих електродів [1], наукові дослідження з метою удосконалення існуючих марок електродів і розробки нових не припиняються [2, 3]. Це пов'язано з розробкою електродів для нових конструкційних матеріалів, використанням нових мінералів і сировини та удосконаленням існуючих марок електродів.

Одною із суттєвих зварювально-технологічних характеристик покритих електродів є обмеження максимальної температури нагрівання. М. М. Рикалін вперше встановив [4], що температура нагріву електрода по довжині нерівномірна. Вона зростає від початкової температури електрода, яка дорівнює температурі навколишнього середовища, до максимальної при закінченні процесу зварювання. Це породжує нерівномірність швидкості плавлення електроду і формування (глибини, ширини)по довжині шва. Але перегрівання покриття може викликати і інші негативні явища, наприклад, передчасну дисоціацію газоутворювальних компонентів та хімічні реакції між іншими компонентами [3, 4], які суттєво залежать від температури і, очевидно, будуть різними на початку і в кінці використання електроду. Наслідком цього слід очікувати нестабільність якості шва по його довжині.

Метою даної роботи є розробка більш досконалої математичної моделі нагріву електрода струмом, яка дозволяла б враховувати склад і товщину покриття, залежність теплофізичних характеристик компонентів покриття та стрижня від температури.

Робота складається з двох частин – експериментальної і теоретичної. Експериментальна частина виконана з метою оцінки адекватності розробленої моделі. Для експериментів використані відомі електроди з основним покриттям УОНИ-13/55 і з рутилово-основним покриттям МР-3, а також дослідні електроди типу Э-10Х25Н13Г2 з основним покриттям з різним співвідношенням компонентів $CaCO_3/CaF_2$ і з рутиловим покриттям з різним співвідношенням $TiO_2/6SiO_2{\cdot}Al_2O_3{\cdot}K_2O$. Діаметр стрижня електродів 3 мм, діаметр електрода з покриттям 4,6 і 5,2 мм, зварювальний струм 95–100 А, напруга 28 В. Зварювання виконували на постійному струмі зворотної полярності, джерело живлення – випрямляч ВДУ-504-1У3. Параметри зварювання (струм і напруга) фіксували мультиметром BENNING CM5 з використанням аналізатора зварювальних процесів АЗП-19. Реєстрація температури виконувалась на комп'ютері за допомогою хромель-алюмелєвої термопари, мультиметра Fluke 189 і аналого-цифрового перетворювача АЦП. Для запису і обробки даних використані програми L-Graph і Power Graph.

Задача теоретичної частини роботи – визначити температуру нагріву покритого електроду струмом. Нагрів електрода дугою з торця діє на невеликій відстані (до 10 мм) і нами не враховувався. Тому фізична модель нагріву електрода відображає ділянку, на яку не діє тепло дуги (рис. 1). Прийняті також інші припущення: покриття не є електропровідним, перепад температурний по поперечному перерізу електроду незначний у зв'язку з великої теплопровідністю металевого стрижня і невеликою товщиною покриття. Також не враховується нагрівання електрода від контактного опору в електродотримачі.

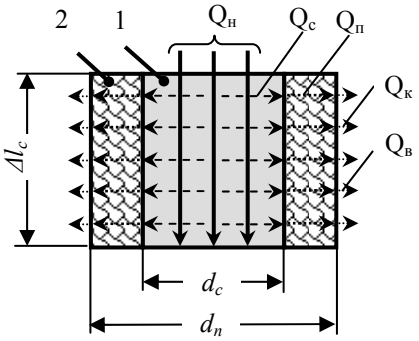

Рис. 1. Фізична модель нагріву ділянки покритого електроду струмом:

1 – металевий стрижень; 2 – покриття; Δl_c – ділянка покритого електрода; d_c – діаметр електрода (стрижня); $d_п$ – зовнішній діаметр покриття; $Q_н$ – тепло, яке виділяється в стрижні від проходження струму; $Q_с$ – витрати тепла на нагрів стрижня; $Q_п$ – витрати тепла на нагрів покриття; $Q_к$. і $Q_в$ – відповідно віддача тепла бічною поверхнею електрода за рахунок конвекції і випромінювання

Тепловий баланс нагріву електрода струмом складає:

$$Q_н = Q_с + Q_п + Q_к + Q_в . \tag{1}$$

Тепло, що виділяється при проходженні електричного струму через електродний стрижень визначаємо за законом Джоуля-Ленца:

$$Q_н = I^2 \cdot R_c \cdot t = I^2 \cdot \rho_c \frac{l_c}{F_c} \cdot t = I^2 \cdot \rho_c \cdot \frac{4 \cdot l_c}{\pi \cdot d_c^{\,2}} \cdot t , \tag{2}$$

де I – зварювальний струм; l_c – поточна довжина стрижня; t – час зварювання; ρ_c – питомий опір металу стрижня.

Кількість теплоти, що витрачається на нагрів електродного стрижня:

$$Q_с = c_c \cdot \gamma_c \cdot V_c \cdot (T - T_o) = c_c \cdot \gamma_c \cdot l_c \cdot \frac{\pi \cdot d_c^{\,2}}{4} \cdot (T - T_o) , \tag{3}$$

де c_c і γ_c – питома теплоємність і густина металу стрижня; T_o і T – початкова і поточна температура стрижня.

Кількість теплоти, що витрачається на нагрів покриття:

$$Q_п = c_п \cdot \gamma_п \cdot V_п \cdot (T - T_o) = c_п \cdot \gamma_п \cdot l_c \cdot \frac{\pi \cdot d_п^{\,2} - \pi \cdot d_c^{\,2}}{4} \cdot (T - T_o) , \tag{4}$$

де $c_п$ і $\gamma_п$ – питома теплоємність і густина електродного покриття.

Кількість теплоти, що втрачається за рахунок конвективного теплообміну через бічну поверхню електрода, визначаємо за правилом Ньютона:

$$Q_к = \alpha_к \cdot t \cdot F_п \cdot (T - T_o) = \alpha_к \cdot t \cdot l_c \cdot \pi \cdot d_п \cdot (T - T_o) , \tag{5}$$

де $\alpha_к$ – коефіцієнт конвективного теплообміну.

Кількість теплоти, що втрачається за рахунок випромінювання через бічну поверхню електрода, складає:

$$Q_в = \alpha_в \cdot t \cdot F_n \cdot (T - T_o) = \alpha_в \cdot t \cdot l_c \cdot \pi \cdot d_n \cdot (T - T_o)\,, \tag{6}$$

де $\alpha_в$ – коефіцієнт теплообміну випромінюванням.

Після підстановки та скорочення отримаємо формулу для розрахунку поточної температури:

$$T = \frac{16 \cdot \rho_c \cdot I^2 \cdot t}{\pi^2 \cdot d_c^{\,2}(c_c \cdot \gamma_c \cdot d_c^{\,2} + c_n \cdot \gamma_n \cdot \left(d_n^{\,2} - d_c^{\,2}\right) + 4 \cdot (\alpha_к + \alpha_в) \cdot d_n \cdot t)} + T_o\ . \tag{7}$$

Розрахункові та експериментальні температури нагріву електродів.

Для сталевих електродів допустима температура становить не більше 600 °С. Тому нам достатньо мати залежність фізичних властивостей компонентів електрода до 800 °С.

Фізичні властивості металу стрижнів (γ_c, ρ_c, c_c) отримані за даними довідників [5]. Різниця між питомими опорами при порівнянні високолегованої сталі з вуглецевою особливо помітна в діапазоні низьких температур (рис. 2).

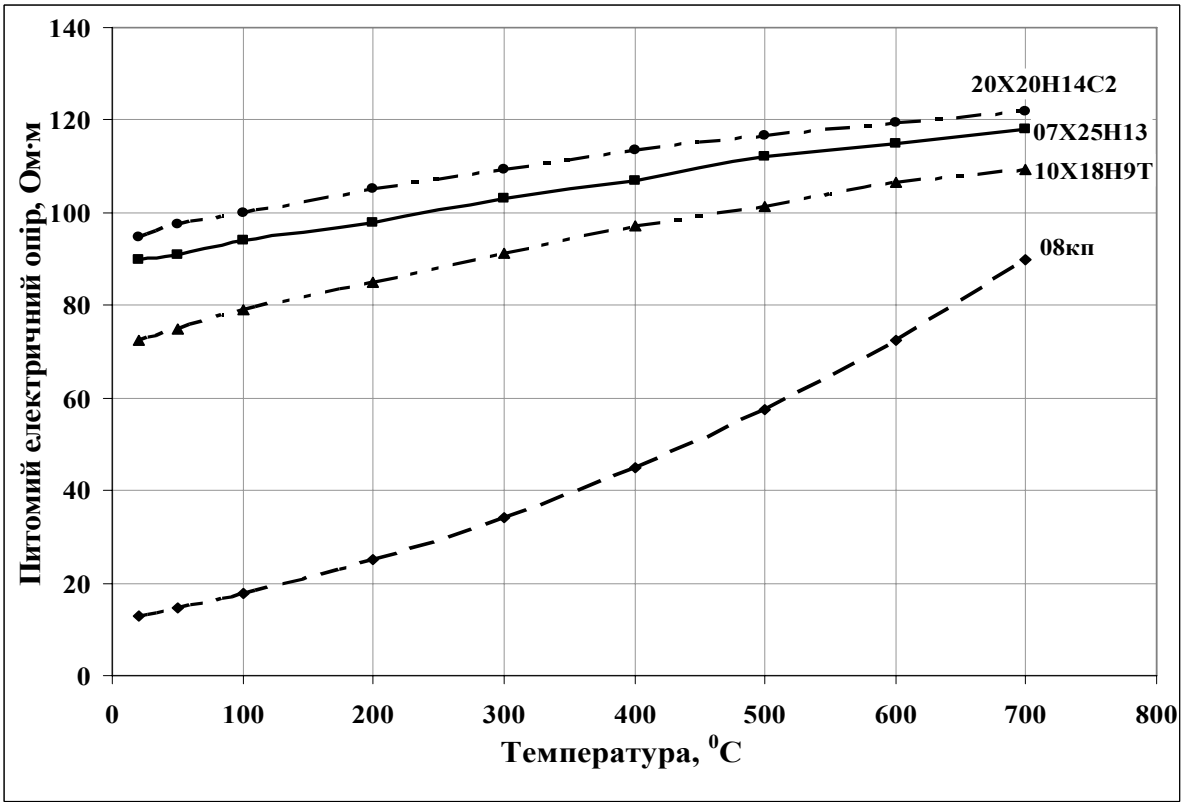

Рис. 2. Залежність питомого електричного опору сталей від температури [5]

Питома теплоємність c_c в діапазоні температур до 600 °С для металу електродних стрижнів із низьковуглецевої нелегованої сталі і високолегованих аустенітних сталей різниться не суттєво (рис. 3).

Фізичні властивості покриття (γ_n, c_n). Густина γ_n компонентів покриття наведена в роботах [6, 7]. У зв'язку з відсутністю довідкових даних щодо питомої теплоємності покриття c_n визначаємо теплоємність окремих компонентів розрахунковими методами [8, 9].

На рис. 4 показана залежність питомої теплоємності компонентів покриття від температури. Відомості стосовно коефіцієнту конвективного теплообміну $\alpha_к$ і коефіцієнту теплообміну випромінюванням $\alpha_в$ отримано із робіт [10–12].

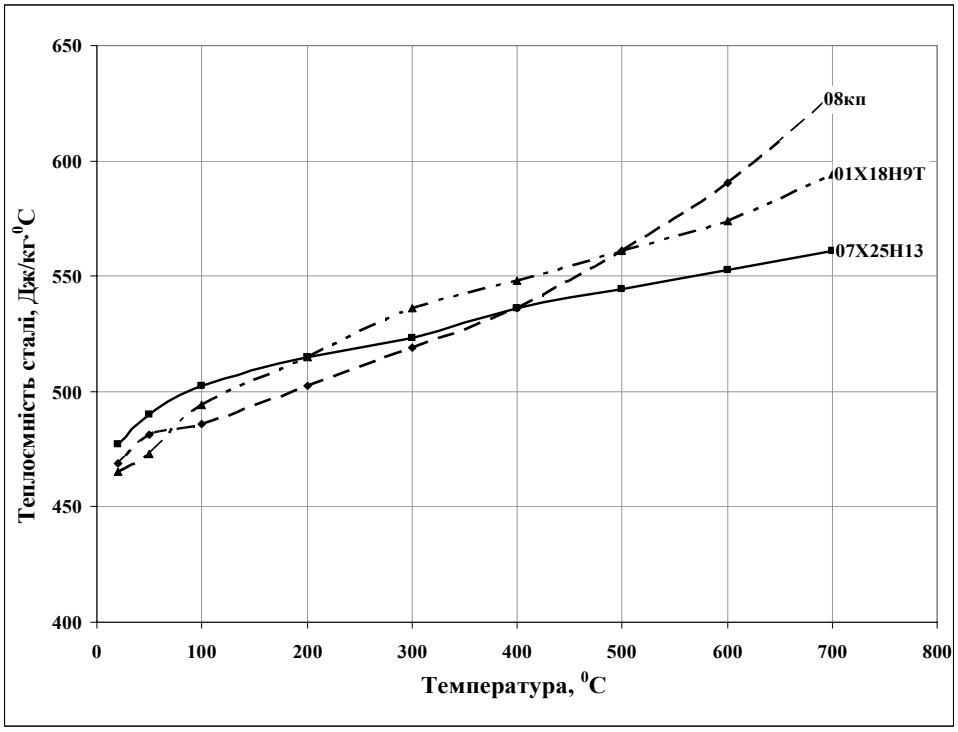

Рис. 3. Залежність питомої теплоємності металу стрижнів від температури [5]

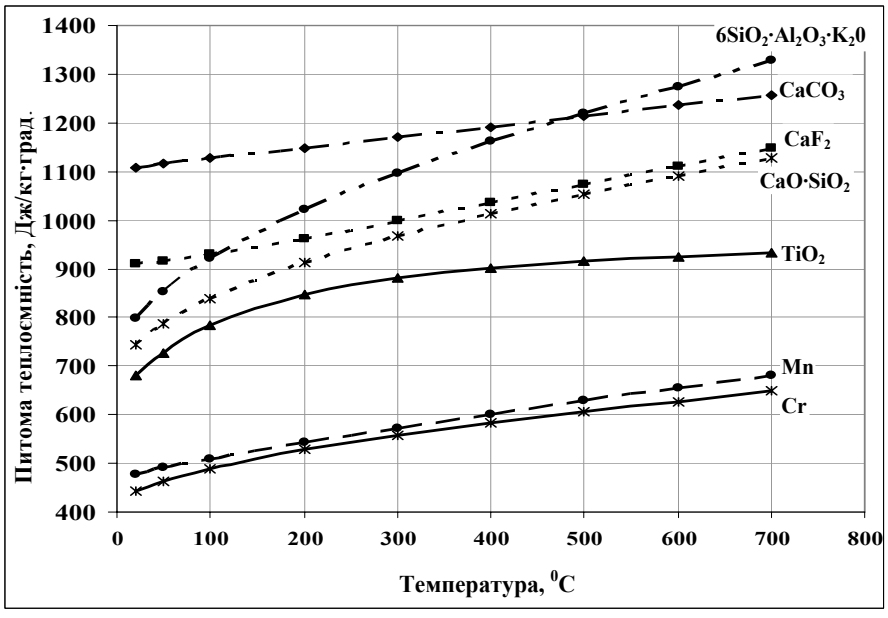

Рис. 4. Залежність питомої теплоємності компонентів електродного покриття від температури

Приклад розрахунку нагріву електроду загального призначення з рутилово-основним покриттям МП-3 (стрижень Св-08А) з метою оцінки адекватності розробленої математичної моделі наведено в табл. 1. Порівняння розрахункових температур з експериментальними показує, що розроблена математична модель дає задовільні результати.

Таблиця 1

Температура нагріву електрода МР-3

t, с	$\gamma_с$, кг/м^3	$\gamma_п$, кг/м^3	$\rho_с \cdot 10^6$, Ом·м	$c_с$, Дж/кг·°С	$c_п$, Дж/кг·°С	$\alpha_к$, Дж/м^2·с·°С	$\alpha_в$, Дж/м^2·с·°С	$T_{роз}$, °С	$T_{екс}$, °С
0	7871	3956	0,13	469	691	2,58	17,80	20	20
5	7866	3956	0,14	475	710	2,79	10,00	35	36
10	7861	3956	0,15	481	730	3,12	9,36	51	57
15	7850	3956	0,16	484	745	3,43	10,74	69	82
20	7846	3956	0,18	486	763	3,74	12,11	92	103
25	7838	3956	0,20	490	775	3,95	13,87	118	126
30	7830	3956	0,23	494	788	4,18	15,63	152	157
35	7814	3956	0,25	502	814	4,37	17,39	182	200
40	7798	3956	0,29	510	830	4,62	21,10	228	242
45	7781	3956	0,34	519	847	4,80	23,50	287	303

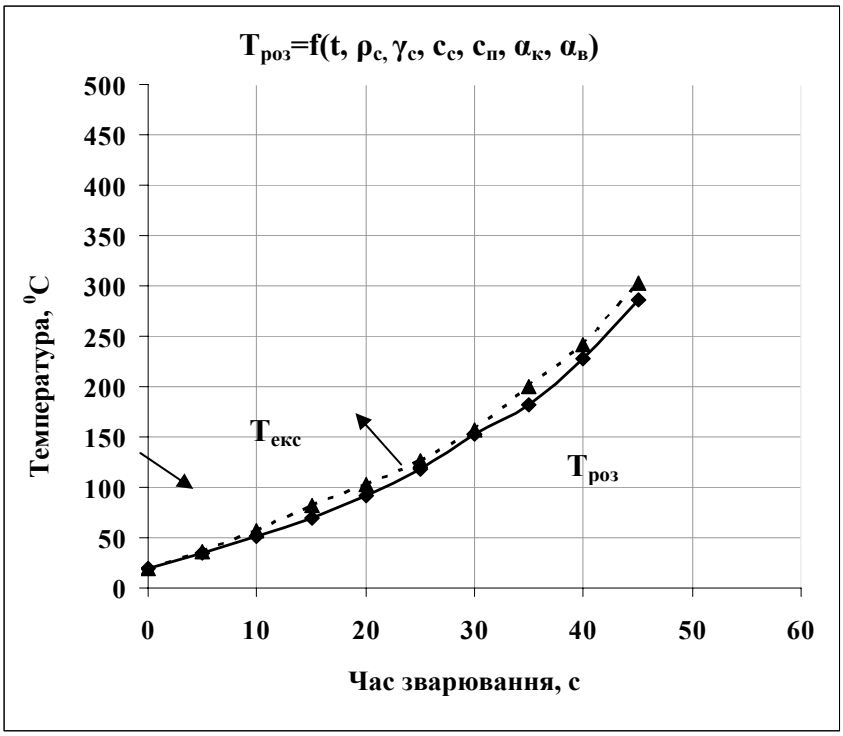

Рис. 5. Експериментальна та розрахункова температури нагріву електроду МР-3.

Надалі модель використана для розрахунку температури нагріву дослідних електродів для зварювання аустенітних сталей (стрижень Св-07Х25Н13, покриття рутилове і основне з різним співвідношенням компонентів). В зв'язку з обмеженням об'єму статті розрахункові дані і графіки не приводяться.

ВИСНОВКИ

1. Теплофізичні властивості металу стрижнів і компонентів покриття суттєво залежать від температури. Зі збільшенням температури густина зменшується, всі інші показники збільшуються.

2. Розроблена математична модель показує високий рівень адекватності при розрахунку нагріву електродів загального призначення (МР-3, УОНИ-13/55). Розрахунок нагріву ек-

спериментальних покритих електродів з високолегованим стрижнем типу Св-07Х25Н13 дає завищену температуру у порівнянні з експериментальною. Це пов'язано з відсутністю врахування витрат тепла на дисоціацію карбонатів, випаровування води (вільної і кристалізаційної) та інших компонентів з низькою температурою кипіння. Підвищення точності розрахунків на даному етапі досягнуто введенням корегувального коефіцієнту. Середня похибка температури нагріву покритих електродів для зварювання високолегованих сталей складає не більше 30 °С, а електродів загального призначення – не більше 5 °С.

2. Покриття основного виду має більшу (приблизно на 25 %) питому теплоємність ніж покриття рутилового виду, що пояснюється більшим вмістом у покриті основного виду таких компонентів як мармур та флюорит, питома теплоємність яких значно перевищує даний показник для рутилового концентрату та польового шпату.

3. Серед електродів з покриттям основного виду найбільше нагріваються електроди з максимальним вмістом флюориту та мінімальним вмістом мармуру, що пояснюється меншою питомою теплоємністю флюориту у порівнянні з мармуром та зменшенням впливу ендотермічної реакції дисоціації мармуру. Експериментальні електроди з рутиловим видом покриття незалежно від співвідношення $TiO_2/6SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot K_2O$ нагріваються практично однаково. При цьому температура їх нагріву досягає значень, характерних для експериментальних електродів з покриттям основного виду при співвідношенні $CaCO_3/CaF_2 \approx 1$.

4. Оцінка витрат тепла при нагріві експериментальних електродів показує, що найбільша кількість тепла витрачається на нагрів електродного стрижня і покриття. Втрати тепла на теплообмін з навколишнім середовищем шляхом конвекції та випромінювання незначні. Рекомендується виготовляти електроди з підвищеним діаметром покриття, оскільки збільшення товщини покриття суттєво зменшує їх нагрів.

5. Отримана модель може бути використана спеціалістами-розробниками покритих електродів при виготовленні нових електродів загального та спеціального призначення з метою розрахунку температури нагріву і прогнозування передчасної дисоціації компонентів, окислення феросплавів і можливого розтріскування електродного покриття.

ЛІТЕРАТУРА

1. Тархов Н. А. Производство металлических электродов / Н. А. Тархов, З. А. Сидлин, А. Д. Рахманов. – М. : Высшая школа, 1986. – 288 с.

2. Bracarense A. Q. Chemical composition and hardness control by endothermic reactions in the coating of covered electrodes / A. Q. Bracarense, S. Liu, T. P. Quinn // Supplement to the Welding Journal. – December 1997. – S. 509–516.

3. Металлургия дуговой сварки. Процессы в дуге и плавление электродов / Под ред. И. К. Походни. – Киев : Наукова думка, 1990. – 221 с.

4. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке : учебное пособие / Н. Н. Рыкалин. – М. : Машгиз, 1951 – 296 с.

5. Теплофизические свойства веществ. Справочник / Под ред. проф. Н. Б. Варгафтика. – Москва-Ленинград : Энергия, 1956. – 367 с.

6. Крюковский Н. Н. Производство электродов для дуговой сварки / Н. Н. Крюковский. – М. : Машгиз, 1956. – 277 с.

7. Гарник И. И. Производство металлических электродов / И. И. Гарник, Г. М. Пиолунковский. – М. : Металлургия, 1975. – 226 с.

8. Уикс К. Е. Термодинамические свойства 65 элементов, их окислов, галогенидов, карбидов и нитридов / К. Е. Уикс, Ф. Е. Блок. – М. : Металлургия, 1965. – 240 с.

9. Кэй Дж. Таблицы физических и химических постоянных / Дж. Кэй, Т. Лэби. – 2-е изд., перераб. – М. : Госиздат физмат литературы, 1962. – 248 с.

10. Теплотехнический справочник. Том 2-й / Под ред. С. Г. Герасимова, Я. А. Кагана, П. Д. Лебедева. – Москва-Ленинград : Энергоиздат, 1958. – 672 с.

11. Исаченко В. П. Теплопередача : учебник для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – 3-е изд., перераб. – М. : Энергия, 1975. – 486 с.

12. Краснощеков Е. А. Задачник по теплопередаче : учебное пособие для вузов / Е. А. Краснощеков, А. С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. – М. : Энергия, 1980. – 288 с.