

УДК 621.791.754.264:001.891.573

О. Петрієнко, канд. техн. наук

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ

ДО РОЗРАХУНКУ ДОВЖИНИ ВИЛЬОТУ ЕЛЕКТРОДА ПРИ МЕХАНІЗОВАНОМУ ЗВАРЮВАННІ СТАЛЕЙ У ЗАХИСНИХ ГАЗАХ

***Резюме.** Роботу присвячено визначенню довжини зон вильоту електрода, в яких нагрів електрода визначається власно нагрівом від струму та нагрівом від краплі. Це дозволяє з великою точністю визначати необхідне значення довжини вильоту електрода під час зварювального процесу для забезпечення його якості.*

***Ключові слова:** механізоване дугове зварювання, захисні гази, режими зварювання, методика розрахунку, швидкість подачі, виліт електрода.*

O. Petriyenko

ON CALCULATION OF ELECTRODE EXTENSION LENGTH UNDER MECHANISED WELDING OF STEELS IN PROTECTIVE GASES

***Summary.** The work is devoted to determination of the zones of electrode extension, in which electrode heating is determined by heating from electric current and heating from the drop. Thermal processes in these sections of electrode extension are described by different equations. Point of "junction" of these solutions is located in some distance from the boundary of the electrode with the drop and is characterized by electrode preheating temperature and length of the part of electrode extension corresponding to this temperature.*

The presented calculation procedure is based on solution of the Fourier's differential equation of heat conductivity with introduction of virtual limits and boundary conditions of the fourth kind. This is a problem with inner nonlinearity, as the thermophysical parameters depend on temperature. If the electrode preheating temperature is assigned in calculations, it will be exactly the mandatory additional condition that allows solving the problem of heat balance. Thus, after certain transformations, expressions were derived which allow calculation of temperature gradient in the first section of electrode extension and temperature gradient in a point with temperature that is equal to that of electrode preheating.

Derived equations allow to determine on the length of electrode extension section that is adjacent to the drop, where an abrupt temperature rise begins, because of the heat coming from the drop. Given calculations allowed plotting a graph which make possible to determine on the portion of temperature gradient increment due to heat coming from the drop. A point with zero coordinate on abscissa axis corresponds to the boundary between the electrode and the drop.

Having determined the length of electrode extension section adjacent to the drop, it is also possible to determine the full length of electrode extension.

Thus, the described calculation procedure yields a precised value of length of the zone, in which electrode heating is determined by heating from passing current, and length of electrode zone, in which the main thermal processes are determined by heating from the drop. This enables studying the heat balance of the drop in a more detailed and accurate manner than before.

***Key words:** mechanized arc welding, shielding gases, welding, method of calculation, feed rate, electrode extension.*

У роботах [1, 2, 3] описано метод розрахунку режимів механізованого дугового зварювання сталей у захисних газах без коротких замикань, що характеризується урахуванням залежності теплофізичних параметрів процесу від температури, обліком тепла, що надходить у виліт електрода від краплі, а також уведенням рухомої віртуальної межі з граничними умовами IV роду. Показано, що умовно виліт електрода може бути поділений на два інтервали (рис. 1): ділянка, що примикає до мундштука і нагрівається електричним струмом, на якій вплив тепла, що йде від краплі, є несуттєвим ($0 < l \leq l_1$); та ділянка вильоту електрода, яка примикає до краплі Δl і, на якій відбувається нагрівання під дією електричного струму і тепла, що надходить за рахунок теплопровідності від краплі ($l_1 < l \leq l_e$), де відбувається різке підвищення температури. Теплові процеси на цих ділянках вильоту електрода описуються різними рівняннями. Точка «сполучення» цих рішень міститься на відстані Δl від межі електрода з краплею і характеризується температурою попереднього підігріву T_1 електрода і відповідною цій температурі довжиною частини вильоту електрода, яка дорівнює l_1 .

Поставлене завдання вирішується при введенні кількох припущень: на інтервалі $0-l_1$ теплові процеси розраховуються з урахуванням нелінійних залежностей теплофізичних параметрів від температури, а на інтервалі Δl завдання вирішується при середніх для цього інтервалу теплофізичних параметрах; під температурою краплі розуміється її середнє значення [4, 5]; втратами тепла на конвекцію і випромінювання нехтуємо, зважаючи на незначний вплив цих факторів на теплові процеси у вильоті електрода [6 – 13].

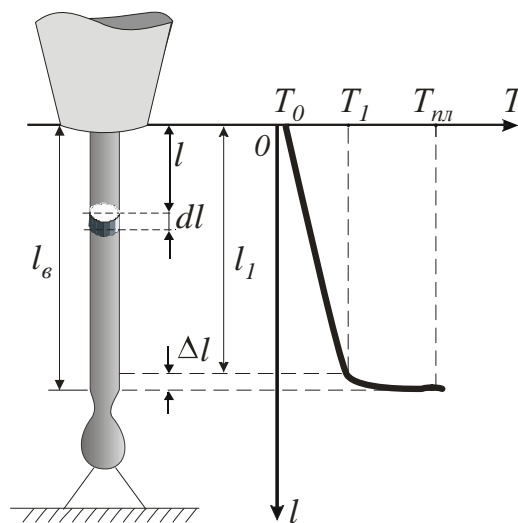


Рисунок 1. Схема розподілу температури по довжині вильоту електрода

Figure 1. Scheme of the temperature distribution along the length of electrode extension

Представлений метод розрахунку розподілу температури по довжині вильоту електрода [1, 2, 3] засновано на розв'язанні диференційного рівняння теплопровідності Фур'є. При цьому вирази, що описують розподіл температури та падіння напруги на 1-й ділянці вильоту електрода до точки з температурою T_1 , не є дійсними на 2-ій ділянці

вильоту Δl . Вирішення цього завдання базується на введенні рухомих віртуальних кордонів і граничних умов IV роду [14, 15] й дозволяє визначити довжину ділянки вильоту електрода l_1 і довжину Δl . Це завдання з внутрішньою нелінійністю, тому що теплофізичні параметри залежать від температури [14]. Якщо при розрахунках задаватися температурою T_1 , то це і буде тією необхідною додатковою умовою, яка дозволяє вирішити завдання теплового балансу. Таким чином, після певних перетворень [1, 2, 3] були отримані вирази, що дозволяють розрахувати:

- градієнт температури на 1-й ділянці вильоту електрода в зоні, де впливом тепла від краплі можна знехтувати (нагрів тільки змінним струмом):

$$\frac{dT}{dl} = \frac{\rho(T) j^2}{\gamma C_p(T) v_n}, \quad (1)$$

де T – поточне значення температури на вильоті електрода; $\rho(T)$ – питомий електричний опір металу, Ом·м; j – щільність струму, А/м²; γ – щільність металу електрода, кг/м³; $C_p(T)$ – ізобарна теплоємність одиниці маси, Дж/(кг·К); v_n – швидкість подачі дроту, м/с;

- градієнт температури на 1-й ділянці вильоту електрода в точці з температурою $T=T_1$:

$$\left. \frac{dT}{dl} \right|_{T=T_1} = \frac{\rho(T_1) j^2}{\gamma C_p(T_1) v_n}. \quad (2)$$

Рівняння, що дозволяє визначати поточне значення довжини на першій ділянці вильоту електрода від мундштука до точки з температурою T_1 , має вигляд [1]

$$l = \frac{\gamma v_n}{j^2} \int_{T_0}^T \frac{C_p(T)}{\rho(T)} dT, \quad (3)$$

де T_0 – початкова температура електрода при виході з мундштука.

Звідси довжина вильоту електрода від мундштука до точки з температурою T_1 , якщо відомі величини T_1 і T_0 , дорівнює [1]

$$l_1 = \frac{\gamma v_n}{j^2} \int_{T_0}^{T_1} \frac{C_p(T_1)}{\rho(T_1)} dT. \quad (4)$$

Тут при розрахунку можна використовувати нелінійні апроксимації $C_p(T)$ і $\rho(T)$ [3].

У роботах [1, 2] наведено рівняння, що описує нагрів вильоту електрода на другій ділянці, але вже з урахуванням теплопровідності і нелінійності теплофізичних параметрів

$$\frac{d^2T}{dl^2} - \gamma v_n \frac{C_p(T)}{\lambda(T)} \frac{dT}{dl} + \frac{\rho(T) j^2}{\lambda(T)} = 0, \quad (5)$$

де $\lambda(T)$ – теплопровідність електродного металу, Вт/(м·К).

Позначимо коефіцієнти цього рівняння, що залежать від температури, у вигляді

$$a(T) = \gamma \cdot v_n \cdot \frac{C_p(T)}{\lambda(T)}, \quad b(T) = j^2 \cdot \frac{\rho(T)}{\lambda(T)}.$$

Зазвичай для отримання аналітичного рішення на ділянці вильоту $\Delta l = l_e - l_1$ використовуються усереднені значення a і b [1] теплофізичних параметрів на інтервалі Δl із застосуванням апроксимацій $C_p(T)$, $\rho(T)$ і $\lambda(T)$ [1, 3].

Тут же нам потрібно отримати якомога точніше рішення в точці з $T=T_1$. Тому як розрахункові приймемо локальні значення коефіцієнтів у точці з координатами $T=T_1$ $l=l_1$

$$a = \gamma \cdot v_n \cdot \frac{C_p(T_1)}{\lambda(T_1)}, \quad b = j^2 \cdot \frac{\rho(T_1)}{\lambda(T_1)}. \quad (6)$$

Очевидно, що при прийнятих позначеннях a й b формула (2) набуває вигляду

$$T'(l_1) = \left. \frac{dT}{dl} \right|_{T=T_1} = \frac{b}{a}. \quad (7)$$

У роботі [1] отримано уточнені розв'язки рівняння теплопровідності (5) при фіксованих значеннях коефіцієнтів a і b . Ці розв'язки мають вигляд:

- для температури на ділянці Δl для $l_1 \leq l \leq l_e$

$$T(l)_y = \frac{e^{a(l-l_1)} - 1}{e^{a \cdot \Delta l} - 1} \left[T_{nl} - T_1 - \frac{b \cdot \Delta l}{a} \right] + T_1 + \frac{(l-l_1)b}{a}, \quad (8)$$

де T_{nl} – температура плавлення електрода;

- для градієнта температури в точці «сполучення» з $T(l_1) = T_1$

$$T'(l_1)_y = \frac{a(T_{nl} - T_1) - b \cdot \Delta l}{e^{a \cdot \Delta l} - 1} + \frac{b}{a}. \quad (9)$$

Порівнюючи праві частини виразів (7) і (9), доходимо висновку, що перший доданок у правій частині (9) являє собою приріст градієнта температури, викликаний урахуванням потоку тепла, що йде від краплі за рахунок теплопровідності. Відносне збільшення градієнта температури $F(\Delta l)$ в точці l_1 дорівнюватиме

$$F(\Delta l) = \frac{T'(l_1)_y}{T'(l_1)} - 1 = \frac{a(T_{nl} - T_1) - b \cdot \Delta l}{(e^{a \cdot \Delta l} - 1) \frac{b}{a}} \quad (10)$$

Вираз (10) дозволяє визначити величину Δl , при якій в точці з $T=T_1$ при $l = l_1$ починається різке підвищення температури за рахунок потоку тепла, що йде від краплі за рахунок теплопровідності. Для цього за рівнянням (10) при використанні коефіцієнтів a і b за формулами (6) побудуємо графік, який дозволяє визначити частку приросту градієнта $F(\Delta l)$ за рахунок тепла, що надходить від краплі (рис. 2). Точка з координатою 0 на осі абсцис відповідає межі між електродом і краплею. Тут немає суворої фізичної межі, яка відділяла б зону Δl від решти частини електрода. Тому як цю межу можна брати точку на початку різкого зростання кривої $F(\Delta l)$.

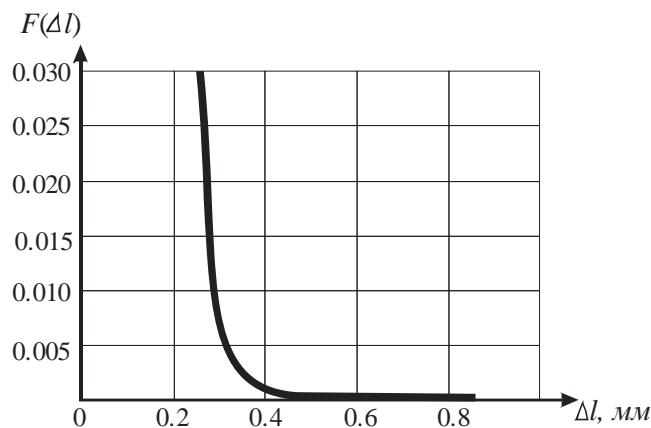


Рисунок 2. Визначення приросту градієнта $F(\Delta l)$ за рахунок тепла, що надходить від краплі ($d = 0,8$ мм, $I = 195$ А, $T_1 = 700$ К, $v_n = 0,217$ м/с, $j = 3,88$ А/мм², $C_p(T_1) = 600,2$ Дж/кг · К, $\rho(T_1) = 5,34 \cdot 10^{-7}$ Ом · м, $\lambda(T_1) = 44,63$ Дж/кг і $\gamma = 7,86 \cdot 10^3$ кг/м³).

Figure 2. Determination of increment of gradient $F(\Delta l)$ due to the heat coming from the drop ($d = 0,8$ mm, $I = 195$ A, $T_1 = 700$ K, $v_n = 0,217$ m/s, $j = 3,88$ A/mm², $C_p(T_1) = 600,2$ J/kg · K, $\rho(T_1) = 5,34 \cdot 10^{-7}$ Ohm · m, $\lambda(T_1) = 44,63$ J/kg and $\gamma = 7,86 \cdot 10^3$ kg/m³).

Можна вважати, що коли $F(\Delta l) \leq 0,005$ (0,5 %), то потоком тепла, що йде від краплі за рахунок теплопровідності, можна знехтувати і Δl , що відповідає цьому рівню, може вважатися розв'язком.

Чим менше величина F , тим більше значення Δl , що отримується. Фізично це нічого не змінює, просто ми отримуємо різні межі з різним рівнем залишкового тепла, що надходить у першу ділянку вильоту (це те тепло, яким ми нехтуємо при аналізі процесів на першій ділянці).

Обчислення інтервалу Δl як функції величин v_n , j і T_1 може бути реалізовано за допомогою пакета MathCad за формулою

$$\Delta l = \text{root} [F(\Delta l) - \delta, \Delta l],$$

де δ – величина $F(\Delta l)$ відносного приросту градієнта, яка відповідає початку різкого зростання температури електрода за рахунок тепла, що надходить від краплі, і яка характеризує точність розрахунку.

Для практичних цілей рекомендується застосовувати $\delta = 0,5 \dots 1 \%$. Результати розрахунків величини Δl при $\delta = 0,5 \%$ представлено у вигляді сімейства кривих на рис. 3.

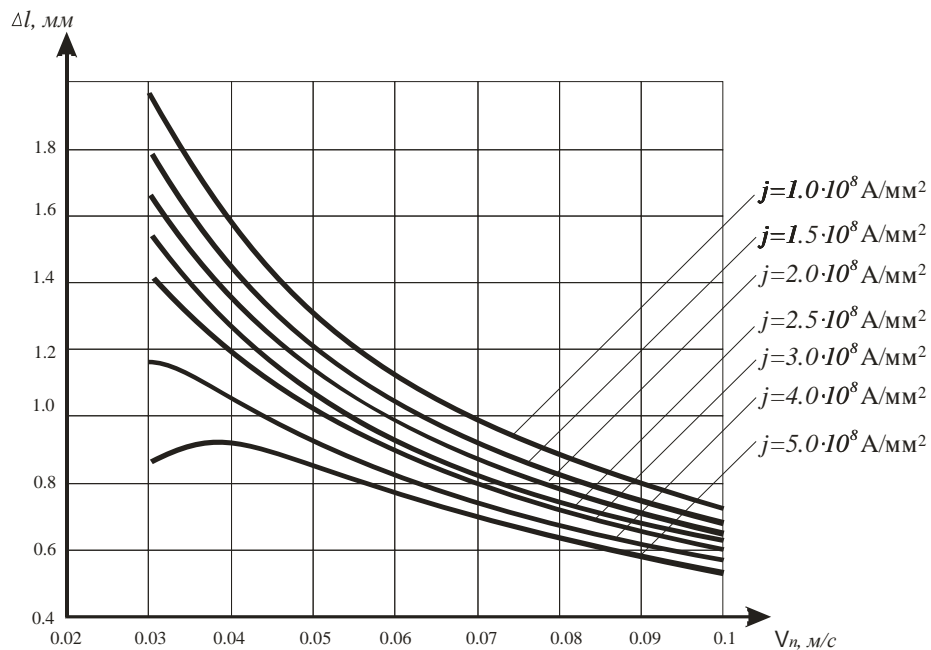


Рисунок 3. Результати обчислень інтервалу Δl (при $d = 0,8$ мм, $I = 195$ А, $T_l = 700$ К)

Figure 3. Results of calculation of Δl interval (at $d = 0,8$ mm, $I = 195$ A, $T_l = 700$ K)

Визначивши величину Δl , з урахуванням виразу (4) можна також визначити і повну довжину вильоту електрода l_e ($l_e = l_l + \Delta l$).

Висновок. Розроблений метод розрахунку дозволяє отримати уточнене значення довжини зони, в якій нагрів електрода визначається власне нагріванням від змінного струму, і довжину зони електрода, в якій основні теплові процеси визначаються нагріванням від краплі. Це дозволяє досліджувати тепловий баланс краплі детальніше й точніше, ніж раніше.

Conclusion. Developed calculation procedure yield a precised value of the length of the zone, in which electrode heating is determined by heating from passing current proper, and the length of electrode zone, in which the main thermal processes are determined by heating from the drop. This enables studying the heat balance of the drop in a more detailed and accurate manner than before.

Список використаної літератури

1. Пентегов, И.В. Расчет распределения температуры по длине вылета электрода с учетом тепла, поступающего от капли [Текст] / И.В. Пентегов, О.И. Петриенко // Автоматическая сварка. – 2003. – № 7. – С. 23 – 28.
2. Пентегов, И.В. Программа автоматизированного расчета режимов механизированной сварки сталей в среде защитных газов [Текст] / И.В. Пентегов, О.И. Петриенко // Сб. наук. праць НУК. – Миколаїв. – 2009. – № 3. – С. 158 – 168.
3. Пентегов, И.В. Метод расчета падения напряжения по длине вылета электрода с учетом нелинейности теплофизических параметров [Текст] / И.В. Пентегов, О.И. Петриенко // Автоматическая сварка. – 2002. – № 4. – С. 30 – 33.
4. Походня, И.К. Теплосодержание капель электродного металла при сварке в углекислом газе [Текст] / И.К. Походня, А.М. Суптель // Автоматическая сварка. – 1970. – № 10. – С. 6 – 8.
5. Wang, F. Modeling and analysis of metal transfer in gas metal arc welding / F. Wang, W.K. Hou, S.J. Hu, E. Kannatey-Asibu, W.W. Schultz, P.C. Wang // Journal of Physics D. – 2003. – Appl. Phys. 36. – p. 1143 – 1152.
6. Лебедев, А.В. Влияние тепловыделения в вылете электрода на процесс саморегулирования дуги [Текст] / А.В. Лебедев // Автоматическая сварка. – 1978. – № 7. – С. 10 – 15.
7. Шейнкин, М.З. Определение допустимого вылета тонкой электродной проволоки при сварке в углекислом газе [Текст] / М.З. Шейнкин // Сварочное производство. – 1978. – № 9. – С. 24 – 28.
8. Патон, Б.Е. Управление переносом металла при дуговой сварке плавящимся электродом [Текст] / Б.Е. Патон, П.П. Шейко // Автоматическая сварка. – 1965. – № 5. – С. 1 – 7.
9. Варуха, Е.Н. Расчет скорости плавления электрода при механизированной сварке [Текст] / Е.Н. Варуха, Р.Я. Докторский // Сварочное производство. – 1991. – № 6. – С. 33 – 35.
10. Ерохин, А.А. Тепловой баланс процесса капельного плавления электродов при дуговой сварке [Текст] / А.А. Ерохин // Автоматическая сварка. – 1962. – № 12. – С. 24 – 31.
11. Патон, Б.Е. Исследование процесса нагрева электрода при автоматической сварке под флюсом [Текст] / Б.Е. Патон // Труды по автоматической сварке. – 1948. – № 3. – С. 13 – 28.
12. Фролов, В.В. Теоретические основы сварки [Текст] / В.В. Фролов. – М.: Высшая школа, 1970. – 592 с.
13. Потапьевский, А.Г. Влияние составляющих режима сварки тонкой проволокой в среде углекислого газа на интенсивность металлургических реакций [Текст] / А.Г. Потапьевский // Автоматическая сварка. – 1958. – № 2. – С. 53 – 58.
14. Беляев, Н.М. Основы теплопередачи: учебник [Текст] / Н.М. Беляев. – К.: Выща шк., 1989. – 343 с.
15. Лыков, А.В. Теплообмен: справочник [Текст] / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.

Отримано 30.01.2013