

УДК 621.9.048

**В. Боков, канд. техн. наук; В. Лушніков, канд. техн. наук;**

**І. Гросул; Т. Мельник**

*Кіровоградський державний технічний університет*

## **ОЦІНКА ТЕПЛОВОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОДА-ЗАГОТОВКИ ПРИ РОЗМІРНІЙ ОБРОБЦІ ЕЛЕКТРИЧНОЮ ДУГОЮ**

*Розглянуто теплову схему та методичку обчислення теплового поля в електроді-заготовці при розмірній обробці металів електричною дугою, що дозволило розширити термодинамічне уявлення про елементарну електроерозійну лунку. Подано метод вимірювання геометричних співвідношень між складовими елементами електричної дуги у гідродинамічному потоці робочої рідини.*

Як відомо [1], матеріал електрода-заготовки (ЕЗ) при реалізації процесу розмірної обробки електричною дугою (РОД) руйнується за рахунок термічної короткочасної дії потужного плоского приелектродного (анодного чи катодного) джерела тепла. У зв'язку з останнім ЕЗ випробовує тепловий удар, результатом якого є утворення у ньому температурного поля певного градієнта та елементарної електроерозійної лунки.

Розглядаючи електричну дугу як інструмент для розмірного формоутворення поверхонь, кількісно оцінемо тепловий стан ЕЗ в умовах РОД, з метою розв'язання таких теплових задач:

- визначення часу  $t$ , за який температура  $T$  на глибині  $x = h_l$  (де  $h_l$  – глибина лунки) досягне температури плавлення матеріалу ЕЗ  $T_{пл}$ ;
- встановлення закону розподілу температури за шарами від поверхні ЕЗ до дна лунки;
- встановлення закону розподілу температури за межами лунки, тобто при  $x > h_l$ ;
- виявлення глибини зони термічного впливу  $H$  як вістань від дна лунки до глибини, що відповідає температурі фазових перетворень  $T_{фп}$  матеріалу ЕЗ.

Для розв'язку теплової задачі спочатку виконували експериментальні дослідження. Методом РОД на зразках отримували електроерозійні лунки (рис. 1, а) при таких умовах: сила технологічного струму  $I = 5$  А; робоча напруга на електродах  $U = 40$  В; статичний тиск робочої рідини на вході в міжелектродний зазор  $P_{ст} = 0,8$  МПа; матеріал електродів – сталь 45; робоча рідини – органічне середовище; режим помпування – плоскопаралельний). Після експерименту геометричні параметри лунок вимірювалися під мікроскопом та статистично оброблялися для отримання середніх (для даного режиму обробки) значень. Результати дослідження подано в таблиці 1.

Таблиця 1

Геометричні параметри одинарних лунок, мм

Матеріал електродів	Електроди			
	ЕЗ (катод)		ЕІ (анод)	
	Діаметр лунки $D_{л(к)}$	Глибина лунки $h_{л(к)}$	Діаметр лунки $D_{л(а)}$	Глибина лунки $h_{л(а)}$
Сталь 45	0,07	0,008	0,10	0,010

Далі розв'язували теплову задачу для отриманої вище катодної лунки (рис. 1, б) при таких припущеннях та умовах:

- вважаємо, що ЕЗ є напівобмежене тіло;
- початкова умова

$$T|_{t=0} = T_0, \tag{1}$$

тобто початкова температура ЕЗ однакова;

- крайові умови II роду:

• на поверхні ЕЗ задається тепловий потік густиною (інтенсивністю)  $S_k$ .  
Відповідно до основного закону теплопровідності

$$S_k = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0}; \quad (2)$$

• на нескінченній віддалі від поверхні тепловий потік дорівнює нулеві

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\infty} = 0, \quad (3)$$

а температура постійна

$$T \Big|_{x=\infty} = T_0. \quad (4)$$

Як аргумент приймається безрозмірний критерій Фур'є

$$Fo_x \equiv \frac{at}{x^2}, \quad (5)$$

де  $a$  – коефіцієнт температуропровідності матеріалу ЕЗ, м<sup>2</sup>/год

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}; \quad (6)$$

де  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності матеріалу ЕЗ, Вт/м·К;

$\rho$  - густина матеріалу ЕЗ, кг/м<sup>3</sup>;

$c$  – питома теплоємність матеріалу ЕЗ, Вт·год/кг·К.

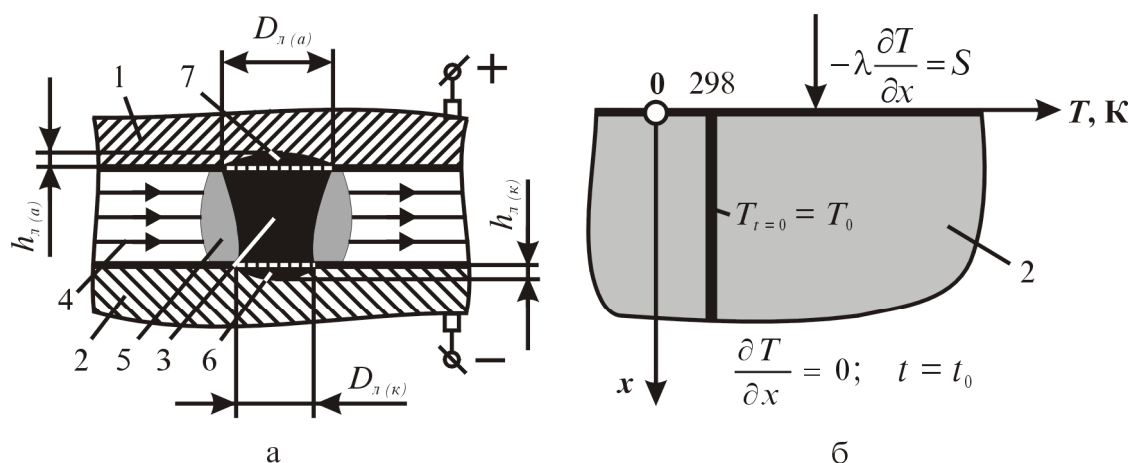


Рис. 1. До теплової задачі процесу РОД: а - схема формоутворення на електродах одинарних лунок; б - розрахункова тепла схема; 1 - електрод-інструмент; 2 - електрод-заготовка; 3 - електрична дуга; 4 - гідродинамічний потік; 5 - газова порожнина; 6 - катодна лунка; 7 - анодна лунка.

Загалом параметри  $\rho$ ,  $c$ ,  $\lambda$  та  $a$  залежать від температури [2, с. 299], але за даними цієї ж роботи у поданому діапазоні зміни температур їх значення для сталі 45 змінюються в досить вузькому діапазоні (табл. 2)

Таблиця 2

Теплофізичні характеристики сталі 45 [2, с.299]

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c, \text{Вт}\cdot\text{год/кг}\cdot\text{К}$	$\lambda, \text{Вт/м}\cdot\text{К}$	$a \cdot 10^3, \text{м}^2/\text{год}$
0	7794	0,156	32	32
500	7767	0,184	38	27

Саме тому, для оцінкових обчислень приймемо такі середні постійні значення даних параметрів:  $\rho = 7750 \text{ кг/м}^3$ ;  $c = 170 \text{ Вт}\cdot\text{год/кг}\cdot\text{К}$ ;  $\lambda = 35 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ . Тоді  $a = 26 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{год}$ .

У зв'язку з дуже малим часом плинності процесу РОД одинарної лунки (приблизно  $1 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ ) та у відповідності з принципом суперпозиції, що широко використовується при теплових обчисленнях [2, с. 45], визначимо спочатку температуру поверхні ЕЗ  $T_n$  як функцію часу  $t$  за крайовими умовами II роду, а потім за отриманими даними визначимо (дискретно) температуру  $T$  як функцію часу  $t$  та глибини шару  $x$  за крайовими умовами I роду

$$T|_{x=0} = T_n, \quad (7)$$

тобто, коли відома температура поверхні  $T_n$ .

За даними роботи [2, с. 109], температуру поверхні тіла, а отже, поверхні ЕЗ  $T_n$ , можна визначити за формулою

$$T_n = T_0 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{S_\kappa \sqrt{t}}{\sqrt{\lambda c \rho}}, \quad (8)$$

а з використанням виразу (6)

$$T_n = T_0 + \frac{2S_\kappa}{\lambda} \sqrt{\frac{at}{\pi}}. \quad (9)$$

При обчисленні густини теплового потоку  $S_\kappa$  на поверхні ЕЗ (катод) в умовах РОД базувалися на тому, що тепла потужність електричної дуги  $P$  складається з теплових потужностей катодної  $P_\kappa$ , анодної  $P_a$  областей та потужності стовпа дуги  $P_c$  і визначається відомою формулою

$$P = IU = P_a + P_\kappa + P_c = I(U_a + U_\kappa + U_c), \quad (10)$$

де  $U_a$ ,  $U_\kappa$ ,  $U_c$  – спад напруги відповідно в катодній, анодній областях та в стовпі дуги. За даними роботи [1], в широкому діапазоні режимів РОД електродами із сталі 45 значення сумарного спаду напруги в анодній та катодній областях  $U_{a+\kappa}$  змінюється у вузькому діапазоні, що становить 18...20 В при робочій напрузі на електродах  $U = 28...30 \text{ В}$ . Це означає, що спад напруги у стовпі дуги  $U_c = 8...12 \text{ В}$ , тобто становить 26,7...33,3 % від  $U$ . Якщо прийняти середнє значення для  $U_c = 0,3U$ , то  $U_{a+\kappa} = 0,7U$ .

В основу поділу  $U_{a+\kappa}$  на складові частини  $U_a$  та  $U_\kappa$  покладено принцип пропорційності даних параметрів площам  $F_{л(a)}$ ,  $F_{л(\kappa)}$  попередньо отриманих анодної та катодної одинарних лунок, оскільки останні характеризують розміри приелектродних областей (теплових плям) при певній (постійній) силі струму, що крізь них проходить. За даним принципом маємо

$$U_a = \frac{0,7U \cdot F_{л(a)}}{F_{л(a)} + F_{л(\kappa)}} = \frac{0,7 \cdot 40 \cdot 0,00785 \cdot 10^{-6}}{(0,00785 + 0,00385) \cdot 10^{-6}} = 0,47U; \quad (11)$$

$$U_\kappa = \frac{0,7U \cdot F_{л(\kappa)}}{F_{л(a)} + F_{л(\kappa)}} = \frac{0,7 \cdot 40 \cdot 0,00385 \cdot 10^{-6}}{(0,00785 + 0,00385) \cdot 10^{-6}} = 0,23U. \quad (12)$$

Тоді густину теплового потоку на поверхні ЕЗ визначимо за формулою

$$S_\kappa = \frac{I \cdot U_\kappa}{F_{л(\kappa)}} = \frac{5 \cdot 0,23 \cdot 40}{0,00385 \cdot 10^{-6}} = 11948 \cdot 10^6, \text{ Вт/м}^2. \quad (13)$$

Для визначення температури  $T$  шару ЕЗ на глибині  $x$  як функції часу  $t$  скористаємося відомим виразом [2, с. 104]

$$T = T_n + \Theta(T_0 - T_n), \quad (14)$$

де  $\Theta$  - параметр температури

$$\Theta = 1 - \text{erf}(U), \quad (15)$$

$\text{erf}(U)$  – функція помилок Гаусса

$$\operatorname{erf}(U) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^U e^{-U^2} dU, \quad (16)$$

а функція

$$U = \frac{1}{2\sqrt{Fo_x}}. \quad (17)$$

Картина температурного поля в ЕЗ (на катоді), отримана за результатами розрахунку параметру  $T = f(t, x)$  для заданих умов за формулами (11), (13)-(17) з використанням програми Mathcal 7 Profesional, подана на рис. 2, а.

Як бачимо:

- розрахунковий час  $t$  нагрівання ЕЗ, за який температура  $T$  на глибині  $x = h_n$  досягає температури плавлення матеріалу ЕЗ ( $T_{nl} = 1808$  К), становить  $2,55 \cdot 10^{-5}$  с (див. криву 8), що цілком задовільно узгоджується з результатами оцінки часу існування одинарної дуги для даного режиму РОД за осцилограмами (похибка не більша за 9 %);

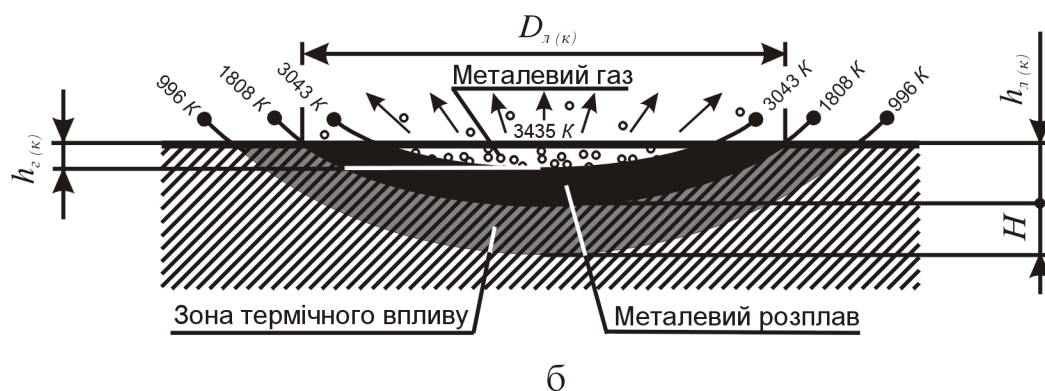
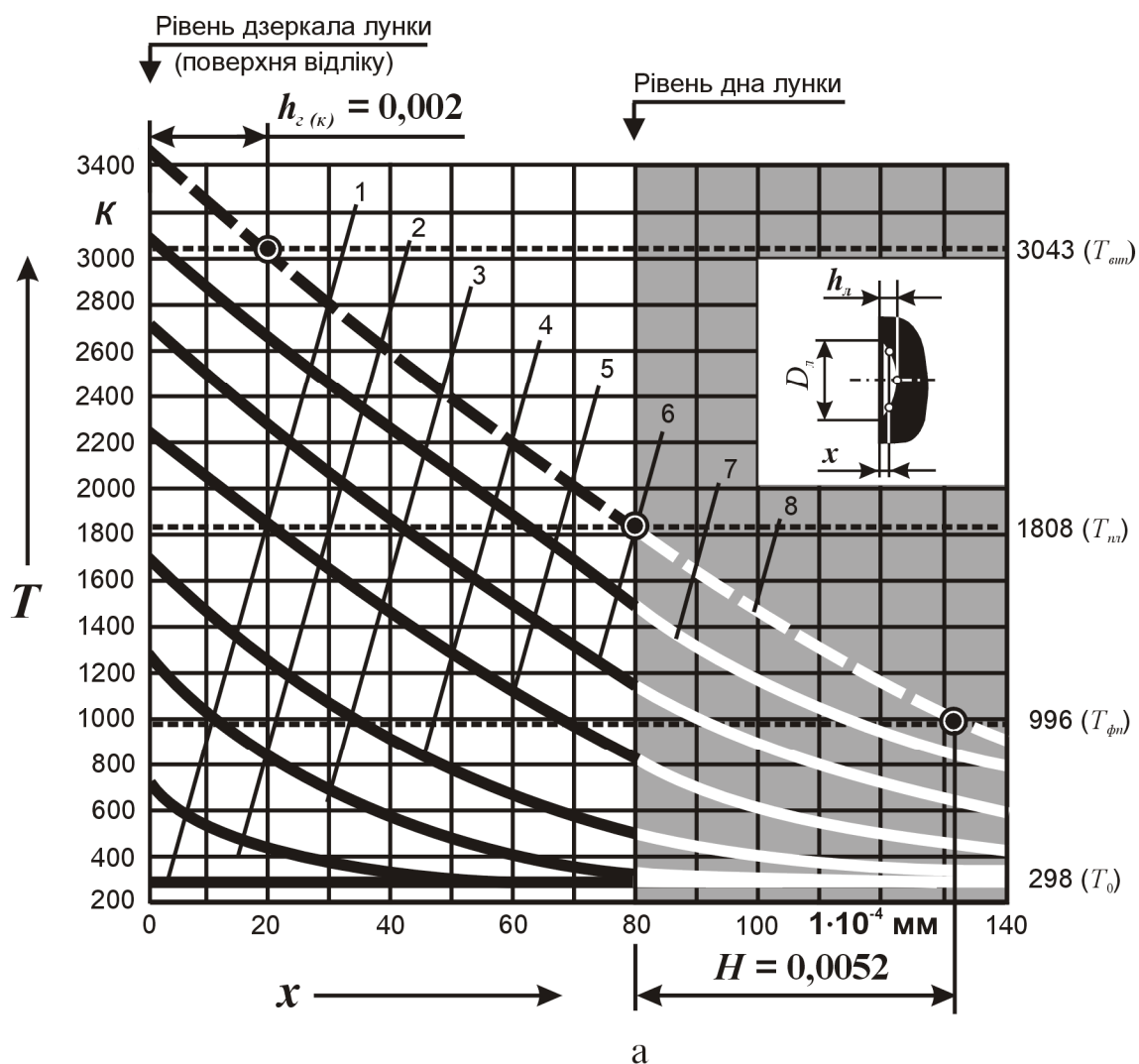


Рис. 2. Розподіл температури  $T$  в катоді при РОД за часом  $t$  на відстані  $x$  від поверхні ( $I = 5 \text{ А}$ ;  $U = 40 \text{ В}$ ;  $P_{\text{ан}} = 0,8 \text{ МПа}$ ; матеріал електродів - сталь 45; робоча рідина - органічне середовище):

а - графічна залежність  $T = f(t, x)$ ;

б - термодинамічне уявлення про лунку;

- |  |  |
|--|--|
| 1 - $t = 0 \text{ с}$ ;                  | 5 - $t = 1,00 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ ; |
| 2 - $t = 0,05 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ ; | 6 - $t = 1,50 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ ; |
| 3 - $t = 0,25 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ ; | 7 - $t = 2,00 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ ; |
| 4 - $t = 0,50 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ ; | 8 - $t = 2,55 \cdot 10^{-5} \text{ с}$   |

- ізотерма, що відповідає температурі випаровування матеріалу ЕЗ з лунки (для Fe  $T_{\text{вип}} = 3043$  К [3, с. 56]) проходить на глибині  $h_{z(k)} = 0,25 h_{l(k)}$ . Це дозволяє оцінити співвідношення рідкої та газової фаз в лунці. Елементарні обчислення показують, що об'єм рідкої фази у лунці складає 95 %, а газової – 5 %;

- крива 8 перетинає горизонталь температури фазових перетворень ( $T_{\text{фн}} = 996$  К [4, с. 180]) на відстані  $H = 0,0052$  мм від дна лунки. Саме ця відстань і визначає глибину зони термічного впливу для даного режиму обробки;

- продовження кривої 8 до точки перетину з горизонтальною лінією 1 ( $T_0 = 298$  К) дає інформацію про глибину  $h$  зміни температури ЕЗ у процесі формоутворення лунки. Обчислення показує, що глибина  $h$  не вище за  $5,6 h_l$ , що характеризує локальність розподілу тепла в ЕЗ навколо дугового розряду при РОД. В умовах експерименту  $h = 5,6 \cdot 0,008 = 0,045$  мм.

З метою порівняння отриманих результатів, виконано додаткові дослідження за інших рівних умов при густині теплового потоку  $S_k = 17094 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> (збільшення на 43 %). У результаті виявлено:

- розрахунковий час  $t$  нагрівання ЕЗ, за який температура на глибині лунки досягає температури плавлення, становить  $0,651 \cdot 10^{-5}$  с (зменшення у 3,9 раза);

- ізотерма, що відповідає температурі випаровування матеріалу ЕЗ із лунки, проходить посередині лунки за глибиною (збільшується у два рази). При цьому об'єм рідкої фази в лунці становить 70 % (зменшується у 1,36 раза), а газової – 30 % (зростає у 6 разів);

- крива часу  $t$  перетинає горизонталь температури фазових перетворень на відстані 0,013 мм від дна лунки (збільшення у 2,5 раза) і визначає глибину зони термічного впливу;

- продовження кривої часу  $t$  до точки перетину з горизонталлю  $T_0 = 298$  К показує, що глибина зміни температури в ЕЗ у процесі формоутворення лунки не вища за  $4,5 h_l$  (зменшення у 1,24 раза).

Аналогічна картина температурного поля в електроді-інструменті (ЕІ), тобто на аноді.

Застосована методика обчислення температурного поля в електродах дозволяє розширити термодинамічне уявлення про лунку (рис. 2, б) як елементарну ділянку зруйнованого дугою металу.

Відомо [1], що катодна електродна тепла пляма руйнує катод, а анодна – анод. Стовп дуги у процесі руйнування електродів помітної часті не бере. Однак стовп дуги формує міжелектродний зазор, а тому є необхідним (обов'язковим) технологічним елементом процесу РОД. Тепловий потік, що виділяється у стовпі, сприймається робочою рідиною, в результаті чого навколо стовпа утворюється газова порожнина. Розміри квазіусталеної (у даному випадку найбільшої) газової порожнини визначаються з умови рівноваги зовнішнього тиску робочої рідини та внутрішнього тиску перегрітого газу. Для виявлення форми газової порожнини та геометричного співвідношення між її максимальним розміром у напрямку потоку і ефективним діаметром стовпа виконувалася відеозйомка дуги при умовах, що відповідають режимові та умовам отримання елементарних лунок (див. рис. 1, а).<sup>\*</sup> Далі відеоінформація з касети переписувалася на компакт-диск та за допомогою програми Adobe Premiere 4,2 аналізувалася у динамічному та кадровому режимах на комп'ютері. Характерні кадри у визначеному масштабі переносилися на графічний редактор Corel DRAW 8, де на них накладалися у тому ж масштабі геометричні параметри лунок та передбачувані межі стовпа дуги.

На рис. 3 показано типовий відеокадр електричної дуги у гідродинамічному потоці робочої рідини. Візуально ми бачимо світлову пляму 7 – область світіння парів матеріалу електродів, та газову порожнину 4, що утворюється навколо неї. Оскільки

час експозиції кадра ( $t_e = 0,02$  с) значно перебільшує час горіння електричної дуги

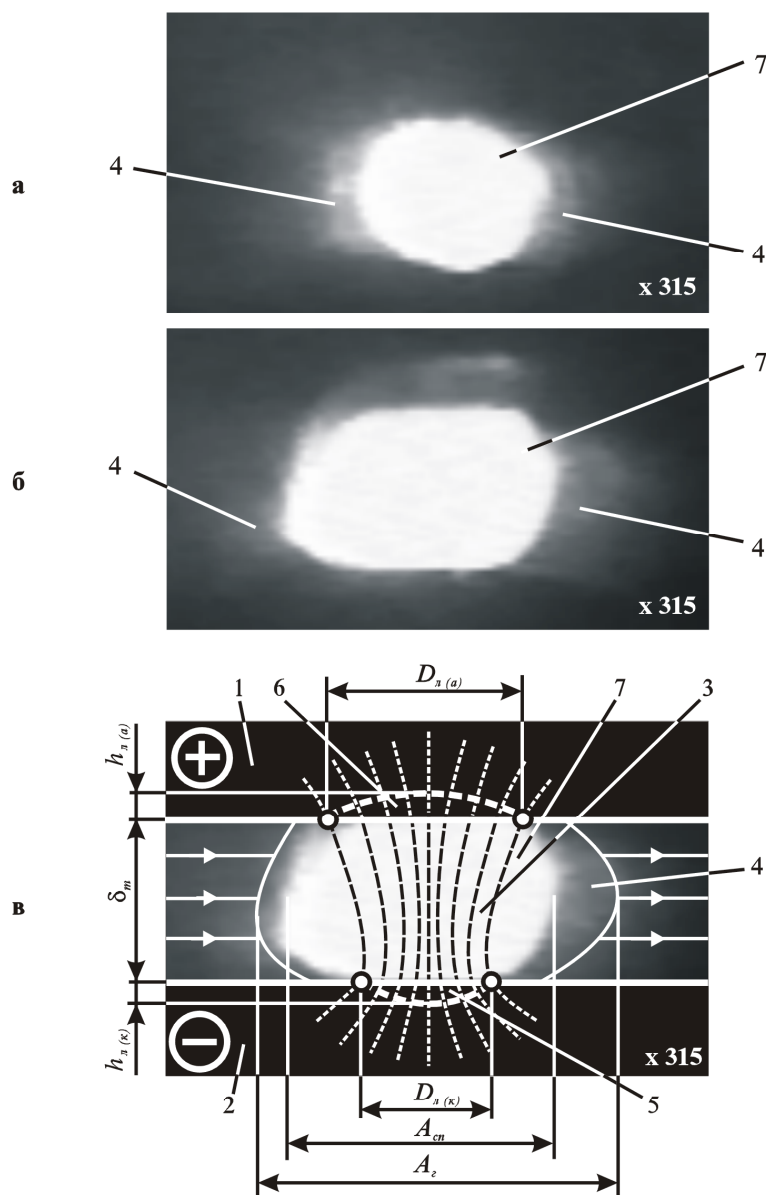


Рис. 3. Відеокадри (а, б, в) електричної дуги в поперечному потоці робочої рідини. Модельне уявлення про форму стовпа дуги. Форма газової порожнини: 1 - ЕІ; 2 - ЕЗ; 3 - стовп дуги; 4 - газова порожнина; 5 - катодна лунка; 6 - анодна лунка; 7 - область світіння парів матеріалу електродів

( $t_d = 2,55 \cdot 10^{-5}$  с), що підтверджується кривою 8 на рис. 2, а, як правило даним умовам експозиції відповідають найбільші розміри газової порожнини, тобто її квазістаціонарний стан – межа між розвитком та згасанням. Останнє дає можливість зафіксувати її та порівняти з передбачуваними розмірами стовпа дуги, уявлювана форма якого наближається до форми гіперболоїда обертання і викликана стисненням ліній струму (одного напрямку) у центрі за рахунок пінч-ефекту. За результатами дослідження співвідношення між максимальним розміром газової порожнини  $A_z$  у напрямку потоку та середнім (ефективним) діаметром стовпа дуги  $d_c$ , що визначається за формулою

$$\frac{A_z}{d_c} = \frac{2A_z}{D_{л(a)} + D_{л(\kappa)}}, \quad (18)$$

становить 2,1. Останнє свідчить про те, що гідродинамічний тиск робочої рідини (тиск у напрямку потоку) сприймається безпосередньо газовою порожниною, а не стовпом дуги, як показано в роботі [1].

Виявлено, що співвідношення між максимальним розміром  $A_{cn}$  області світіння парів матеріалу електродів в напрямку потоку та середнім діаметром стовпа дуги становить 1,6.

Отримані результати сприяють глибшому розумінню феномена електричної дуги у поперечному потоці робочої рідини як інструмента для розмірного формоутворення поверхонь різної геометричної складності.

*Thermal scheme and thermal field calculation technique in electrode-billet under dimensional electric arc processing of metals has been examined. This enabled to widen the thermodynamic idea about the elementary electro-erosion hole. Measuring technique method of geometrical correlations between constituent elements of the electric arc in the hydrodynamic flow of the working liquid is represented.*

### **Література**

1. Носуленко В. І. Розмірна обробка металів електричною дугою: Дис...д-ра техн. наук: 05.03.07. – Кіровоград, 1998. – 389 с.
2. Пехович А. И., Жидких В. М. Расчёты теплового режима твердых тел. – Л.: Энергия, 1968. – 304 с.
3. Термодинамические свойства неорганических веществ: Справочник / У. Д. Верятин, Б. П. Маширев, Н. Г. Рябцев, В. И. Тарасов, Б. Д. Рогозкин, И. В. Коробов / Под ред. А. П. Зефирова. – М.: АТОМИЗДАТ, 1965. – 460 с.
4. Самохоцкий А. И., Кунявский М. Н. Лабораторные работы по металловедению / Под ред. В. В. Рыбкина. – М.: МАШГИЗ, 1959. – 276 с.

*Одержано 05.09.2001 р.*

---

\* В телезйомці дуги брав участь Б. Кришкін