

**Ivan Pavlenko, Dmitry Vakhnichenko, Vladimir Kropivniy**

*Kirovograd National Technical University*

**Experimental study of power load MPK**

The purpose of this work is the quantitative analysis of variants of kinematic schemes of industrial robots for definition of expedient variants and the analysis of the obtained data on the basis of the created working zones.

The article describes the experimental study of power load when the MPK drilling operations. Submitted designed and manufactured with special experimental setup with strain gauges and measuring unit . The paper presents the results of experimental studies with load axis and parallel to the axis of symmetry of the MPK which the graphs of response surfaces.

**machine, hexapod, MPK, machinetool MPK, machine of parallel structure**

Одержано 19.05.14

**УДК 621.9.048.4**

**В. М. Боков, проф., канд. техн. наук**

*Кировоградський національний технічний університет*

## **Обработка дугою отворів з використанням мідного електрода-інструмента**

Розроблено основи прогнозування технологічних характеристик процесу обробки електричною дугою отворів мідними електродами-інструментами. Запропоновано та випробувано новий ефективний спосіб обробки малих отворів.

**електрична дуга, мідний електрод-інструмент, отвори, гідродинамічний режим, технологічні характеристики, обробка малих отворів**

**В. М. Боков, проф., канд. техн. наук**

*Кировоградский национальный технический университет*

**Обработка дугой отверстий с использованием медного электрода-инструмента**

Разработаны основы прогнозирования технологических характеристик обработки электрической дугой отверстий медными электродами-инструментами. Предложен и испытан новый эффективный способ обработки малых отверстий.

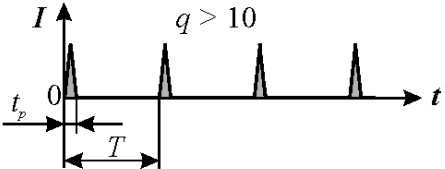
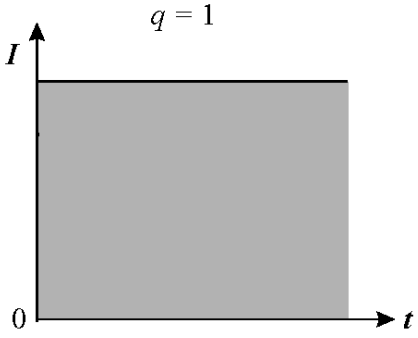

**электрическая дуга, медный электрод-инструмент, отверстия, гидродинамический режим, технологические характеристики, обработка малых отверстий**

**Актуальність.** Методи електроерозійної обробки отворів є сучасними, бо дозволяють обробляти будь-який за твердістю електропровідний матеріал (наприклад, загартовані сталі та тверді сплави), а також отримувати отвори складного (не круглого) перерізу при використанні простого поступального руху електрода-інструмента.

Одним із найбільш перспективних високопродуктивних методів електроерозійної обробки отворів є спосіб розмірної обробки металів електричною дугою (РОД) [1-3]. У порівнянні з відомими способами електроерозійної обробки, спосіб РОД дозволяє збільшити продуктивність обробки приблизно на порядок і більше, зменшити

приблизно в два рази питомі витрати електроенергії та в 3-5 разів знизити вартість джерел живлення технологічним струмом. Інші відмінні особливості та переваги способу РОД над відомими способами обробки отворів демонструє таблиця 1. При обробці отворів способом РОД електрична дуга горить в торцевому міжелектродному зазорі (МЕЗ) між електроодом-інструментом (ЕІ) та електроодом-заготовкою (ЕЗ) в потужному поперечному потоці робочої рідини. Її енергетичні та геометричні параметри, що обумовлюють технологічні характеристики процесу РОД, залежать не тільки від сили технологічного струму  $I$  та динамічного тиску робочої рідини в зазорі  $P_0$ , але й від інших умов, зокрема, як буде показано нижче, від величини напруги  $U$  на електродах. Так, напруга на електродах, разом з іншими факторам, суттєво впливає на відносний лінійний знос мідного ЕІ при обробці малих отворів. Необхідність використання мідного ЕІ для РОД малих отворів (діаметром менше трьох мм) обумовлюється суттєвими технічними складностями виготовлення трубчастого ЕІ із графіту, як більш електроерозійностійкого матеріалу, у зв'язку механічною міцністю останнього.

Таблиця 1 – Відмінні особливості способів електроерозійної обробки отворів

| Способи обробки отворів, (інструмент) | Кінематична та гідродинамічна характеристика процесу                            | Форма перерізу отвору, що обробляється | Графічна залежність $I = f(t)$ . Характеристика шпаруватості                         |
|---------------------------------------|---|--|--|
| Електро-іскрова обробка (іскра)       | - поступальний рух ЕІ;<br>- ЕЗ нерухома;<br>- рідина нерухома                   | Будь-яка                               |  |
| Електро-імпульсна обробка (імпульс)   | - поступальний рух ЕІ;<br>- ЕЗ нерухома;<br>- рідина нерухома                   | Будь-яка                               |  |
| Електро-контактна обробка (дуга)      | - обертальний та поступальний рух ЕІ;<br>- ЕЗ нерухома;<br>- рідина мало-рухома | Тільки кругла                          |  |
| Розмірна обробка дугою (дуга)         | - поступальний рух ЕІ;<br>- ЕЗ нерухома;<br>- рідина прокачується під тиском    | Будь-яка                               |  |

Отримані в роботі математичні трьохфакторні моделі відносного лінійного зносу мідного ЕІ та інших технологічних характеристик даного процесу (продуктивності обробки, питомої продуктивності бробки, питомої витрати електроенергії, шорсткості обробленої поверхні та величині бічного міжелектродного

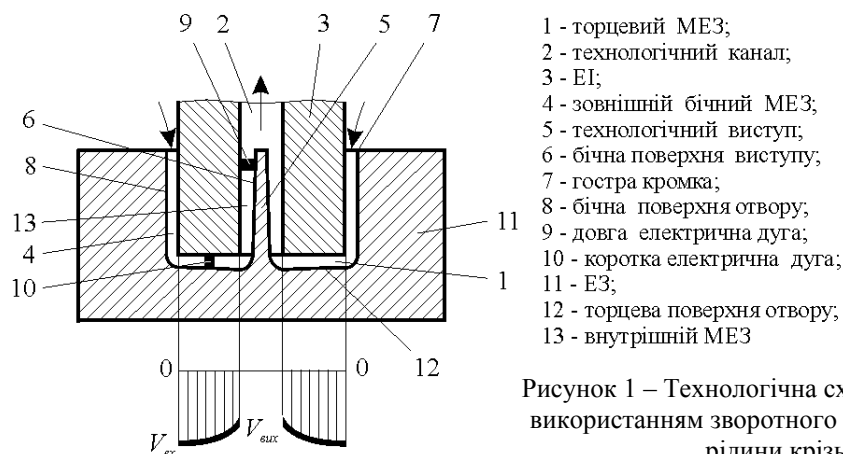
зазору) дозволяють прогнозувати їх та оптимізувати режим обробки отворів способом РОД. Крім того, запропонована нова технологічна схема формоутворення малих отворів дозволить розширити діапазон їх обробки способом РОД в бік зменшення діаметру. Рішення даної проблеми і обумовлює актуальність роботи.

**Мета досліджень** – прогнозування технологічних характеристик та підвищення ефективності процесу РОД отворів мідними електродами.

Поставлена мета реалізується шляхом вирішення наступних задач:

- обґрунтування технологічної схеми формоутворення отвору способом РОД;
- розробка та аналіз математичних моделей, що обумовлюють технологічні характеристики точності, якості та продуктивності процесу РОД отворів мідним ЕІ;
- аналіз технологічної схеми формоутворення та інтенсифікація процесу РОД малого отвору мідним ЕІ.

**Методика дослідження.** В роботі [2] показано, що технологічна схема формоутворення поверхні способом РОД включає в себе такі елементи, як відносний рух електрода-інструмента, відносний рух електрода-заготовки та спосіб прокачування робочої рідини крізь торцевий міжелектродний зазор. Розрізняють два основні способи прокачування робочої рідини крізь торцевий міжелектродний зазор: прямий та зворотній. При прямому прокачуванні якість і точність бічної поверхні отвору 8, яка є об'єктом обробки, незадовільні та відрізняються підвищеною шорсткістю даної поверхні і утворенням конусності. Останнє пояснюється горінням в бічному зовнішньому міжелектродному зазорі електричної дуги підвищеної довжини та з низькими енергетичними параметрами, що утворюється за рахунок вторинного диспергування продуктів ерозії в даному зазорі при низькій швидкості потоку. Тому даний спосіб прокачування не доцільно використовувати для обробки отворів. При зворотному прокачуванні (рис. 1) робоча рідина нагнітається в торцевий міжелектродний зазор 1 під технологічним тиском крізь зовнішній бічний міжелектродний зазор 4, а вилучається із нього крізь внутрішній бічний міжелектродний зазор 13 разом з продуктами ерозії. Оскільки при ідеально організованому процесі електричні дуги 10, 9 горять тільки в торцевому та внутрішньому бічному МЕЗ, в зовнішньому бічному МЕЗ тече чиста робоча рідина (без продуктів ерозії). Саме тому спостерігаються задовільні якість і точність формоутворення зовнішньої бічної поверхні отвору, а на вході в бічний зовнішній МЕЗ на електроді-заготовці утворюється гостра кромка. При цьому спостерігається відносна низька якість та точність формоутворення стрижневого виступу 5, але при наскрізній обробці отворів останнє не має значення. Таким чином, для обробки отворів способом



- 1 - торцевий МЕЗ;
- 2 - технологічний канал;
- 3 - ЕІ;
- 4 - зовнішній бічний МЕЗ;
- 5 - технологічний виступ;
- 6 - бічна поверхня виступу;
- 7 - гостра кромка;
- 8 - бічна поверхня отвору;
- 9 - довга електрична дуга;
- 10 - коротка електрична дуга;
- 11 - ЕЗ;
- 12 - торцева поверхня отвору;
- 13 - внутрішній МЕЗ

Рисунок 1 – Технологічна схема формоутворення отворів з використанням зворотного способу прокачування робочої рідини крізь торцевий МЕЗ

РОД доцільно використовувати технологічну схему формоутворення, яка включає в себе поступальний зустрічний взаємний рух електродів 3, 11 та спосіб зворотного прокачування робочої рідини крізь торцевий міжелектродний зазор.

Методика математичного моделювання технологічних характеристик процесу РОД отворів мідним електродом-інструментом [34] передбачала моделювання процесу з використанням циліндричних ЕІ при зворотному прокачуванні робочої рідини крізь торцевий міжелектродний зазор. На підставі апріорної інформації було вибрано три фактора, які повинні впливати на технологічні характеристики процесу РОД отворів мідним електродом-інструментом: сила технологічного струму  $I$  ( $X_1$ ), А; напруга на електродах  $U$  ( $X_2$ ), В; статичний тиск робочої рідини на вході в міжелектродний зазор  $P_{ст}$  ( $X_3$ ), МПа. Усі вибрані фактори задовольняють умовам керованості, операціональності та однозначності. Інші параметри процесу були зафіксовані на постійних рівнях. Для встановлення оптимальної полярності обробки попередньо виконали порівнювальний експеримент. Мідним електродом діаметром 20 мм обробили два отвори відповідно на прямій та зворотній полярності в умовах однакового режиму обробки ( $I = 100$  А;  $U = 35$  В;  $P_{ст} = 1,4$  МПа). Відносний лінійний знос мідного електрода-інструмента на прямій полярності склав 13 %, а на зворотній – 76 %. Саме тому прийняли пряму полярність обробки ЕЗ із сталі 45 мідним ЕІ.

В якості робочої рідини використовувалося органічне середовище наступного складу: масло «Індустріальне 1-20А» ГОСТ 20790-75 – 50 %; гас освітлювальний ГОСТ 4953-68 – 50 %.

Після експерименту розраховувалися або вимірювалися такі технологічні характеристики процесу РОД мідним електродом-інструментом, як відносний лінійний знос мідного ЕІ  $\gamma_n$ , %; бічний міжелектродний зазор  $\delta_b$ , мм; шорсткість обробленої поверхні  $Ra$ , мкм; продуктивність обробки  $M$ , мм<sup>3</sup>/хв.; питома продуктивність обробки  $M_a$ , мм<sup>3</sup>/А·хв.; питома витрата електроенергії  $a$ , кВт·год/кг. Значення факторів на основному, верхньому та нижньому рівнях, а також інтервали варіювання наведено в таблиці 2.

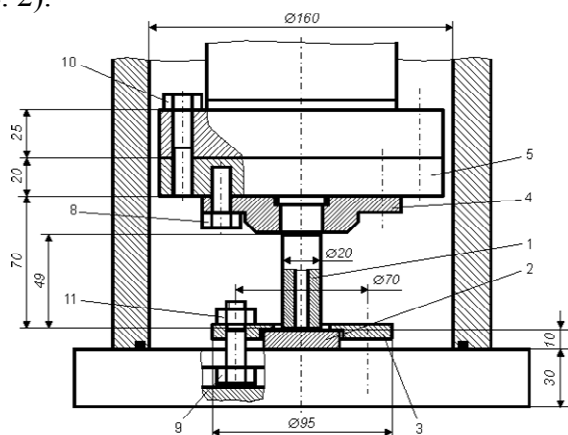
Таблиця 2 – Матриця планування експерименту (план 2<sup>3</sup>)

| Фактори                                 |   | $I$ ,<br>А         | $U$ ,<br>В | $P_{ст}$ ,<br>МПа |                |                 |            |                            |                                |                  |       |       |
|---|---|--------------------|------------|-------------------|----------------|-----------------|------------|----------------------------|--------------------------------|------------------|-------|-------|
| Основний рівень ( $X_{i0}$ )            |   | 75                 | 30         | 1,0               |                |                 |            |                            |                                |                  |       |       |
| Інтервал варіювання<br>( $\Delta X_i$ ) |   | 25                 | 5          | 0,4               |                |                 |            |                            |                                |                  |       |       |
| Верхній рівень ( $X_i = +1$ )           |   | 100                | 35         | 1,4               | $\gamma_n$ , % | $\delta_b$ , мм | $Ra$ , мкм | $M$ , мм <sup>3</sup> /хв. | $M_a$ , мм <sup>3</sup> /А·хв. | $a$ , кВт·год/кг |       |       |
| Нижній рівень ( $X_i = -1$ )            |   | 50                 | 25         | 0,6               |                |                 |            |                            |                                |                  |       |       |
| Код                                     |   | $x_1$              | $x_2$      | $x_3$             | $y_1$          | $y_2$           | $y_3$      | $y_4$                      | $y_5$                          | $y_6$            |       |       |
| Номер дослідів                          | 1 | Порядок реалізації | 6          | +                 | +              | +               | 13         | 0,075                      | 9,20                           | 487              | 4,87  | 15,25 |
|   | 2 |                    | 2          | -                 | +              | +               | 5          | 0,060                      | 7,09                           | 235              | 4,70  | 15,80 |
|   | 3 |                    | 5          | +                 | -              | +               | 22         | 0,075                      | 10,9                           | 375              | 3,75  | 14,14 |
|   | 4 |                    | 1          | -                 | -              | +               | 13         | 0,050                      | 5,50                           | 297              | 5,94  | 8,92  |
|   | 5 |                    | 7          | +                 | +              | -               | 21         | 0,100                      | 12,5                           | 493              | 4,93  | 15,04 |
|   | 6 |                    | 8          | -                 | +              | -               | 12         | 0,060                      | 7,90                           | 297              | 5,94  | 12,51 |
|   | 7 |                    | 3          | +                 | -              | -               | 30         | 0,060                      | 10,9                           | 368              | 3,68  | 14,42 |
|   | 8 |                    | 4          | -                 | -              | -               | 22         | 0,060                      | 7,90                           | 297              | 5,94  | 12,51 |
| Досліди у центрі плану                  |   | 1                  | 0          | 0                 | 0              | 18,5            | 0,07       | 8,5                        | 360                            | 4,80             | 13,27 |       |
|   |   | 2                  | 0          | 0                 | 0              | 17,8            | 0,07       | 7,9                        | 350                            | 4,67             | 13,65 |       |
|   |   | 3                  | 0          | 0                 | 0              | 16,5            | 0,06       | 9,0                        | 325                            | 4,33             | 14,70 |       |
|   |   | 4                  | 0          | 0                 | 0              | 17,5            | 0,06       | 9,2                        | 355                            | 4,73             | 13,46 |       |

У даному разі значення факторів у кодовому ( $x_i$ ) і натуральному ( $X_i$ ) масштабах зв'язані співвідношеннями:

$$x_1 = \frac{X_1 - 75}{25}; \quad x_2 = \frac{X_2 - 30}{5}; \quad x_3 = \frac{X_3 - 1}{0,4}.$$

Для дослідження технологічних характеристик процесу РОД отворів мідним електродом-інструментом використовувався експериментальний електроерозійний копіювально-прошивний верстат моделі «Дуга-8Г» [5] та експериментальний пристрій (рис. 2).



- 1 - мідний ЕІ;
- 2 - ЕЗ;
- 3 - притискач;
- 4 - електродотримач;
- 5 - тримач;
- 8...10 - болти;
- 11 - гайка

Рисунок 2 – Експериментальний пристрій

**Результати дослідження.** Отримано математичну модель відносного лінійного зносу мідного електродом-інструмента  $\gamma_n$

$$y_1 = 17,25 + 4,25x_1 - 4,5x_2 - 4x_3.$$

На знос одночасно та практично рівномірно впливають усі три фактора (рис. 3): напруга на електродах  $U$  – головний керуючий фактор (ступінь впливу – 35,3 %). Із підвищенням  $U$  знос зменшується; сила технологічного струму  $I$  (ступінь впливу – 33,3 %). Із підвищенням  $I$  знос збільшується; статичний тиск робочої рідини на вході потоку в міжелектродний зазор  $P_{cm}$  (ступінь впливу – 31,4 %). Із підвищенням  $P_{cm}$  знос зменшується. Модель дозволяє прогнозувати малозносний процес РОД отворів мідним електродом-інструментом. В умовах експерименту відносний лінійний знос мідного ЕІ змінювався у межах від 4,9 % до 31,6 %.

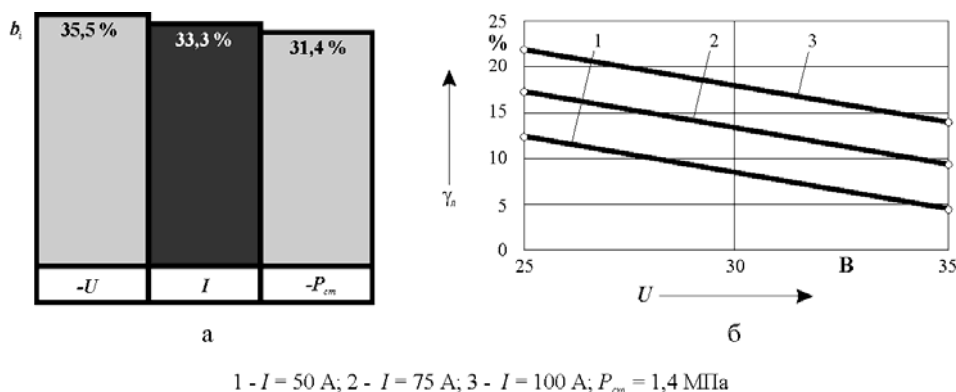


Рисунок 3 – Ступінь впливу факторів на відносний лінійний знос мідного ЕІ  $\gamma_n$  (а) та його залежність від  $U$  та  $I$  (б)

Отримано математичну модель бічного міжелектродного зазору  $\delta_b$

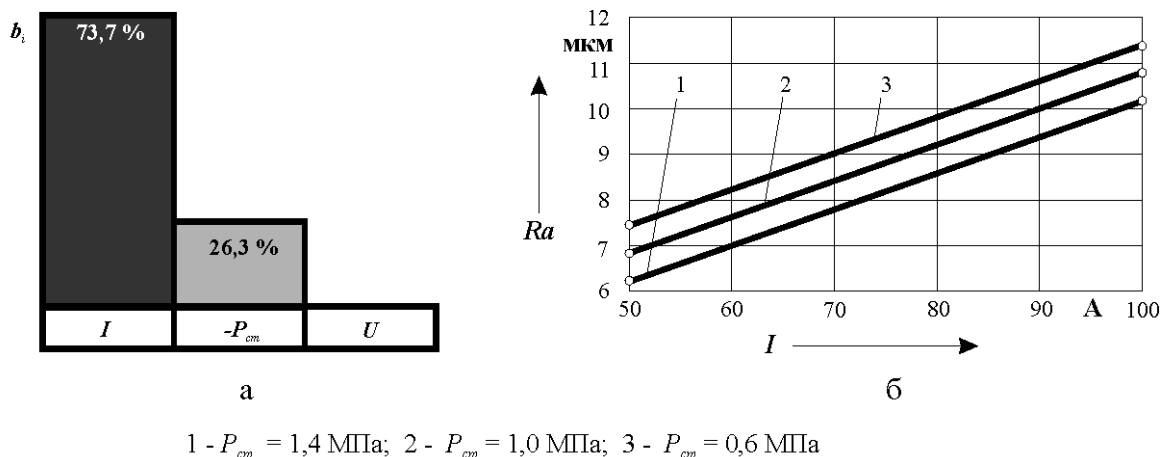
$$y_2 = 0,0675 + 0,01x_1.$$

Як бачимо, зазор повністю визначається лише одним фактором – силою технологічного струму  $I$ . Саме тому  $I$  є головним керуючим фактором. Із підвищенням сили струму зазор збільшується. В умовах експерименту бічний міжелектродний зазор змінювався у межах від 0,05 мм до 0,10мм, що свідчить про високу точність обробки.

Отримано математичну модель шорсткості бічної поверхні отвору  $Ra$

$$y_3 = 8,88 + 1,99x_1 - 0,71x_3.$$

Із моделі виходить, що найбільш впливає на шорсткість поверхні такий фактор, як сила технологічного струму  $I$ , тому його слід визнати головним, керуючим (ступінь впливу – 73,7 %). Із підвищенням  $I$  шорсткість збільшується. Вплив статичного тиску потоку на вході в міжелектродний зазор  $P_{cm}$  на шорсткість поверхні – у 2,8 рази менший (26,3 %), але має істотне значення. Із підвищенням тиску  $Ra$  зменшується. В умовах експерименту шорсткість бічної поверхні отвору після РОД змінювалася у межах від  $Ra5,5$  до  $Ra12,5$  (рис. 4).



1 -  $P_{cm} = 1,4$  МПа; 2 -  $P_{cm} = 1,0$  МПа; 3 -  $P_{cm} = 0,6$  МПа

Рисунок 4 – Ступінь впливу факторів на шорсткість бічної поверхні отвору після РОД  $Ra$  (а) та її залежність від  $I$  та  $P_{cm}$  (б)

Отримано математичну модель продуктивності обробки отвору  $M$

$$y_4 = 356 + 74,62x_1 + 21,87x_2.$$

На продуктивність обробки найбільш впливає сила технологічного струму  $I$  (рис. 5), тому даний фактор слід визнати головним, керуючим (ступінь впливу – 77,3 %). Із підвищенням  $I$  продуктивність обробки збільшується. Вплив напруги на електродах  $U$  на  $M$  – у 3,4 рази менший (22,7 %), але має істотне значення. Із підвищенням напруги  $M$  збільшується. Позитивний вплив сили технологічного струму та напруги на продуктивність обробки, з фізичної точки зору, пояснюються введенням в зону обробки додаткової енергії та, як відомо, теплової природою електричної ерозії. В умовах експерименту продуктивність обробки отворів способом РОД з використанням мідного ЕІ змінювалася у межах від 297 мм<sup>3</sup>/хв. до 493 мм<sup>3</sup>/хв.

Отримано математичну модель питомої продуктивності обробки отвору  $M_a$

$$y_5 = 4,95 - 0,66x_1.$$

Як бачимо, на питому продуктивність обробки отвору впливає лише один фактор – сила технологічного струму  $I$ , тому його слід визнати головним, керуючим (ступінь впливу – 100 %). Із підвищенням  $I$  питома продуктивність обробки зменшується. В умовах експерименту питома продуктивність обробки отворів способом РОД з використанням мідного ЕІ змінювалася у межах від 3,68 мм<sup>3</sup>/А·хв. до 5,94 мм<sup>3</sup>/А·хв.

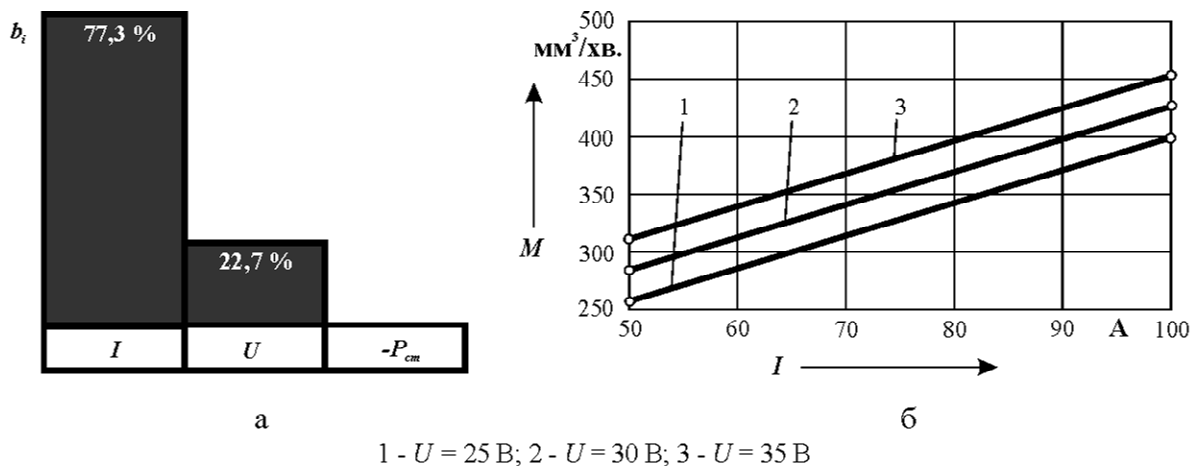


Рисунок 5 – Ступінь впливу факторів на продуктивність обробки отвору мідним ЕІ  $M$  (а) та її залежність від  $I$  та  $U$  (б)

Отримано математичну модель питомої витрати електроенергії  $a$

$$y_6 = 13,57 + 1,14x_1 + 1,08x_2 \cdot$$

Показано, що найбільший вплив на питому витрату електроенергії  $a$  оказує сила технологічного струму  $I$ , тому його слід визнати головним, керуючим (ступінь впливу – 51,3 %). Із підвищенням  $I$  питома витрата електроенергії збільшується. Трохи менше, але суттєво впливає на  $a$  напруга на електродах (ступінь впливу – 48,6 %). Із підвищенням  $U$  питома витрата електроенергії збільшується. В умовах експерименту питома витрата електроенергії процесу РОД отворів з використанням мідного ЕІ змінювалася у межах від 8,92 кВт·год./кг до 15,80 кВт·год./кг.

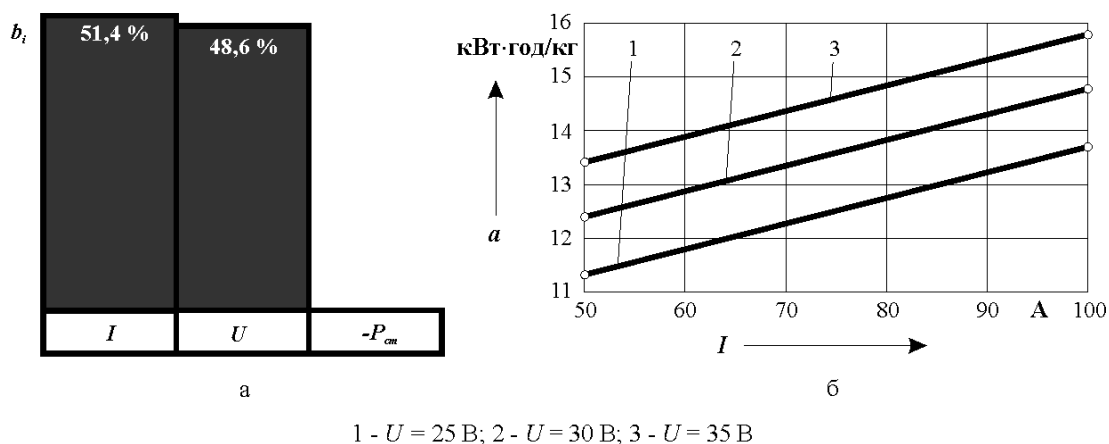
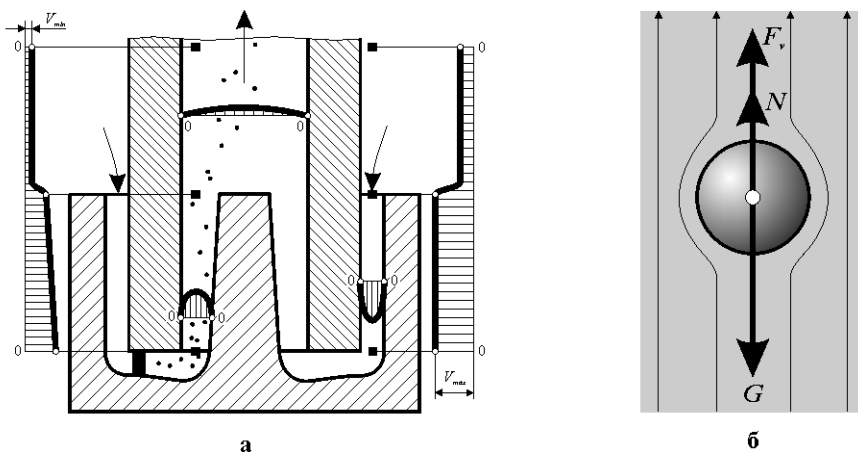


Рисунок 6 – Ступінь впливу факторів на питому витрату електроенергії  $a$  (а) та її залежність від  $I$  та  $U$  (б)

В технологічній схемі формоутворення отворів способом РОД, при якій вилучення продуктів ерозії із зони обробки здійснюється в напрямку знизу вгору (рис. 7) найбільш складні умови евакуації продуктів ерозії спостерігаються у вертикальному каналі електрода-інструмента, в якому на частку діє, з одного боку, сила ваги  $G$ , а з другого – сила гідродинамічного тиску  $F_v$  та сила Архімеда  $N$ . Рівновага цих сил визначається умовою

$$F_v = G - N.$$



а - схема обробки;

б - схема сил, що діють на частку у вертикальному каналі ЕІ

Рисунок 7 – Епюри швидкостей в каналі ЕІ та в МЕЗ при РОД отвору з використанням типової (відомої) технологічної схеми формоутворення

Як бачимо, для того, щоб частка рухалася в напрямку знизу вгору треба перебороти силу ваги силою гідродинамічного тиску. В свою чергу, гідродинамічний тиск потоку в каналі характеризується швидкістю робочої рідини. Отже, існує така критична швидкість робочої рідини, нижче якої продукти ерозії не вилучаються із робочої зони. Процес обробки отвору дестабілізується та припиняється. За даними роботи [2] критичну швидкість можна визначити за формулою

$$V_{кр} = \sqrt{\frac{8Rg}{3C_x} \left( \frac{K_n \rho_n}{\rho_{жс}} - 1 \right)},$$

де  $R$  – радіус частки, м;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$\rho_n$  – густина компактного матеріалу, із якого отримано частку, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{жс}$  – густина робочої рідини, кг/м<sup>3</sup>;

$C_x$  – коефіцієнт лобового опору частки;

$K_n$  – коефіцієнт, що враховує зміну густини частки.

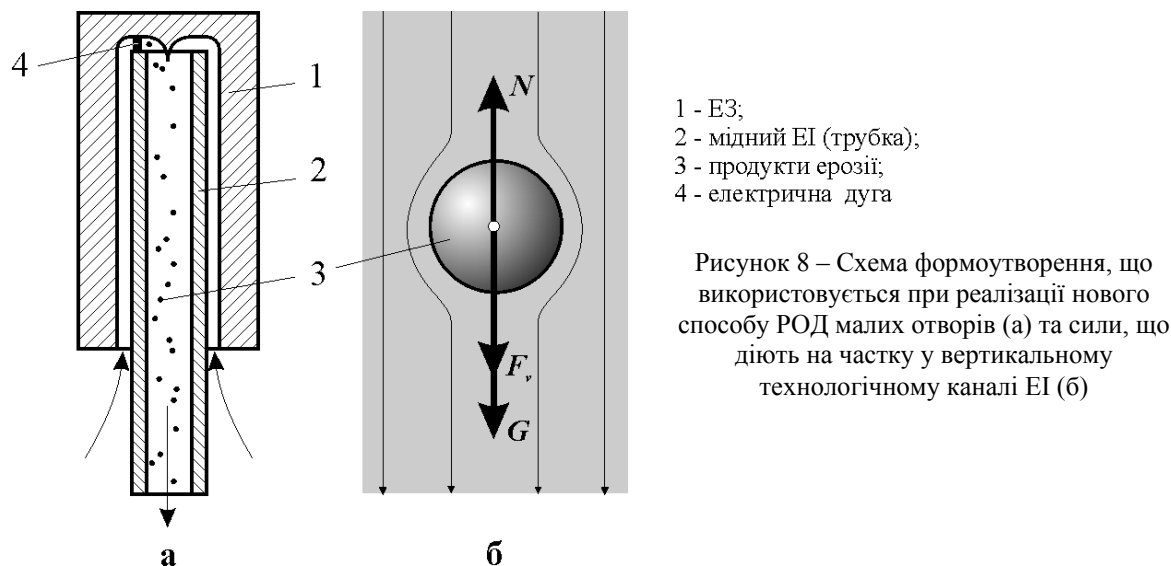
В роботі [5] показано, що в широкому діапазоні зміни радіусу частки для більшості металів та сплавів критична швидкість в каналі електрода-інструмента не перевищує 0,5 м/с.

Однак при прошиванні електричною дугою отворів малого діаметру ( $d < 5$  мм) швидкість потоку в каналі електрода-інструмента як правило менша критичної. Тому при нормальних тисках (до 2 МПа) процес дестабілізується та припиняється. А підвищення тиску на рівень 6...8 МПа, з метою збільшення швидкості потоку в каналі



до величини, що більша критичної, є суттєвим обмеженням електроерозійних верстатів, які реалізують процес РОД.

В цьому зв'язку певний науковий та практичний інтерес має новий спосіб обробки електричною дугою малих отворів, що пропонується [6], який відрізняється тим, що обробку здійснюють при видаленні робочої рідини разом з продуктами ерозії із технологічного каналу в електроді-інструменті за напрямком зверху вниз, тобто з використанням гравітаційної сили. Суть нового способу РОД малих отворів схематично показано на рис. 8.

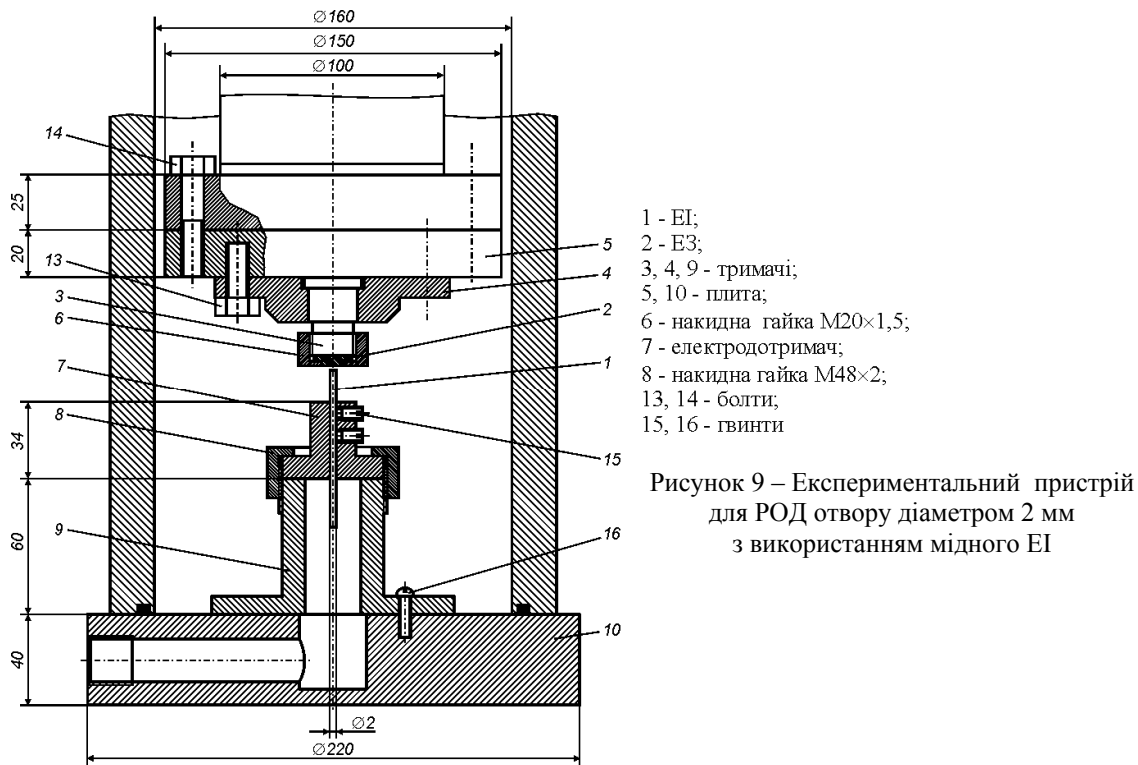


Як бачимо, на частку, що знаходиться в технологічному каналі ЕІ завжди діє результуюча сила  $F$ , що спрямована вниз та дорівнює

$$F = F_v + G - N.$$

Оскільки  $(F_v + G) \gg N$ , величина  $F$  завжди позитивна, а отже, спрямована вниз. Таким чином, нова схема формоутворення дозволяє ефективно вилучати продукти ерозії навіть з малих за діаметром каналів і тим самим забезпечує обробку отворів діаметром менше трьох міліметрів.

Для реалізації способу, що пропонується, спроектовано експериментальний пристрій (рис. 9). На плиті 10 жорстко встановлюється тримач 9, на якому за допомогою накидної гайки 8 змонтовано електродотримач 8 з електродом-інструментом 1, який являє собою мідну трубку зовнішнім діаметром 2 мм. Консоль електрода-інструмента 1 регулюється гвинтами 15 в залежності від глибини отвору, що прошивається, та з урахуванням величини його лінійного зносу. Електрод-заготовка 2 закріплюється на шпинделі верстату за допомогою плити 5, тримачів 3, 4 та накидної гайки 6. Для РОД малого отвору герметизують зону обробки шляхом опускання камери, подають під технологічним тиском в неї робочу (органічну) рідину, вмикають технологічний струм та у слідкуючому за торцевим міжелектродним зазором режимі ведуть процес обробки. При цьому продукти ерозії від горіння електричної дуги вільно вилучаються із вертикального каналу в ЕІ навіть при порівняно невеликих тисках робочої рідини на вході в міжелектродний зазор. Останнє пояснюється застосуванням такої технологічної схеми формоутворення, при якій, як показано вище, на частку, в вертикальному каналі діє гарантована сила  $F$ , яка спрямована вниз.



Режим обробки та результати прошивання отвору діаметром 2 мм в електроді-заготовки із сталі 45 з використанням мідного електрода-інструмента та вказаного експериментального пристрою наведено в таблиці 3.

Таблиця 4 – Режими та результати обробки отвору діаметром 2 мм з використанням мідного електрода-інструмента

| № досліду | $I, A$ | $U, B$ | $P_{см}, MPa$ | Полярність | $V, мм/хв.$ | $\gamma_{л}, \%$ | $\delta_{б}, мм$ | Наявність технологічного виступу |
|-----------|--------|--------|---------------|------------|-------------|------------------|------------------|----------------------------------|
| 1         | 3      | 50     | 1,0           | пряма      | 5,0         | 44               | 0,10             | немає                            |
| 2         | 3      | 50     | 1,5           | пряма      | 5,1         | 34               | 0,10             | немає                            |

Як бачимо, процес отримання наскрізних малих отворів, глибиною 5,6 мм (рис. 10), характеризується, з одного боку, великою швидкістю прошивання  $V$ , яка приблизно у 1,5 рази за аналогічних умов перебільшує швидкість електроімпульсної обробки отворів мідним ЕІ, а з другого боку, підвищеним лінійним зносом мідного ЕІ.

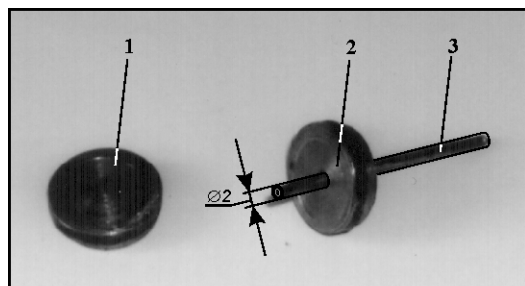


Рисунок 10 – ЕЗ до РОД (1), ЕЗ після РОД (2) та мідний ЕІ (3)

Для досягання найменшого лінійного зносу, як показано в розділі 3, треба прагнути до:

- зменшення сили технологічного струму. В умовах експерименту зменшення сили струму здійснювалося шляхом використання баластного реостату. Зменшення сили струму до величини нижче

3 А не можливо за технічних причин;

- підвищення напруги на електродах. В умовах експерименту технічним обмеженням підвищення напруги є джерело живлення – зварювальний випрямляч ВДУ-504, у якого напруження холостого ходу не перевищує 80 В, а верхня межа

регулювання робочої напруги при падаючій вольт-амперної характеристики не перевищує 50 В;

- підвищення статичного тиску робочої рідини на вході в міжелектродний зазор. В умовах експерименту гідравлічний опір течії робочої рідини в технологічному каналі мідного електрода-інструмента був настільки великий, що для забезпечення певного рівня гідродинамічного тиску потоку на дугу є потреба в підвищенні статичного тиску на вході в зазор до рівня 6...7 МПа. Останнє є технічним обмеженням насосної установки, що використовувалася.

Таким чином, можна прогнозувати, що для РОД отворів діаметром 2 мм з відносним лінійним зносом мідного ЕІ на рівні 5 % необхідно вести процес на наступному режимі:

- сила технологічного струму – 1...3 А;
- робоча напруга на дузі – 120...150 В;
- статичний тиск робочої рідини на вході в МЕЗ – 6...7 МПа;
- полярність обробки – пряма.

Забезпечення такого режиму РОД малих отворів потребує розробки нового обладнання.

**Висновки.** Розроблено теоретичні та практичні основи прогнозування технологічних характеристик та підвищення ефективності процесу РОД отворів мідними електродами-інструментами. Вперше отримано математичну модель відносного лінійного зносу мідного ЕІ при РОД отворів в умовах трьохфакторного експерименту ( $I$ ,  $U$ ,  $P_{cm}$ ) та виявлено ступінь впливу змінних факторів. Показано, що на знос одночасно та практично рівномірно впливають усі три фактора. Модель дозволила мінімізувати величину зносу до 4,9 %, що у 6 разів менше, порівняно з відомими експериментальними даними. Запропоновано та випробувано новий спосіб обробки електричною дугою малих отворів, який відрізняється тим, що обробку здійснюють при видаленні робочої рідини разом з продуктами ерозії із технологічного каналу в електроді-інструменті за напрямком зверху вниз, тобто з використанням гравітаційної сили. Спосіб дозволяє ефективно вилучати продукти ерозії навіть з малих за діаметром каналів і тим самим забезпечує обробку отворів діаметром менше трьох міліметрів. Процес здійснюється без утворення технологічного виступу.

## Список літератури

1. Носуленко В. И. Размерная обработка металлов электрической дугой / В. И. Носуленко, Г. Н. Мещеряков // Электронная обработка материалов. – 1981. – С. 19-23.
2. Боков В. М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою. Монографія / В. М. Боков. – Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс – ЛТД», 2002. – 300 с.
3. Попова М. І. Прогнозування технологічних характеристик та інтенсифікація процесу розмірної обробки електричною дугою складно профільних отворів: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.07 / Попова Маргарита Іванівна. – Кіровоград, 2001. – 182 с.
4. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования эксперт-ментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1080. – 304 с.
5. Боков В. М. Розмірна обробка електричною дугою кувальних штампів. Монографія / В. М. Боков. – Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс – ЛТД», 2012. – 178 с.
6. Пат. 19986 Україна, МПК В 23 Р 6/00. Спосіб розмірної обробки електричною дугою дрібних отворів та щілин / Боков В. М., Павленко О. В.; заявник та патентоволодар Кіровоградський національний технічний університет. – u 200605794; заявл. 26.05.2006; опубл. 15.01.2007, Бюл. №1.

**Viktor Bokov**

*Kirovograd National Technical University*

**Treatment of holes by the arc using copper electrochemical machining electrode**

The objective of the work is to forecast technological parameters and increase of efficiency of the process of dimensional treatment of holes by the arc using copper electrochemical machining electrodes.

The work presents the results of experimental research of the following technological parameters: relative linear wear of a copper electrochemical machining electrode, roughness of the treated surface, flank spark gap, treatment productivity, specific output of treatment and unit discharge of energy.

Conclusions:

- theoretical and practical principles of forecasting technological parameters and increase of efficiency of the process of treatment of holes by the arc using copper electrochemical machining electrodes were worked out;
- the simulator of relative linear wear of copper electrochemical machining electrode was received which enabled showing the conditions to minimize wear;
- new effective way of treatment of small holes by the arc was suggested and tested.

**electric arc, copper electrochemical machining electrode, holes, hydrodynamic mode, technological parameters, treatment of small holes**

Одержано 28.11.13

**УДК 621.793**

**І.Ф. Василенко, доц., канд. техн. наук**

*Кіровоградський національний технічний університет*

## **Дослідження властивостей композиційних покриттів, нанесених контактним наварюванням порошкових дротів**

Наведені в статті результати дюрOMETричних досліджень, а також досліджень пористості та зносостійкості композиційних покриттів, нанесених контактним наварюванням порошкових дротів, показали доцільність застосування таких покриттів для деталей сільськогосподарської техніки, які працюють в умовах абразивного зношування. Вибрано склад порошкових дротів, що забезпечує одержання композиційних покриттів з найвищою зносостійкістю

**композиційне покриття, порошковий дріт, контактне наварювання, зносостійкість, мікротвердість, пористість**

**И.Ф. Василенко, доц., канд. техн. наук**

*Кировоградский национальный технический университет*

**Исследование свойств композиционных покрытий, нанесенных контактном навариванием порошковых проволок**

Приведенные в статье результаты дюрOMETрических исследований, а также исследований пористости и износостойкости композиционных покрытий, нанесенных контактном навариванием порошковых проволок, показали целесообразность применения таких покрытий для деталей сельскохозяйственной техники, которые работают в условиях абразивного изнашивания. Выбран состав порошковых проволок, который обеспечивает получение композиционных покрытий с наибольшей износостойкостью

**композиционное покрытие, порошковая проволока, контактном наваривание, износостойкость, микротвердость, пористость**

© І.Ф. Василенко, 2014