

УДК 621.9.048.4

В.І. НОСУЛЕНКО, В.М. ШМЕЛЬОВ, В.В. ЮР'ЄВ
Центральноукраїнський національний технічний університет**ВПЛИВ ГЕОМЕТРІЇ ТА РОЗМІРІВ ЕЛЕКТРОДА-ІНСТРУМЕНТА НА
ТЕХНОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕСУ РОЗМІРНОЇ ОБРОБКИ
ЕЛЕКТРИЧНОЮ ДУГОЮ**

Розглянуто вплив гідродинамічних характеристик робочої рідини в міжелектродному зазорі на електротехнологічні характеристики процесу розмірної обробки електричною дугою деталей як по внутрішньому, так і зовнішньому контурах за визначених точності і якості оброблених поверхонь. За умов, якщо геометрія та розміри електрода-інструмента розглядати останні в послідовності, що відповідають напрямку руху робочої рідини в міжелектродному зазорі і коли розрізняють: передній кут α , радіус закруглення робочої кромки r , задній кут β , радіус закруглення задньої кромки R .

Ключові слова: електрод-інструмент, електрична дуга, розмірна обробка електричною дугою, схеми формоутворення, робоча рідина.

В.И. НОСУЛЕНКО, В.Н. ШМЕЛЕВ, В.В. ЮРЬЕВ
Центральноукраинский национальный технический университет**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ И РАЗМЕРОВ ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА НА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА РАЗМЕРНОЙ ОБРОБОТКИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОЙ**

Рассмотрено влияние гидродинамических характеристик рабочей жидкости в межэлектродном зазоре на электротехнологические характеристики процесса размерной обработки электрической дугой деталей как во внутреннем, так и внешнем контурах при определенных точности и качества обработанных поверхностей. При условии, если геометрия и размеры электрода-инструмента рассматривать последние в последовательности, соответствующих направлению движения рабочей жидкости в межэлектродном зазоре и когда различают: передний угол α , радиус закругления рабочей кромки r , задний угол β , радиус закругления задней кромки R .

Ключевые слова: электрод-инструмент, электрическая дуга, размерная обработка электрической дугой, схемы формообразования, рабочая жидкость.

V.I. NOSULENKO, V.N. SHMELYOV, V.V. YURIEV
Central Ukrainian National Technical University**THE INFLUENCE OF GEOMETRY AND SIZE OF ELECTRODE-TOOL ON TECHNOLOGICAL
CHARACTERISTICS OF THE PROCESS OF DIMENSIONAL PROCESSING BY ELECTRIC ARC**

The radius of curvature of the rear edges R . β The influence of the hydrodynamic characteristics of the working fluid in the interelectrode gap on the electrotechnical characteristics of the process of dimensional processing by electric arc of parts both internal and external contours under certain precision and quality of machined surfaces. If the geometry and dimensions of the electrode-tool to examine the last in the sequence corresponding to the direction of movement of the working fluid in the interelectrode gap, and when there are: rake angle α , the radius of curvature of the working edge r , rear edges β , he radius of curvature of the rear edges R .

Keywords: electrode-tool, electric arc, dimensional electric arc machining, formation circuits, working fluid.

Постановка проблеми

Розмірну обробку електричною дугою (РОД) [1] деталей по принципу прошивання за умов їх отримання як по внутрішньому, так і зовнішньому контурах здійснюють за відомими технологічними схема формоутворення [2] та з використанням електродів-інструментів (ЕІ) з прямою під 90° робочою кромкою. Проте така конструкція ЕІ не забезпечує необхідну якість обробки поверхні заготовки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Як відомо [1], технологічні характеристики процесу (продуктивність, якість обробленої поверхні, точність обробки, стійкість ЕІ) визначаються перш за все силою технологічного струму та динамічним тиском потоку робочої рідини. Для реалізації процесу РОД деталей необхідно описати особливості гідродинаміки потоку робочої рідини в міжелектродному зазорі (МЕЗ) та

електротехнологічні характеристики процесу в умовах конкретних технологій і на цій основі розробити конструкції ЕІ (геометрію та виконавчі розміри), технологічні схеми формоутворення та визначити режими обробки.

Формулювання мети досліджень

Для забезпечення необхідної якості обробленої поверхні треба забезпечити рівномірну течію робочої рідини в будь-якій точці МЕЗ. Відповідно до цього метою даної роботи є розробка геометрії ЕІ, що забезпечує рівномірну течію робочої рідини в МЕЗ.

Дана мета реалізується за рахунок вирішення наступних задач:

- дослідження гідродинаміки потоку робочої рідини в МЕЗ;
- розробка конструкції ЕІ;
- дослідження фізико-технологічних характеристик процесу;
- визначення оптимальної геометрії ЕІ.

Викладення основного матеріалу дослідження

Як відомо [1], енергетичні характеристики дуги в умовах РОД, а отже і технологічні характеристики процесу регулюються легко, плавно і в широкому діапазоні за рахунок зміни динамічного тиску потоку та струму обробки. При цьому фізична модель процесу РОД описується простим співвідношенням:

$$y = k I^a P_d^b \quad (1)$$

де y – будь-який технологічний показник (характеристика) процесу, наприклад, продуктивність, шорсткість, глибина зони термічного впливу і інше;

k – коефіцієнт розмірності;

I – сила струму, А, приймається в межах від декількох ампер до декількох тисяч ампер, визначає продуктивність обробки і таким чином, по суті, відображає кількісну сторону процесу;

P_d – динамічний тиск потоку робочої рідини, Па, вибирається в межах від 1...2 кПа до 1МПа і більше, визначає якісну обробку (шорсткість, глибину зони термічного впливу, точність) і таким чином, по суті, відображає якісну сторону процесу;

a і b – показники степені, різноманітні для різних технологічних характеристик:

Динамічний тиск P_d є функцією статичного тиску P_s робочої рідини на вході в МЕЗ, гідравлічного опору траси евакуації продуктів ерозії в межах МЕЗ та місцевих гідравлічних опорів.

В цьому зв'язку, розглянемо запропоновану конструкцію ЕІ (рис.1) і її вплив на гідродинаміку процесу в послідовності, що відповідає напрямку руху робочої рідини в МЕЗ, а саме: передній кут α , радіус закруглення робочої кромки r , задній кут β , радіус закруглення задньої кромки R .

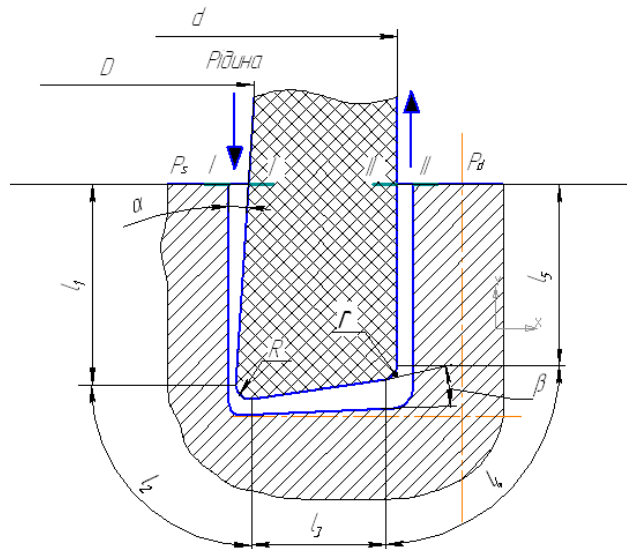


Рис. 1. Електрод-інструмент

Робоча рідина подається в напрямку від периферії ЕІ до його центру. Нахил бічної поверхні під кутом α забезпечує течію робочої рідини в звужуючу щілину, що стабілізує потік та забезпечує ламінарний рух робочої рідини. Для забезпечення стабільності потоку безпосередньо на робочій кромці електрода-інструмента, передбачають радіус закруглення R , що попереджає відрив потоку від стінки ЕІ і забезпечує стабільність процесу, відповідну якість обробленої поверхні, а саме шорсткість та регульовану зону термічного впливу. В напрямку течії робочої рідини від периферії до центра ЕІ відбувається звуження потоку робочої рідини, яке призводить до зміни швидкості потоку по довжині

торцевого МЕЗ, що викликає нерівномірну шорсткість торцевої поверхні заготовки. Для вирівнювання швидкості потоку в торцевому МЕЗ передбачають нахил робочої кромки ЕІ в межах кута β .

Якщо враховувати, що стабільність P_d – це наслідок нерівномірного руху робочої рідини в межах МЕЗ, то його порушення сприяють: нерівномірність подачі робочої рідини насосом, збільшення траси евакуації продуктів ерозії в межах МЕЗ, наявність місцевих опорів, зменшення зазору, зміни сили струму. Отже, зменшення дії зазначених факторів будуть сприяти підвищенню стабільності процесу, а отже і підвищенню якості обробки.

Визначимо та опишемо вплив геометрії та виконавчих розмірів ЕІ з точки зору оптимальних гідродинамічних характеристик потоку робочої рідини, за умов забезпечення рівномірного руху робочої рідини, що досягається уникненням пульсацій швидкості в турбулентному потоці, нерівномірності тиску та оптимізації технологічних характеристик.

За зазначених умов (рис. 1) запишемо для цього рівняння Бернуллі для перерізів I-I на вході в МЕЗ і перерізі II-II на виході з МЕЗ:

$$P_s = \xi_{вх} \frac{\rho v_k^2}{2} + \lambda_1 \frac{l_1}{d_1} \cdot \frac{\rho v_k^2}{2} + \xi_{пз} \frac{\rho v_k^2}{2} + \lambda_3 \frac{l_3}{d_3} \cdot \frac{\rho v_k^2}{2} + \xi_{пв} \frac{\rho v_k^2}{2} + \lambda_5 \frac{l_5}{d_5} \cdot \frac{\rho v_k^2}{2} + \xi_{вих} \frac{\rho v_k^2}{2} \quad (2)$$

де $\lambda_1, \lambda_3, \lambda_5$ – коефіцієнт опору на довжині відповідної траси, l_1, l_3, l_5 – довжина відповідної траси, $m, d_i = D_0 - d = 2\delta$ – гідравлічний діаметр кільцевого зазору, m, δ – односторонній МЕЗ, m, v_i та v_k – швидкість потоку на відповідних ділянках траси, $m/c, \xi_{вх}$ – коефіцієнт місцевого опору на вході в зазор, $\xi_{пз}, \xi_{пв}$ – коефіцієнт місцевого опору на повороті, $\xi_{вих}$ – коефіцієнт місцевого опору на виході з зазору.

Розглянемо особливості втрат тиску на окремих ділянках l_1, l_2, l_3, l_4, l_5 , траси течії робочої рідини.

На початку процесу (рис.2), коли ЕІ заглибився в заготовку, вихроутворення є основним джерелом місцевих втрат тиску на вході потоку в МЕЗ. Вихрова зона в МЕЗ може бути суттєво зменшена, або зовсім відсутня, коли кромки електродів плавно скруглені. Місцеві втрати тиску на вході в МЕЗ можна розрахувати за формулою:

$$\xi_{вх} = \frac{\rho \cdot Q^2}{2\pi^2 D^2 \delta^2} \quad (3)$$

де $\xi_{вх}$ - коефіцієнт місцевого гідравлічного опору на вході потоку в МЕЗ [4. 93...118];

Q – витрати робочої рідини, m^3/c ;

D – зовнішній діаметр електрода-інструмента, mm ;

ρ – густина робочої рідини, kg/m^3 ;

δ – міжелектродний зазор, mm .



Рис. 2. Вихрова зона

Ділянка l_1 (рис. 1) являє собою односторонній зазор δ , для забезпечення стабільного процесу і рівномірного руху робочої рідини доцільно передбачити нахил ЕІ під кутом α , який має складати $0^\circ 30' \dots 1^\circ$ [3]. За цих умов змінне значення коефіцієнта гідравлічного опору в боковому зовнішньому МЕЗ розраховується за формулою [3. с. 245...252]:

$$\xi_{бз} = \frac{\lambda_{бз} \cdot l_1}{D_{z(бз)}} = \frac{24\pi v D}{\delta_{бз} Q}, \quad (4)$$

де $\lambda_{бз}$ – лінійний коефіцієнт гідравлічного тертя:

$$\lambda_{бз} = \frac{96 \cdot v}{V_{бз} D_{z(бз)}} = \frac{48\pi v D}{Q}, \quad (5)$$

$\delta_{бз}$ – бічний зовнішній міжелектродний зазор, mm ;

v – середня швидкість потоку робочої рідини в МЕЗ, m/c ;

$D_{z(бз)}$ – змінне значення гідравлічного діаметру бокового зовнішнього МЕЗ, m :

$$D_{z(бз)} = 2\delta_{бз}, \quad (6)$$

$V_{бз}$ – змінне значення швидкості в боковому зовнішньому МЕЗ, m/c ;

Ділянка l_2 (рис. 1), являє собою скруглення поворота радіусом $R \geq 0,5 \dots 1 mm$, який попереджає відрив потоку від стінки ЕІ і забезпечує стабільний процес та відповідну якість обробленої поверхні. За

цих умов змінне значення коефіцієнта гідравлічного опору при зовнішньому повороті робочої рідини розраховується за формулою [4. с. 257...262]:

$$\xi_{пз} = A_1 \cdot B_1 \cdot C_1, \tag{7}$$

де A_1 – коефіцієнт, що враховує вплив кута повороту потоку робочої рідини в МЕЗ θ (рис. 4);

B_1 – коефіцієнт, що враховує вплив відносного радіуса закруглення (r/δ) (рис. 5);

C_1 – коефіцієнт, що враховує відносну видовженість поперечного перерізу. Для плоских щілин складає 1.

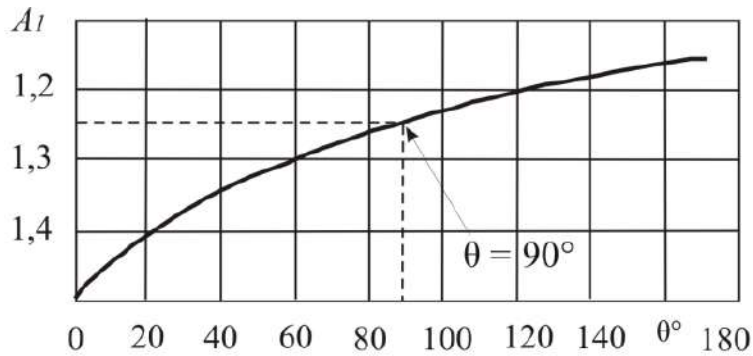


Рис. 4. Вплив кута повороту потоку робочої рідини в МЕЗ θ

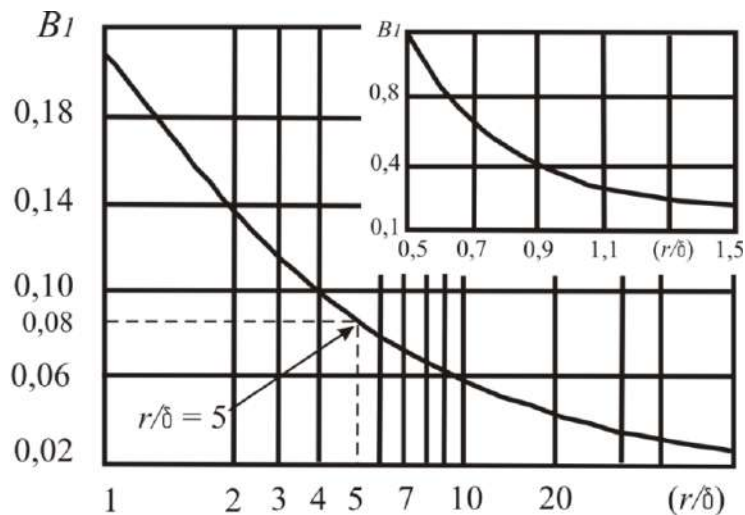


Рис. 5. Вплив відносного радіуса закруглення (r/δ)

Ділянка l_3 (рис. 1), приймаємо до уваги, що в напрямку руху робочої рідини від периферії до центру ЕІ робоча рідина збільшує швидкість, що в свою чергу порушує рівномірну течію робочої рідини, створює турбулентний рух робочої рідини, що призводить до нерівномірної шорсткості поверхні заготовки. Для цього необхідно збільшити зазор а напрямку руху робочої рідини за умов забезпечення рівномірної швидкості робочої рідини в МЕЗ, для чого передбачають на торці ЕІ нахил торцевої поверхні ЕІ в межах кута $\beta = 0 \dots 5^\circ$. За цих умов змінне значення коефіцієнта гідравлічного опору при зовнішньому повороті робочої рідини розраховується за формулою [4. с. 275...298]:

$$\xi_m = \frac{\lambda_m \cdot l_3}{D_{z(m)}} = \frac{12\pi v(D-d)^2}{Q\delta l_m D/d}, \tag{8}$$

де λ_m – змінне значення лінійного коефіцієнта гідравлічного тертя у торцевому МЕЗ. Для визначення закону зміни даного коефіцієнта оцінимо режим течії робочої рідини у торцевому МЕЗ:

$$\lambda_m = \frac{96}{Re} = \frac{96v}{V_m \cdot D_{z(m)}}, \tag{9}$$

$D_{z(m)}$ – змінне значення гідравлічного діаметру торцевого МЕЗ, м:

$$D_{z(m)} = 2\delta_m \tag{10}$$

d – внутрішній діаметр електрода-інструмента, мм;

Re – змінне значення числа Рейнольда в торцевому МЕЗ;

V_m – змінне значення швидкості в торцевому МЕЗ, м/с;

δ_m – змінне значення торцевого МЕЗ, м.

Ділянка l_4 (рис. 1), при повороті робочої рідини з торцевого в бічний внутрішній МЕЗ виникають місцеві втрати тиску, які обумовлені місцевим порушенням нормальної течії робочої рідини, інерційним

відривом від поверхонь ЕІ, з подальшим вихроутворенням в місцях відриву. В цьому випадку доцільно передбачити радіус закруглення r , який доцільно прийняти в межах 5...10 мм в свою чергу збереже постійну швидкість робочої рідини на цій ділянці. За цих умов змінне значення коефіцієнта гідравлічного опору при внутрішньому повороті робочої рідини розраховується за формулою [4. с. 257...262]:

$$\xi_{\text{пв}} = A_1 \cdot B_1 \cdot C_1 \quad (11)$$

Враховуючи масштаби поперечного перерізу потоку, який являє собою плоску щілину, висота якої відповідає міжелектродному зазору і знаходиться в межах 0,04... 0,12 мм, радіус закруглення такого ж порядку практично не впливають на експлуатаційні якості деталі, а в деяких випадках навіть більш доцільні, ніж гостра кромка.

Ділянка l_5 (рис. 1), являє собою циліндричний кільцевий МЕЗ, втрати тиску робочої рідини на якій пов'язані з гідравлічним опором в каналі, що розраховується з формулою [4. с. 275...298]:

$$\xi_{\kappa} = \frac{\lambda_{\kappa} \cdot l_5}{D_{z(\kappa)}} = \frac{16\pi v l_5}{Q}, \quad (12)$$

де λ_{κ} – коефіцієнт гідравлічного тертя в каналі ЕІ:

$$\lambda_{\kappa} = \frac{64v}{V_{\kappa} \cdot D_{z(\kappa)}} = \frac{32\pi v \sqrt{2d\delta_{\text{бв}}}}{Q} \quad (13)$$

$D_{z(\kappa)}$ – змінне значення гідравлічного діаметру каналу ЕІ, м;

$$D_{z(\kappa)} = 2\sqrt{2D}\delta_{\text{бв}}, \quad (14)$$

δ_{κ} – змінне значення бокового внутрішнього МЕЗ, м;

V_{κ} – швидкість потоку робочої рідини в каналі ЕІ, м/с.

На виході робочої рідини з МЕЗ відбувається раптове розширення потоку робочої рідини і виникають так звані втрати на «гідравлічний удар». Цим явищем пояснюється місцеві втрати тиску на виході потоку з МЕЗ, які аналогічно іншим місцевим втратам, враховуються відповідним коефіцієнтом гідравлічного опору при раптовому розширенні. Коефіцієнт гідравлічного опору в цьому зв'язку визначається за формулою [4. с. 56...90]:

$$\xi_{\text{вих}} = \frac{\rho \cdot Q^2}{2\pi^2 a^2 \delta^2} \quad (15)$$

Для визначення впливу геометрії ЕІ на якість обробленої поверхні та дослідження впливу інших змінних факторів на показники процесу проведено експериментальні дослідження в рамках яких побудовано математичні моделі процесу РОД. В рамках якого на підставі апріорної інформації були відібрані три фактори, які впливають на фізико-технологічні характеристики даного процесу[1]:

- сила технологічного струму I , А;
- статичний тиск робочої рідини на вході в МЕЗ P_s , МПа;
- задній кут β° .

Інші параметри процесу РОД були зафіксовані на наступних постійних рівнях:

- напруга на електродах 30 В;
- полярність обробки – зворотня;
- склад робочої рідини: масло індустріальне 20А ГОСТ 20790-75 – 50% ; гас освітлювальний ГОСТ 4953-68 – 50%;
- матеріал ЕЗ – сталь 45;
- матеріал ЕІ – вуглеграфітовий матеріал марки МПГ – 7 ТУ 48-23-73.

Для дослідження технологічних характеристик процесу РОД деталей застосовано експериментальний пристрій (рис. 6).

Для визначення фізико-технологічних характеристик процесу РОД використано математичні методи планування експерименту, що дало можливість отримати деякі теоретичні уявлення про фізичний механізм процесу і оцінити теоретичні передумови кількісно.

Продуктивність обробки. На рис. 7 показано ступінь впливу на продуктивність M обробки деталей, за таких значень змінних факторів: сили технологічно струму $I = 100...400$ А, статичного тиску $P_s = 0,7...1,5$ МПа, робочої напруги $U = 27$ В, торцевого кута $\beta = 0...5^\circ$.

Рівняння регресії для продуктивності обробки M має вигляд:

$$y(M) = 0,62 + 1,15 x_1 + 0,19 x_2 - 0,09 x_3 \quad (16)$$

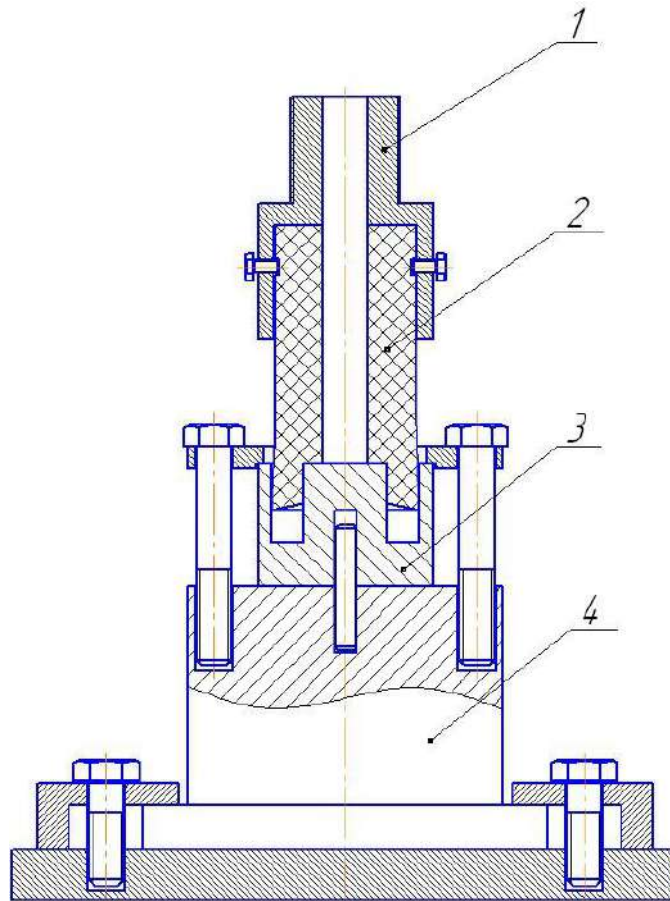


Рис. 6. Експериментальний пристрій для РОД деталей графітовим ЕІ: 1 – електродотримач; 2 – графітовий ЕІ; 3 – деталь; 4 – пристрій для кріплення деталі

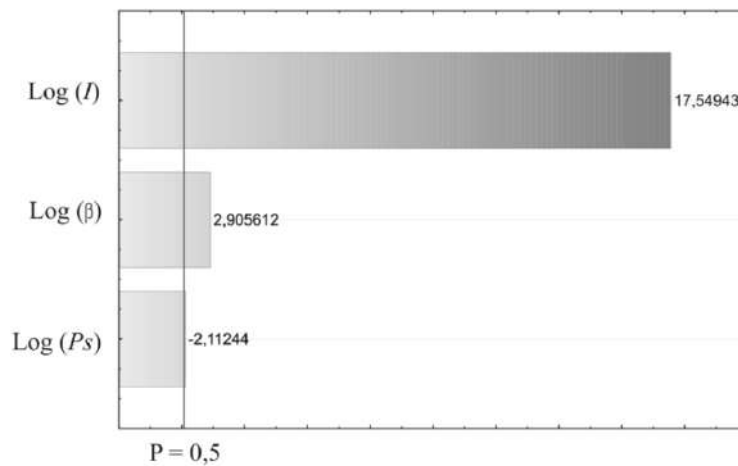


Рис. 7. Вплив змінних факторів на продуктивність обробки M

Відповідно математична модель продуктивності процесу M , $\text{мм}^3/\text{хв}$:

$$M = 4,161^{1,15} P_s^{-0,09} \beta^{0,19}$$

(17)

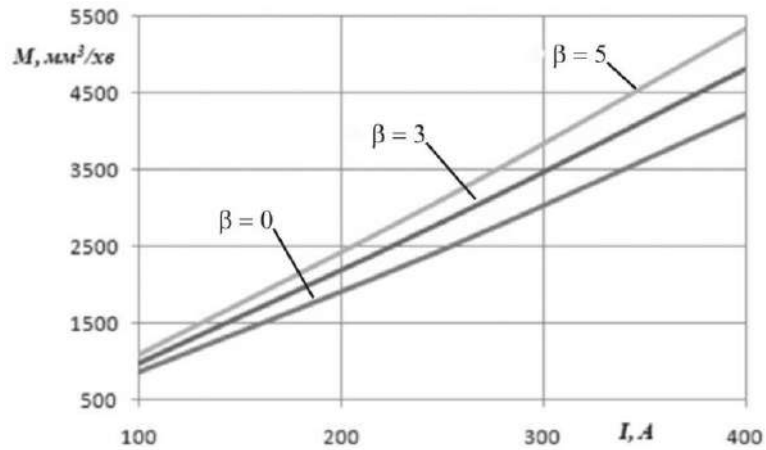


Рис. 8. Залежність продуктивності M від заднього кута β та сили технологічного струму I

Шорсткість обробленої поверхні. На рис. 9 показано ступінь впливу основних технологічних характеристик процесу на шорсткість обробленої поверхні Ra деталей.

Рівняння регресії для шорсткості обробленої поверхні Ra має вигляд:

$$y(Ra) = 0,15 + 0,41 x_1 - 0,15 x_2 + 0,48 x_3 \tag{18}$$

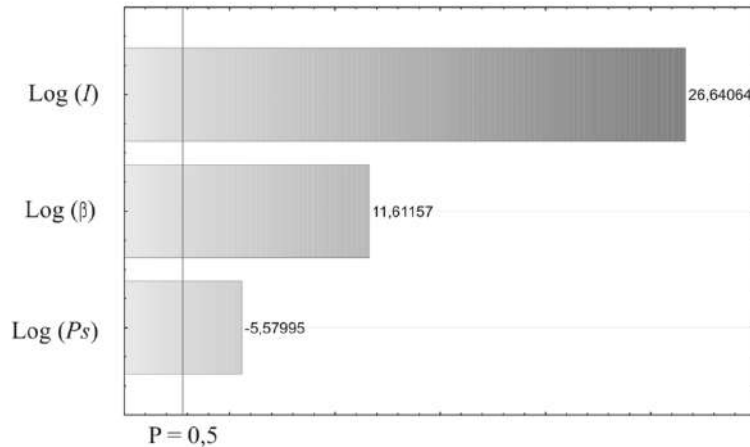


Рис. 9. Вплив змінних факторів на величину шорсткості обробленої поверхні Ra

Відповідно, математична модель шорсткості, мкм:

$$Ra = 1,41I^{0,41}P_s^{-0,15}\beta^{0,48} \tag{19}$$

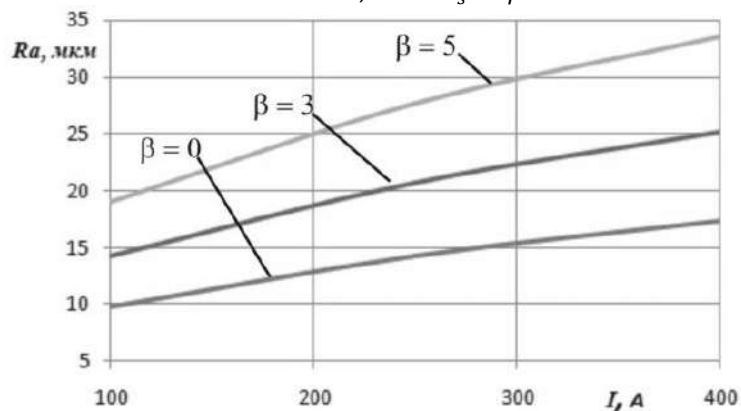


Рис. 10. Залежність шорсткості обробленої поверхні Ra від заднього кута β та сили технологічного струму I

Лінійний знос EI. На рис. 11 показано ступінь впливу основних технологічних характеристик процесу на відносний лінійний знос EI γ .

Рівняння регресії для відносного лінійного зносу EI γ має вигляд:

$$y(\gamma) = -0,58 + 0,33 x_1 + 0,25 x_2 - 0,58 x_3 \tag{20}$$

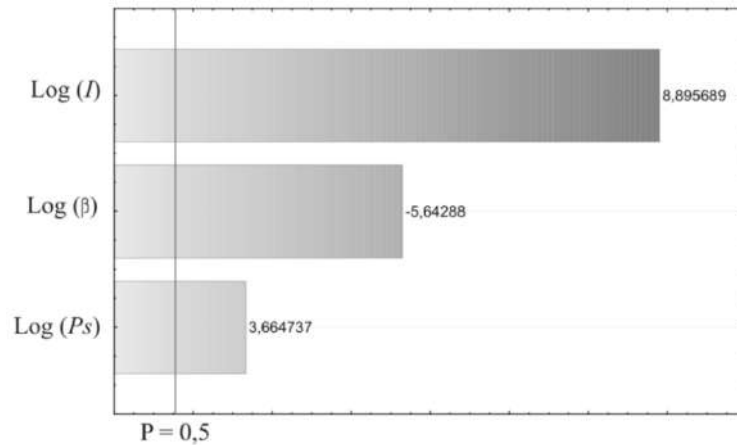


Рис. 11. Вплив змінних факторів на відносного лінійного зносу EI γ

Відповідно, математична модель відносного лінійного зносу EI γ має вигляд, %:

$$\gamma = 0,26I^{0,33}P_s^{0,25}\beta^{-0,58} \tag{21}$$

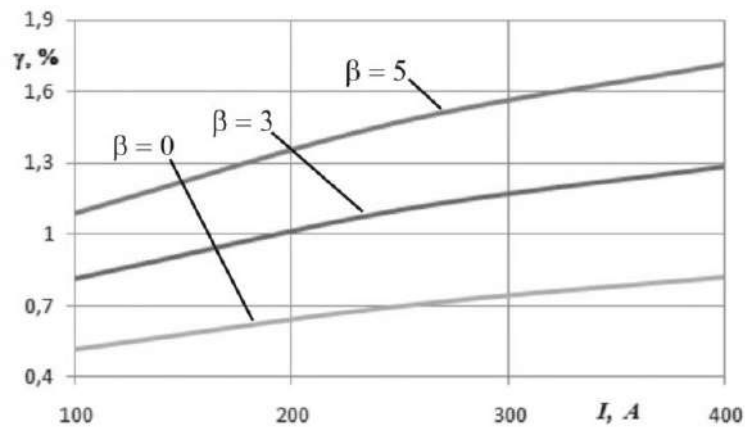


Рис. 12. Залежність відносного лінійного зносу EI γ від заднього кута β та сили технологічного струму I

Міжелектродний зазор. На рис. 13 показано ступінь впливу основних технологічних характеристик процесу на величину міжелектродного зазору δ .

Рівняння регресії для величини між електродного зазору δ має вигляд:

$$y(\delta) = -1,7 + 0,27 x_1 - 0,29 x_2 + 0,56 x_3 \tag{22}$$

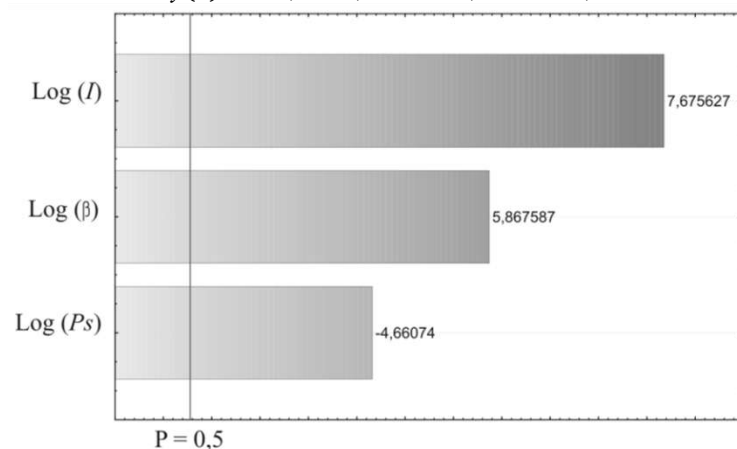


Рис. 13. Вплив змінних факторів на величину міжелектродного зазору δ

Відповідно, математична модель величини міжелектродного зазору δ має вигляд, мм:

$$\gamma = 0,007I^{0,27}P_s^{-0,29}\beta^{0,56} \quad (23)$$

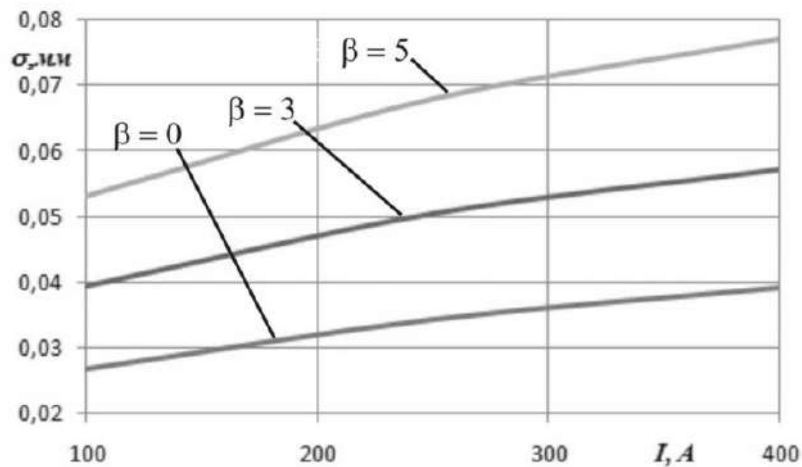


Рис. 14. Залежність міжелектродного зазору δ від заднього кута β та сили технологічного струму I

Висновки

На підставі теоретичних і експериментальних досліджень розглянуто вплив геометрії та розмірів електрода-інструмента на гідродинамічні характеристики робочої рідини в МЕЗ і відповідно на електротехнологічні характеристики процесу РОД, в умовах конкретних технологій і на цій основі описано оптимальні геометрія та виконавчі розміри ЕІ, які складають: передній кут $\alpha = 0^\circ 30' \dots 1$, радіус закруглення робочої кромки $r = 5 \dots 10$ мм, задній кут $\beta = 0 \dots 5^\circ$, радіус закруглення задньої кромки $r = 0,5 \dots 1$ мм.

Список літератури

1. Носуленко В.И. размерная обработка металлов стационарной электрической дугой: Дис... канд. техн. Наук: 05.03.04. – Кировоград, 1977. – 202 с.
2. Чумаченко О. С. Розмірна обробка електричною дугою листових деталей: автореф. дис. на здобуття наук, ступеня канд. техн. наук: спец. 05.03.07.. – Київ, 2002. – 20с.
3. Пат. 17685 Україна, МПК В 23 К 9/00. Електрод-інструмент для розмірної обробки електричною дугою отворів / В. І. Носуленко, В. В. Юр'єв, А. С. Пархоменко (Україна). - № 110775/UA; Заявл. 25.03.2016; Опубл. 25.10.2016, Бюл. № 20.
4. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.