

УДК 621.9.048.4

В. І. НОСУЛЕНКО, В. М. ШМЕЛЬОВ, В. В. ЮР'ЄВ

КРИТЕРІЙ СКЛАДНОСТІ ОТВОРІВ ЯК ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКТОР В УМОВАХ РОД

При розробці технологічного процесу виготовлення отворів, для забезпечення необхідної продуктивності та якості обробки, необхідно враховувати технологічні особливості процесу РОД, зокрема за умов обробки отворів з розвиненим, складним периметром. В цьому випадку доцільно описати відповідним чином цю так звану складність отвору. Для цього введемо поняття критерію складності отворів K як технологічного фактора в умовах РОД, що в відомих межах визначає область раціонального застосування однієї з наведених технологічних схем формоутворення.

Ключові слова: електрична дуга, розмірна обробка електричною дугою, складний контур, електрод-інструмент, заготовка, формоутворення.

При разработке технологического процесса изготовления отверстий, для обеспечения требуемой производительности и качества обработки, необходимо учитывать технологические особенности процесса РОД, в частности по условиям обработки отверстий с развитым, сложным периметром. В этом случае целесообразно описать соответствующим образом эту так называемую сложность проема. Для этого введем понятие критерия сложности отверстий K как технологического фактора в условиях РОД, что в известных границах определяет область рационального применения одного из приведенных технологических схем формообразования.

Ключевые слова: электрическая дуга, размерная обработка электрической дугой, сложный контур, электрод-инструмент, заготовки, формообразование.

For holes for simple contour shapes using known way dimensional processing electric arc on the principle of insertion of the electrode-tool with a hole in the center, with pumping fluid in the direction from the periphery to the center and continue through the hole to drain. To stabilize the process and its exclusion violations are evident in the processing of asymmetric and large surfaces with multi-processing, using multisection electrode sufficient to hydraulic resistance on all lines leak of working fluid was possible minimal and roughly the same, which track pumping working fluid through the interelectrode gap should be as minimal and roughly the same. When developing the technological process of manufacture of the holes, to ensure the required performance and quality processing, it is necessary to consider technological features of the process of the arc dimensional processing (ADM), in particular on the conditions of processing of holes with a developed, complex perimeter. In this case, it is appropriate to describe appropriately this so-called complexity gap. For this we introduce the notion of level of difficulty of holes as a technological factor in a ADM that determines the boundaries of the field of rational application of one of the technological schemes of forming.

Keywords: electric arc, dimensional processing of electric arc, a complex circuit, the electrode tool, workpiece, forming.

Вступ. Для отримання отворів простих за контуром форм застосовують відомий спосіб розмірної обробки електричною дугою (РОД) [1] по принципу прошивання електродом-інструментом (ЕІ) з отвором по центру ЕІ (рис. 1) [2], з прокачуванням робочої рідини в напрямку від периферії ЕІ до його центру і надалі через отвір в ЕІ на злив.

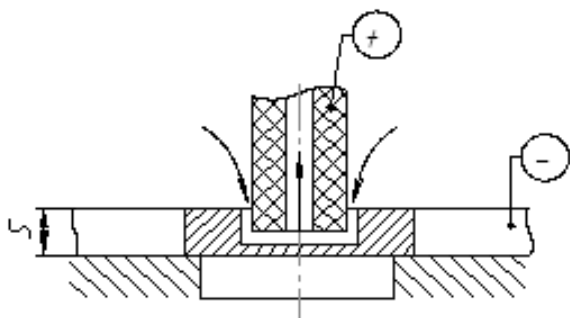


Рис. 1 – Технологічна схема процесу формоутворення при прокачуванні робочої рідини через отвір в ЕІ

Для обробки отворів з розвиненим (складним по контуру) периметром зазначена технологічна схема формоутворення не може бути використана в зв'язку з неможливістю забезпечення рівномірної течії робочої рідини по периметру обробки. Як наслідок, такий процес неможливо реалізувати технологічно, оскільки енергетичні характеристики розряду

(густина сили струму, напруженість електричного поля), а отже і технологічні характеристики процесу РОД продуктивність обробки M , шорсткість обробленої поверхні Ra , відносний лінійний знос EI γ та бічний міжелектродний зазор δ визначаються перш за все динамічним тиском P_d потоку робочої рідини, який за зазначених умов є по суті некерованим по периметру обробки [3]. За цих умов процес обробки стає не стабільним (рис. 2), енергетичні характеристики дуги стають близькі до енергетичних характеристик звичайних зварювальних дуг. Як наслідок така дуга псує оброблювану поверхню.

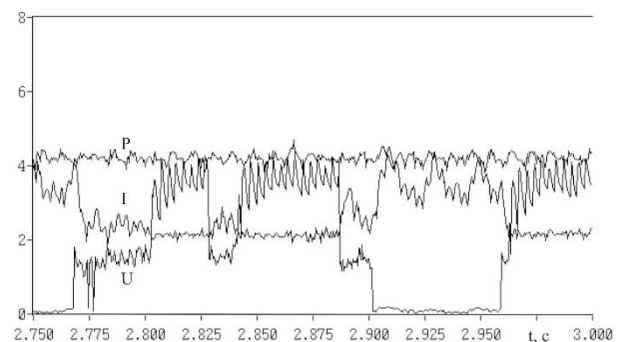


Рис. 2 – Осцилограма нестабільного процесу РОД

Для стабілізації процесу і виключення його порушень, що особливо виявляється при обробці несиметричних і великих поверхонь, при

багатоелектродній обробці, при використанні багатосекційних електродів і т. і., достатньо щоб гідравлічний опір на всіх лініях течії робочої рідини був по можливості мінімальним і приблизно однаковим, для чого траси прокачування робочої рідини через міжелектродний зазор повинні бути по можливості мінімальними і приблизно однаковими. Для цього робочу поверхню ЕІ або заготовки поділяють на крем'я ділянки прокачування, які повинні наближатися до круглих чи квадратних в плані.

На рис. 3 наведено приклад технологічної схеми, коли в ЕІ попередньо просвердлюють декілька отворів для відведення робочої рідини з кроком, що забезпечує приблизно однакову довжину траси течії робочої рідини і що дозволяє вирівняти динамічний тиск потоку робочої рідини по периметру обробки та забезпечити її якість.

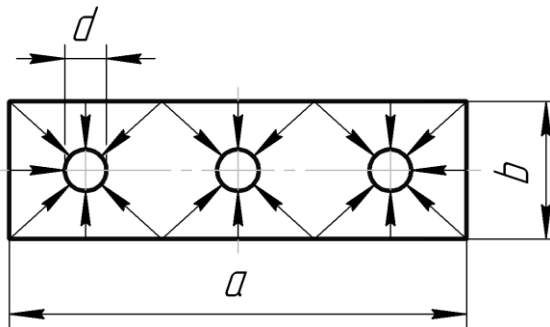


Рис. 3 – Технологічна схема формоутворення з прокачуванням робочої рідини крізь отвори в заготовці

Таку технологічну схему можливо використовувати, наприклад, для отворів з великим співвідношенням довжини отвору до його ширини, зокрема для отримання щілин.

Проте, при ширині щілини $b=3$ мм і менше необхідно в ЕІ свердлити отвори діаметром $d=1,5$ мм і менше. Малий діаметр отвору для відведення робочої рідини та евакуації продуктів ерозії призведе до погіршення гідродинаміки течії робочої рідини внаслідок значних гідродинамічних втрат при протіканні рідини крізь отвори малого діаметру. За таких умов динамічний тиск потоку робочої рідини знизиться, що погіршить енергетичні характеристики дуги в зоні обробки, як наслідок процес ерозії металу буде припинено. Більш того, динамічний тиск потоку робочої рідини знизиться нижче деякого критичного рівня на будь-якій ділянці МЕЗ, процес дестабілізується та може зовсім припинитися. Це суттєво обмежує область використання вископродуктивного процесу РОД.

В цьому зв'язку, нами запропоновано технологічну схему формоутворення деталей з розвиненим периметром (рис. 4), яка відрізняється тим, що в заготовці попередньо передбачають технологічний отвір діаметром 1...3 мм, який розташовують в геометричному центрі отвору заготовки, а торцеву робочу поверхню ЕІ формують

у вигляді зовнішньої конічної поверхні, основа якої являє собою периметр ЕІ, а вершину розташовують в точці, що відповідає геометричному центрі зазначеного технологічного отвору обробку виконують при прокачуванні робочої рідини через технологічний отвір в напрямку від периферії до центра ЕІ і надалі через технологічний отвір на злив.[4].

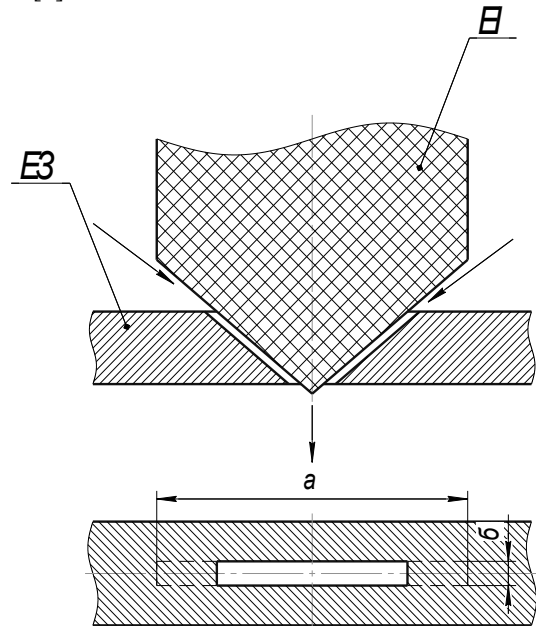


Рис. 4 – Технологічна схема формоутворення вузьких щілин

Для визначення раціональної області застосування наведених технологічних схем формоутворення в залежності від складності контуру отворів, доцільно ввести поняття критерію складності отворів як технологічного фактора в умовах РОД.

Постановка завдання – визначення критерію складності отворів як технологічного фактора в умовах РОД.

Поставлена задача реалізується шляхом:

- визначення критерію складності;
- обґрунтування нових технологічних прийомів;
- підвищення економічної ефективності процесу.

Виклад основного матеріалу. Для процесу РОД складність отвору визначається можливістю організації прокачування робочої рідини через міжелектродний зазор і отже залежить від форми та розмірів оброблюваного контуру такого отвору.

Для оцінки складності виготовлення отвору за умов процесу РОД введемо поняття критерію складності K , для визначення якого запропоновано використовувати наступну залежність:

$$K = \frac{P_k}{P_\phi} K = \frac{P_k}{P_\phi}, \quad (1)$$

де P_k – периметр «ідеальної» фігури – кола, площа якого дорівнює площі отвору складного контуру, що обробляється;

P_ϕ – периметр отвору складного контуру.

Вибір ідеальної фігури у вигляді кола пояснюється тим, що при заданій площі отвору, саме отвір круглого поперечного перерізу отримує мінімально можливий периметр і найкращі можливості рівномірної течії робочої рідини.

Так, наприклад, до отворів складного контуру можна віднести щілини. Щілина – складна форма отвору, як в розумінні організації потоку робочої рідини, так і у співвідношенні з ідеальною фігурою – колом. За результатами експериментальних досліджень при отриманні щілин за технологічною схемою (рис. 1) мінімально можливі розміри щілин та їх співвідношення дорівнює $a/b = 25/3$. Складає відповідно, довжина $a = 25$ мм, ширина $b = 3$ мм.

Згідно виразу (1) для щілини критерій складності визначатиметься за формулою:

$$K = \frac{\pi \cdot 1,13 \cdot \sqrt{a \cdot b}}{2 \cdot (a + b)} \quad (2)$$

Для щілини зазначених розмірів при $a = 25$ мм, $b = 3$ мм критерій складності згідно виразу (2) складає $K = 0,5$.

За результатами експериментальних досліджень побудовано діаграму (рис. 5) для вибору технологічних схем формоутворення. При складності контуру отвору $K \leq 0,5$ необхідно реалізовувати технологічну схему формоутворення з суцільним електродом без отвору при прокачуванні робочої рідини через отвір в заготовці (рис. 4).

При складності отвору $K > 0,5$ необхідно застосовувати технологічну схему формоутворення (рис. 1).

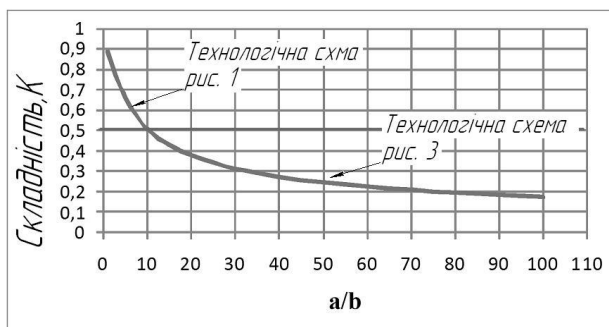


Рис. 5 – Графік залежності складності від габаритних розмірів отвору

Як приклад, розглянемо вибір технологічної схеми формоутворення для “Н” – подібного отвору з розмірами, зазначеними на рис. 5

Критерій складності такого отвору згідно виразу (2) складає $K = 0,3$. Тоді згідно рис. 6 потрібно реалізовувати технологічну схему формоутворення з ЕІ без отвору при прокачуванні робочої рідини через отвір в заготовці (рис. 4).

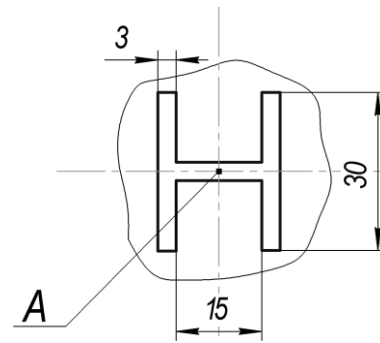


Рис. 6 – “Н” – подібний отвір

За цих умов робочу поверхню ЕІ формують у вигляді зовнішньої конічної поверхні, основа якої являє собою периметр ЕІ, а вершину розташовують в точці, що відповідає геометричному центру зазначеного технологічного отвору А (рис. 6). Такий ЕІ отримує вигляд (рис. 7).



Рис. 7 – ЕІ для отримання “Н” – подібного отвору

На рис. 8 показано ступінь впливу на продуктивність обробки M деталей з “Н” – подібним отвором змінних факторів: сили технологічного струму $I = 50 \dots 300$ А, статичного тиску $P_S = 0,8 \dots 1,6$ МПа, робочої напруги $U = 28 \dots 32$ В.

Рівняння регресії для продуктивності обробки M має вигляд:

$$y(M) = 0,18 + 0,989x_1 + 0,023x_2 - 0,099x_3 \quad (3)$$

Карта Парето стандартизованих ефектів; Перемен.: $\log M$
3 факторный отсев. план; Остаточ. SS = ,0004525
ЗП: $\log M$: = $\log_{10}("M \text{ mm}^3/\text{minute}')$

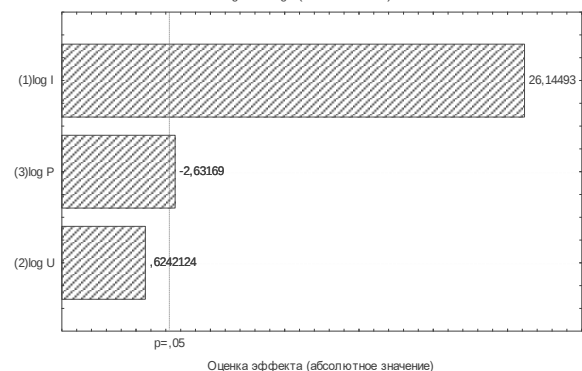


Рис. 8 – Вплив змінних факторів на продуктивність обробки M

Відповідно, математична модель продуктивності процесу M , мм³/хв:

$$M = 1,51 I^{1,3} U^{0,16} P_s^{-0,22} \quad (4)$$

Отримана залежність дозволяє зробити висновок, що продуктивність обробки M в діапазоні зазначених режимів визначається переважно силою технологічного струму I (при збільшенні сили технологічного струму I продуктивність обробки M зростає) і менше – статичним тиском робочої рідини P_s (продуктивність обробки M зменшується при збільшенні P_s). Робоча напруга U в зазначеному діапазоні, згідно рис. 9 не має істотного впливу на продуктивність процесу M , в зв'язку з цим уточнена математична модель продуктивності процесу M має вигляд, мм³/хв:

$$M = 2,818 I^{1,28} P_s^{-0,244} \quad (5)$$

На рис. 9 показано залежність продуктивності процесу M від сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини P_s .

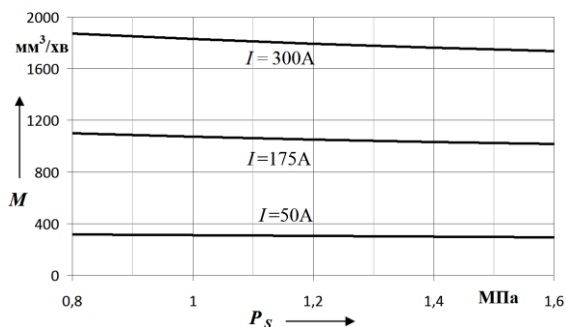


Рис. 9 – Залежність продуктивності процесу M від сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини P_s

На рис. 10 показано ступінь впливу основних технологічних характеристик процесу на шорсткість обробленої поверхні Ra деталей з “Н”- подібним отвором.

Рівняння регресії для шорсткості обробленої поверхні Ra має вигляд:

$$y(Ra) = 0,93 + 0,41x_1 - 0,0295x_2 - 0,41x_3 \quad (6)$$

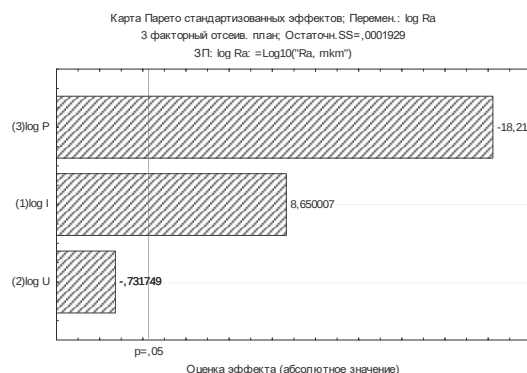


Рис. 10 – Вплив змінних факторів на величину шорсткості обробленої поверхні Ra

Відповідно, математична модель шорсткості, мкм:

$$Ra = 8,51 I^{0,41} U^{-0,029} P_s^{-0,896} \quad (7)$$

Шорсткість обробленої поверхні Ra залежить переважно від статичного тиску робочої рідини P_s на вході в зазор (зменшується при збільшенні P_s) і менше від величини сили технологічного струму (Ra збільшується при збільшенні I). Робоча напруга U , в зазначеному діапазоні, згідно рис. 10 не має істотного впливу на шорсткість обробленої поверхні Ra , в зв'язку з цим уточнена математична модель продуктивності процесу має вигляд, мкм:

$$Ra = 1,67 I^{0,28} P_s^{-1,01} \quad (8)$$

На рис. 11 показано залежність шорсткості обробленої поверхні Ra від сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини P_s .

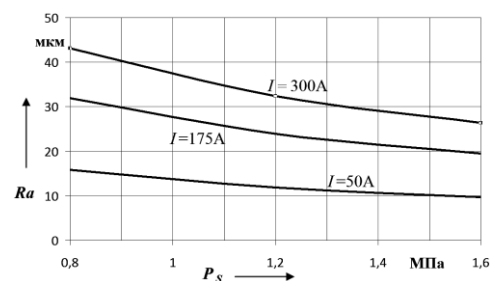


Рис. 11 – Залежність шорсткості обробленої поверхні Ra від сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини P_s

Ефективність і економічність процесу РОД значною мірою визначають вартість і стійкість ЕІ. Відносний лінійний знос ЕІ, виготовлених із графітизованого матеріалу МПГ-7 при обробці “Н”- подібного отвору в деталях не перевищує 1 %.

На рис. 12 показано ступінь впливу основних технологічних характеристик процесу на відносний лінійний знос ЕІ.

Рівняння регресії для відносного лінійного зносу ЕІ має вигляд:

$$y(\gamma) = -2,386 + 0,84x_1 - 0,07x_2 - 0,41x_3 \quad (9)$$

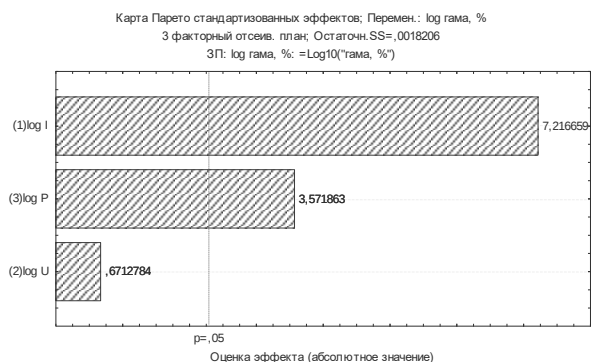


Рис. 12 – Вплив змінних факторів на відносний лінійний знос ЕІ

Відповідно, математична модель відносного лінійного зносу ЕІ має вигляд, %:

$$\gamma = 0,013 I^{0,84} U^{0,07} P_s^{0,41} \quad (10)$$

Відносний лінійний знос ЕІ γ залежить переважно від величини сили технологічного струму I (γ збільшується при збільшенні I) і менше від статичного тиску робочої рідини P_s на вході в зазор (γ збільшується при збільшенні P_s). Робоча напруга U , в зазначеному діапазоні, згідно рис. 11 не має істотного впливу на відносний лінійний знос ЕІ γ , в зв'язку з цим математична уточнена модель відносного лінійного зносу ЕІ $\square$ має вигляд, %:

$$\gamma = 0,013 I^{0,0711} P_s^{0,61} \quad (11)$$

На рис. 13 показано залежність відносного лінійного зносу ЕІ $\square$ від сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини P_s .

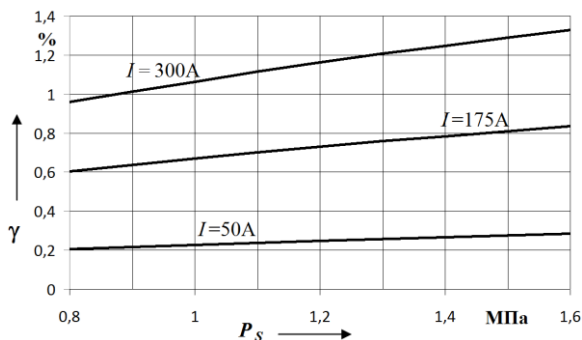


Рис. 13 – Залежність відносного лінійного зносу ЕІ від сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини P_s

При побудові профілю робочої поверхні ЕІ враховують технологічну схему формоутворення та міжелектродний зазор δ . Розрахунок розмірів ЕІ з врахуванням міжелектродного зазору виконують згідно існуючих методик ЕЕО [5].

На рис. 14 показано ступінь впливу основних технологічних характеристик процесу на величину міжелектродного зазору δ .

Рівняння регресії для величини міжелектродного зазору δ має вигляд:

$$y(\delta) = -3,58 + 0,82x_1 + 0,0009x_2 - 0,54x_3 \quad (12)$$



Рис. 14 – Вплив змінних факторів на величину міжелектродного зазору δ

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

$$\delta = 2,63 I^{0,82} U^{0,0009} P_s^{-0,54} \quad (13)$$

Величина міжелектродного зазору δ залежить переважно від величини сили технологічного струму I (δ збільшується при збільшенні I) і менше від статичного тиску робочої рідини P_s на вході в зазор (δ зменшується при збільшенні P_s). Робоча напруга U , в зазначеному діапазоні, згідно рис. 13 не має істотного впливу на міжелектродний зазор δ , в зв'язку з цим уточнена математична модель величини міжелектродного зазору δ має вигляд, мм:

$$\delta = 0,0034 I^{0,28} P_s^{-1,54} \quad (13)$$

На рис. 15 показано залежність величини міжелектродного зазору δ від сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини P_s .

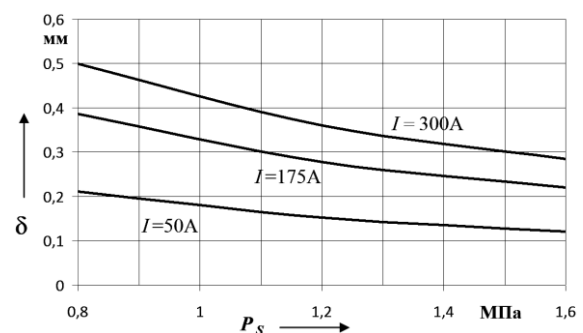


Рис. 15 – Залежність міжелектродного зазору δ від сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини P_s

Згідно викладеного, динамічний тиск потоку робочої рідини в умовах РОД є основним параметром процесу, який визначає, в кінцевому підсумку, можливість та якісну сторону процесу обробки.

Отже, запропонована технологічна схема формоутворення (рис. 4) та конструкція ЕІ (рис. 7) для виготовлення “Н” – подібного отвору

забезпечують рівномірну течію робочої рідини по периметру отвора, а отже стабілізацію процесу обробки (рис. 16) та забезпечують високу продуктивність та необхідну якість обробленої поверхні.

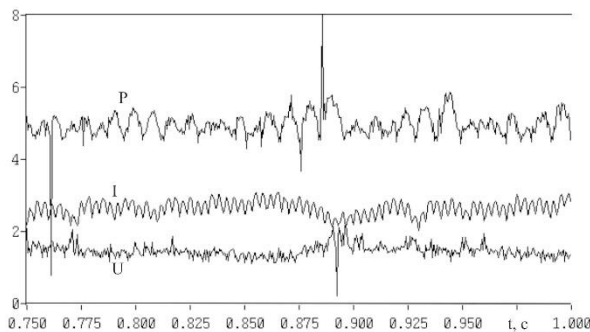


Рис. 16 – Осцилограма стабільного процесу РОД при виготовленні "Н" – подібного отвору

Висновки. За умов розробки технологічного процесу виготовлення отворів, для забезпечення необхідної продуктивності та якості обробки, необхідно враховувати форму та розміри отвору. Для цього введено поняття критерію складності отворів K як технологічного фактора в умовах РОД, що в відомих межах визначає область раціонального застосування однієї з наведених технологічних схем формоутворення.

За цих умов при одержанні $K \leq 0,5$ реалізують технологічну схему формоутворення по принципу прошивання за умов використання суцільного ЕІ без отвору при прокачуванні робочої рідини через отвір в заготовці (рис. 3), а при $K > 0,5$ реалізують технологічну схему формоутворення по принципу прошивання за умов використання ЕІ з отвором при

прокачуванні робочої рідини в напрямку від периферії ЕІ до його центру і надалі через отвір в ЕІ на злив. (рис. 1).

Список літератури:

1. Носуленко В.І. Розмірна обробка металів електричною дугою: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.03.07 «Процеси фізико-технічної обробки» / В.І. Носуленко. – Кіровоград, 1999. – 32 с.
2. Чумаченко О.С. Розмірна обробка електричною дугою листових деталей: автореф. дис. на здобуття наук, ступеня канд. техн. наук: спец. 05.03.07 «Процеси фізико-технічної обробки» / О.С. Чумаченко. – Київ, 2002. – 20 с.
3. Носуленко В.І. Розмірна обробка електричною дугою складних за зовнішнім контуром деталей / В.І. Носуленко, В.В. Юр'єв // Збірник наукових праць «КНТУ». – 2015. – № 45. – С. 109–114.
4. Носуленко В.І. Розмірна обробка електричною дугою отворів складного контуру / В.І. Носуленко, В.В. Юр'єв // Збірник наукових праць «КНТУ». – 2015. – № 28. – С. 70–73.
5. Фотеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки / Н.К. Фотеев – М.: Машиностроение, 1980. – 184с.

References (transliterated):

1. Nosulenko V.I. Rozmurna obrobka metaliv elektrychnoyu dugoyu: avtoref. dy's. d-ra techn. nauk: 05.03.07 «Procesy fizyko-technichnoy obrobky» / V. I. Nosulenko. – Kirovograd, 1999. – 32 p.
2. Chumachenko O. S. Rozmurna obrobka elektrychnoyu dugoyu ly'stovy'x detalej: avtoref. dy's. na zdobuttya nauk, stupenya kand. techn. nauk: specz. 05.03.07 «Procesy fizyko-technichnoy obrobky» / O. S. Chumachenko. – Ky'yiv, 2002. – 20 p.
3. Nosulenko V. I. Rozmurna obrobka elektrychnoyu dugoyu skladny'x za zovnishnim konturom detalej / V. I. Nosulenko, V. V. Yur'yev // Zbirny'k naukovy'x prac' «KNTU». – 2015. – No 45. – P. 109–114.
4. Nosulenko V. I. Rozmurna obrobka elektrychnoyu dugoyu otvoriv skladnogo konturu / V. I. Nosulenko V. V. Yur'yev // Zbirny'k naukovy'x prac' «KNTU». – 2015. – No 28. – P. 70–73.
5. Foteev N. K. Technology'ya elektroerozy'onnoj obrabotky [EDM Technology] – Moscow: Mashynostroeny'e Publ., 1980. – 184 p.

Надійшла (received) 11.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Критерій складності отворів як технологічний фактор в умовах РОД / В. І. Носуленко, В. М. Шмельов, В. В. Юр'єв // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 56–62. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2519-2671

Критерий сложности отверстий как технологический фактор в условиях РОД / В. И. Носуленко, В. М. Шмелев, В. В. Юрьев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 56–62. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2519-2671

The level of difficulty of holes as a technological factor in ADM. / V. I. Nosulenko, V. M. Shmelev, V. V. Yuriev // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 30 (1202). – P. 56–62. – Bibliogr.: 5 – ISSN 2519-2671.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Носуленко Віктор Іванович – доктор технічних наук, професор, Кіровоградський національний технічний університет, завідувач кафедри обробки металів тиском та спецтехнологій; тел.: (067) 520-46-48; e-mail: : nosulenko@kntu.kr.ua.

Nosulenko Victor Ivanovich – doctor of engineering Sciences, Professor, Kirovograd national technical University, head of Department of processing of metals pressure and special technologies; tel: (067) 520-46-48; e-mail: nosulenko@kntu.kr.ua.

Шмельов Віталій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, Кіровоградський національний технічний університет, доцент кафедри обробки металів тиском та спецтехнологій; тел.: (066) 412-90-60; e-mail: 1shvm@mail.ru.

Shmelyov Vitaliy Nikolaevich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Kirovograd National Technical University, Associate Professor at the Department of processing of metals pressure and special technologies; tel.: (066) 412-90-60; e-mail: 1shvm@mail.ru.

Юр'єв Віталій Віталійович – Кіровоградський національний технічний університет, аспірант; тел.: (050) 041-07-72; e-mail: vitaliy-gs@ukr.net

Yuriev Vitaly Vitalyevich – Kirovograd National Technical University, graduate student; tel.: (050) 041-07-72; e-mail: vitaliy-gs@ukr.net