

Інтенсифікація обробки фасонних порожнин

Запропоновано високоефективний метод розмірної обробки дугою торцевих поверхонь складного рельєфу двошаровими електродами-інструментами.
електрична дуга, двошаровий електрод-інструмент, міжелектродний зазор, гідродинамічний потік, технологічна схема формоутворення, технологічні характеристики процесу

В сучасному інструментальному та основному виробництвах при виготовленні порожнин кувальних штампів, прес-форм та оригінальних деталей широко застосовуються методи електроерозійної обробки. Найбільш поширеним з них є електроімпульсна обробка. Вона дозволяє отримати практично будь-яку за формою торцеву поверхню складного рельєфу поза залежністю від механічних властивостей матеріалу, що обробляється [1, С. 66-76]. Електроди-інструменти для електроімпульсної обробки виготовляють із вуглеграфіту або із міді [2, С. 5], причому форма робочої (торцевої) поверхні електрода-інструмента еквідистантна формі торцевої поверхні виробу та відрізняється від останньої в кожній точці на величину міжелектродного зазору. Процес, як відомо, реалізовується при поступальному русі електрода-інструмента, із зануренням робочої зони в рідину-діелектрик та з використанням нестационарних форм електричних розрядів [3, С. 83-85].

В зв'язку з тим, що енергія в зону обробки вводиться дискретно (порціями) та з відносно великими паузами, продуктивність електроімпульсної обробки дуже низька. Крім того, технічні складності отримання електричних імпульсів при силі струму більш 300 А суттєво обмежують потужність введеної енергії в робочу зону, що ще більше обмежує продуктивність обробки.

За роботами [4, 5] відомий високопродуктивний спосіб розмірної обробки металів електричною дугою, в якому енергія вводиться в зону обробки безперервно. Останнє підтверджується осцилограмами сили технологічного струму, який не падає до нуля, та зварювальними випрямлячами постійного струму, що використовуються при реалізації даного способу. Даний спосіб може бути застосований для розмірної обробки поверхонь складного рельєфу при поступальному русі вуглеграфітового електрода-інструмента та нерухомому електроді-заготовки, але обмеженої складності. Це пов'язано з тим, що розмірна обробка даним способом можлива лише тоді, коли на електричну дугу діє потужний гідродинамічний поперечний потік робочої рідини, який стискає дугу як в енергетичному, так і в геометричному плані та інтенсифікує процес видалення продуктів ерозії із зони обробки. Саме для цього робочу рідину в міжелектродному зазорі (тобто там, де горить електрична дуга) прокачують під технологічним тиском, щоб забезпечити певну (вище критичної) швидкість потоку.

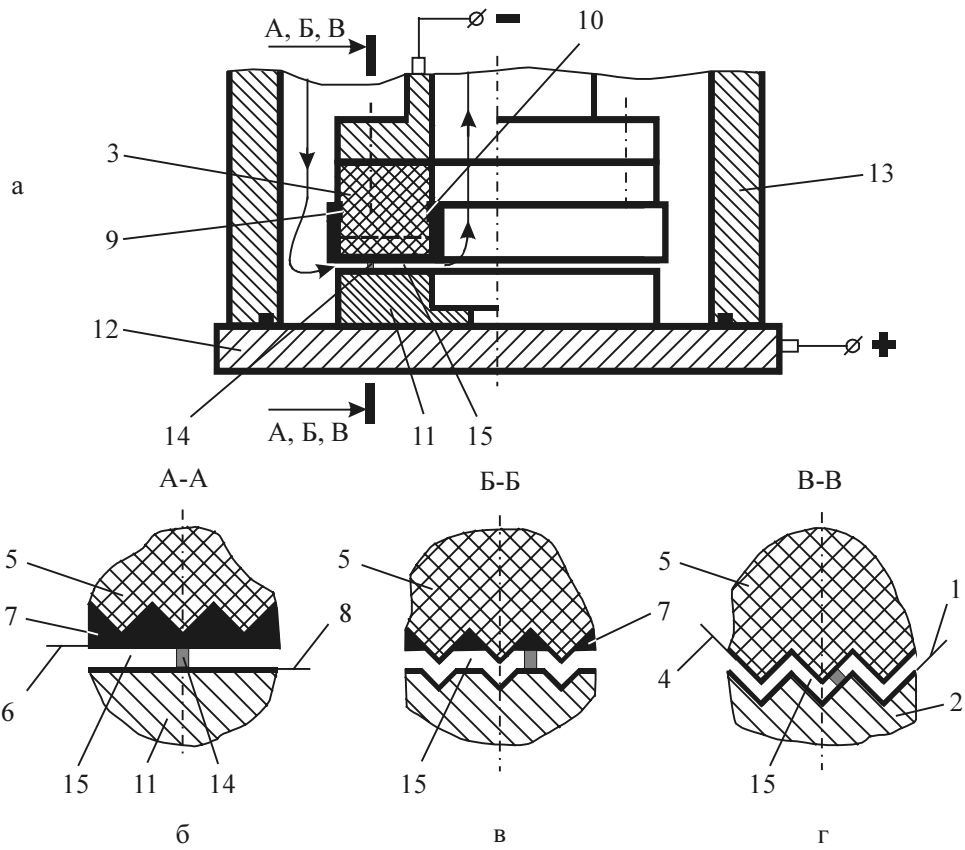
Однак, в початковій фазі процесу обробки електричною дугою торцевої поверхні з орієнтованим перпендикулярно радіальному напрямку складним рельєфом, наприклад при обробки V-подібних дрібних зубів муфти моменту, робоча рідина вільно (без опору) прокачується між плоскою поверхнею електрода-заготовки та рельєфною поверхнею електрода-інструмента, тобто тече по лінії найменшого опору, а в міжелектродному зазорі, де саме горить дуга, в зв'язку з великим гідравлічним опором, робоча рідина практично не тече. В наслідок цього, між електродами збуджується

звичайна (не стиснута дуга), яка за своїми параметрами наближається до зварювальної, і не може вести розмірну обробку. Міжелектродний зазор швидко шлакується (бо швидкість рідини в зазорі значно нижче критичної), виникають короткі замикання, процес дестабілізується та припиняється.

З метою розширення технологічних можливостей способу розмірної обробки електричною дугою торцевих поверхонь складного рельєфу, запропоновано обробку здійснювати двошаровим електродом-інструментом оригінальної геометрії.

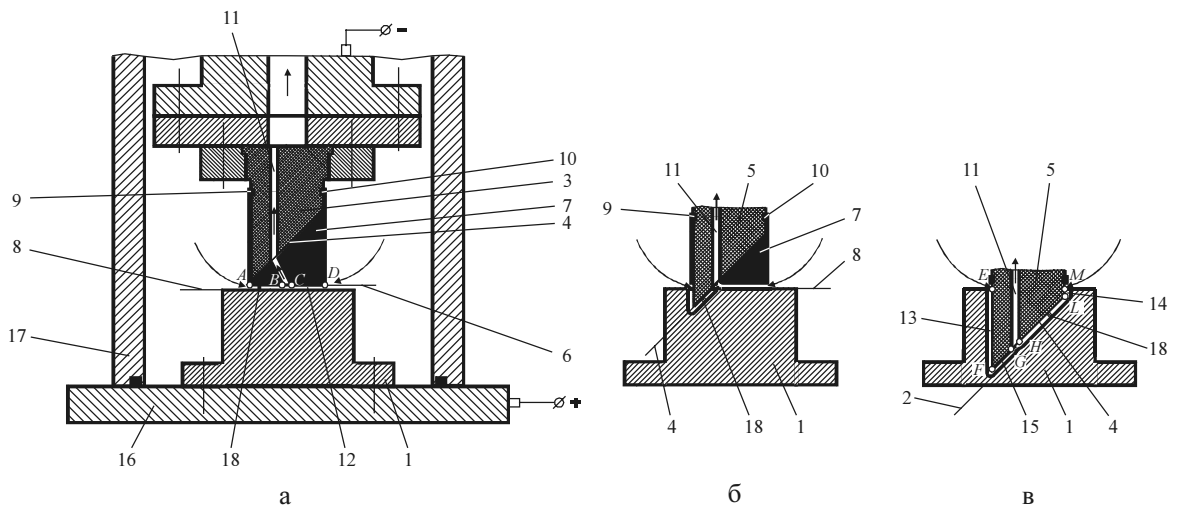
На рис. 1, як приклад, наведено характерні фази обробки електричною дугою торцевої поверхні з орієнтованим перпендикулярно радіальному напрямку складним рельєфом 1 виробу 2 (обробка дрібних зубів муфти моменту), яку здійснюють двошаровим електродом-інструментом 3. Останній виготовляють за наступною технологією. Торцеву робочу поверхню 4 внутрішнього шару 5 виконують еквідистантною поверхні виробу 1. Внутрішній шар 5 виготовляють із вуглеграфітового матеріалу марки МПГ-7, що володіє високою електроерозійною стійкістю. Торцеву робочу поверхню 6 зовнішнього шару 7 виконують еквідистантною поверхні електрода-заготовки 8, тобто плоскою. Зовнішній шар 7 виготовляють із матеріалу, який володіє низькою електроерозійною стійкістю, наприклад із сплаву Вуда, свинцю тощо. Закріплення зовнішнього шару на внутрішньому здійснюється шляхом занурення твердого внутрішнього шару в розплав із матеріалу зовнішнього шару до проточок 9, 10 з подальшим його охолодженням. Перед обробкою електрод-заготовку 11 виробу 2 закріплюють нерухомо на плиті 12 електроерозійного верстата, а двошаровий електрод-інструмент 3 – на його шпинделі. Робочу зону верстата закривають герметично камерою 13. Для обробки в камеру нагнітають під технологічним тиском 0,2...2 МПа робочу рідину (як правило органічне середовище) за напрямком від периферії до центру двошарового електрода-інструмента 3. Вмикають постійний технологічний струм і ведуть процес обробки електрода-заготовки 11 електричною дугою 14 з використанням автоматичного регулятора торцевого міжелектродного зазору 15 (на рис. 1 не показано). Завдяки тому, що в початковий момент обробки торцева робоча поверхня 6 зовнішнього шару 5 еквідистантна (в даному випадку паралельна) поверхні 8 електрода-заготовки 11, обробка здійснюється при постійному торцевому міжелектродному зазорі 15. Саме ця умова дозволяє забезпечити оптимальні гідродинамічні умови для горіння електричної дуги 14 у будь-якій точці міжелектродного зазору 15. Зовнішній шар 7 на електроді-інструменті 9, завдяки низькій електроерозійній стійкості, легко та швидко руйнується електричною дугою 14 та поступово вивільняє внутрішній шар 5, який, власне, і відповідає за точність формоутворення поверхні складного рельєфу 1, так як його виготовлено із електроерозійно-стійкого матеріалу. Протягом всього процесу обробки торцевий міжелектродний зазор 15 підтримується постійним, що забезпечує стабільний гідродинамічний режим обробки, а отже, стабільну точність формоутворення складного рельєфу.

Подальше удосконалення способу розмірної обробки електричною дугою торцевих поверхонь складного рельєфу з використанням для формоутворення двошарового електрода-інструмента відбувалося у напрямку забезпечення оптимального гідродинамічного режиму потоку робочої рідини в торцевому зазорі при обробки торцевої поверхні з підвищеною складністю рельєфу. Представником такої поверхні є глухий отвір або порожнина з значно похилим дном. Останнє пов'язано з тим, що гідродинамічні умови процесу в початковій та кінцевій фазах обробки значно відрізняються. Так, в початковій фазі обробки гідравлічний опір течії робочої рідини в торцевому зазорі як правило симетричний відносно технологічного каналу в електроді-інструменті, в той же час в кінцевій фазі обробки – значно несиметричний.



а - початкова фаза (радіальний переріз); б - початкова фаза (поперечний переріз А-А); в - проміжна фаза (поперечний переріз Б-Б); г - кінцева фаза (поперечний переріз В-В)

Рисунок 1 - Фази реалізації способу обробки дугою дрібних зубів муфти моменту з використанням двошарового електрода-інструмента



а - початкова фаза; б - проміжна фаза; в - кінцева фаза

Рисунок 2 - Фази реалізації способу обробки дугою глухого круглого отвору із значно похилим дном з використанням двошарового електрода-інструмента

Це приводить до того, що електрична дуга в різних точках торцевого зазору в кінцевій фазі обробки горить в різних гідродинамічних умовах, що визначає різну якість обробленої поверхні. Більш того, коли різниця в швидкостях потоку вийде за критичну межу, процес дестабілізується та може зовсім зупинитися. Крім того, даний спосіб не забезпечує обробку великогабаритних торцевих поверхонь складного рельєфу, так як із підвищенням розміру поверхні підвищується довжина траси евакуації продуктів ерозії із торцевого зазору, продуктивність суттєво падає, а процес затухає.

З метою усунення вище наведених недоліків, пропонується удосконалити конструкцію двошарового електрода-інструмента так, щоб в процесі обробки робоча рідина разом с продуктами ерозії видалялася із торцевого міжелектродного зазору крізь канал в електроді-інструменті, який розташований так, що принаймні в початковій та кінцевій фазах обробки, гідравлічний опір течії робочої рідини в міжелектродному зазорі симетричний відносно даного каналу або наближається до симетрії.

Так, розмірну обробку глухого отвору з значно похилим дном (рис. 2) в електроді-заготовці 1, як торцевої поверхні складного рельєфу 2, здійснюють двошаровим електродом-інструментом 3, який виконано за наступною технологією. Торцеву робочу поверхню 4 внутрішнього шару 5 виконують еквідистантною поверхні 2 похилого дна отвору в електроді-заготовці 1. Внутрішній шар 5, як у вище описаному випадку, виготовляють із електроерозійно-стійкого матеріалу, наприклад із вуглеграфітового матеріалу марки МПГ-7. Торцеву робочу поверхню 6 зовнішнього шару 7 виконують еквідистантною поверхні 8 електрода-заготовки 1. Зовнішній шар 7 виготовляють із матеріалу, який володіє низькою електроерозійною стійкістю, наприклад, із сплаву Вуда. Закріплення зовнішнього шару 7 відносно внутрішнього 5 здійснюється шляхом занурення твердого внутрішнього шару 5 в розплав із матеріалу зовнішнього шару до проточок 9, 10 з подальшим його охолодженням. Забезпечення симетричності гідравлічного опору в міжелектродному зазорі відносно каналу 11 в електроді-інструменті 3 на різних фазах обробки досягається умовами:

- для початкової фази:

$$\Delta P_{ex(A)} + \Delta P_{AB} + \Delta P_{n(B)} = \Delta P_{ex(D)} + \Delta P_{CD} + \Delta P_{n(C)}, \quad (1)$$

де $\Delta P_{ex(A)}$, $\Delta P_{ex(D)}$ - гідравлічні опори (або втрати тиску) на вході потоку в торцевий міжелектродний зазор 12 відповідно в точках A та D ;

ΔP_{AB} , ΔP_{CD} - гідравлічні опори (або втрати тиску) в торцевому міжелектродному зазорі 12 відповідно на ділянках AB (довжиною l_{AB}) та CD (довжиною l_{CD});

$\Delta P_{n(B)}$, $\Delta P_{n(C)}$ - гідравлічні опори (або втрати тиску) при внутрішньому повороту потоку відповідно в точках B та C .

Але оскільки $\Delta P_{ex(A)} = \Delta P_{ex(D)}$, а $\Delta P_{n(B)} \approx \Delta P_{n(C)}$, то залежність (1) набуде вигляду:

$$\Delta P_{AB} = \Delta P_{CD}; \quad (2)$$

- для кінцевої фази:

$$\Delta P_{ex(E)} + \Delta P_{EF} + \Delta P_{n(F)} + \Delta P_{FG} + \Delta P_{n(G)} =$$

$$= \Delta P_{ex(M)} + \Delta P_{ML} + \Delta P_{n(L)} + \Delta P_{LH} + \Delta P_{n(H)}, \quad (3)$$

де $\Delta P_{ex(E)}$, $\Delta P_{ex(M)}$ - гідравлічні опори (або втрати тиску) на вході потоку в бічні міжелектродні зазори 13, 14 відповідно в точках E та M ;

ΔP_{EF} , ΔP_{ML} - гідравлічні опори (або втрати тиску) в бічних міжелектродних зазорах 13, 14 відповідно на ділянках EF (довжиною l_{EF}) та ML (довжиною l_{ML});

$\Delta P_{n(F)}$, $\Delta P_{n(L)}$ - гідравлічні опори (або втрати тиску) при зовнішньому повороту потоку відповідно в точках F та L ;

ΔP_{FG} , ΔP_{LH} - гідравлічні опори (або втрати тиску) в торцевому міжелектродному зазорі 15 відповідно на ділянках FG (довжиною l_{FG}) та LH (довжиною l_{LH});

$\Delta P_{n(G)}$, $\Delta P_{n(H)}$ - гідравлічні опори (або втрати тиску) при внутрішньому повороту потоку відповідно в точках G та H .

Оскільки $\Delta P_{ex(E)} = \Delta P_{ex(M)}$, $\Delta P_{n(F)} \approx \Delta P_{n(L)}$, $\Delta P_{n(G)} \approx \Delta P_{n(H)}$, то залежність (3) можна спростити до вигляду:

$$\Delta P_{EF} + \Delta P_{FG} = \Delta P_{ML} + \Delta P_{LH}. \quad (4)$$

Перед обробкою (див. рис. 2) електрод-заготовку 1 закріплюють нерухомо на плиті 16 електроерозійного верстата, а двошаровий електрод-інструмент 3 - на його шпинделі. Робочу зону верстата закривають герметично камерою 17. Для обробки в камеру нагнітають під технологічним тиском робочу рідину (як правило органічне середовище) за напрямком від периферії до центру електрода-інструмента 3. Вмикають постійний технологічний струм і ведуть процес обробки електрода-заготовки 1 електричною дугою 18 з використанням автоматичної системи слідкування (на фігурах не показана) за торцевим міжелектродним зазором 12, 15. При цьому зовнішній шар 7 на електроді-інструменті 3 легко та швидко руйнується електричною дугою 18 та поступово вивільняє внутрішній шар 5, який, власне, і відповідає за точність формоутворення отвору з похилою донною торцевою поверхнею 2, так як його виготовлено із електроерозійно-стійкого матеріалу. Завдяки виконанню умов (2) та (4), при реалізації процесу обробки забезпечується симетричний відносно каналу 11 гідравлічний опір течії робочої рідини в міжелектродному зазорі не тільки в початковій, але й кінцевій фазах обробки, що, в свою чергу забезпечує симетричний відносно каналу 11 в електроді-інструменті 2 потік рідини в даних фазах. Це приводить до того, що електрична дуга 18 в різних точках торцевого зазору в кінцевій фазі обробки горить в оптимальних гідродинамічних умовах. Останнє визначає задану технологічну якість обробленої поверхні.

Для вказаних вище умов (див. рис. 2) розроблено методику та виконані дослідження технологічних характеристик процесу РОД фасонних порожнин з похилим дном. На підставі апріорної інформації було вибрано п'ять факторів, які повинні впливати на технологічні характеристики процесу РОД фасонних порожнин: сила технологічного струму I (X_1), А; статичний тиск робочої рідини на вході в зазор P_{cm} (X_2), МПа; площа обробки F (X_3), мм³; кут нахилу донної поверхні порожнини α (X_4), град.; відносний діаметр отвору в електроді-інструменті D/d . В результаті дослідження отримані математичні моделі таких технологічних характеристик процесу РОД фасонних порожнин, як: продуктивність обробки M (y_1), мм³/хв. (5); питома продуктивність обробки M_a (y_2), мм³/А·хв.; питома витрата електроенергії a (y_3),

кВт·год/кг; шорсткість бічної поверхні Ra (y_4), мкм; бічний міжелектродний δ_B (y_5), мм; лінійний відносний знос електрода-інструмента γ (y_6), %:

$$y_1 = 201 + 56,9x_1 - 38,1x_2 + 19,4x_3 - 20,1x_4 + 16,1x_5; \quad (5)$$

$$y_2 = 1,58 + 0,138x_1 - 0,278x_2 + 0,141x_3 - 0,141x_4 + 0,101x_5; \quad (6)$$

$$y_3 = 40,27 - 4,51x_1 + 4,67x_2 - 4,71x_3; \quad (7)$$

$$y_4 = 19,36 + 6,64x_1 + 1,64x_2 + 3,39x_3; \quad (8)$$

$$y_5 = 0,147 - 0,022x_2; \quad (9)$$

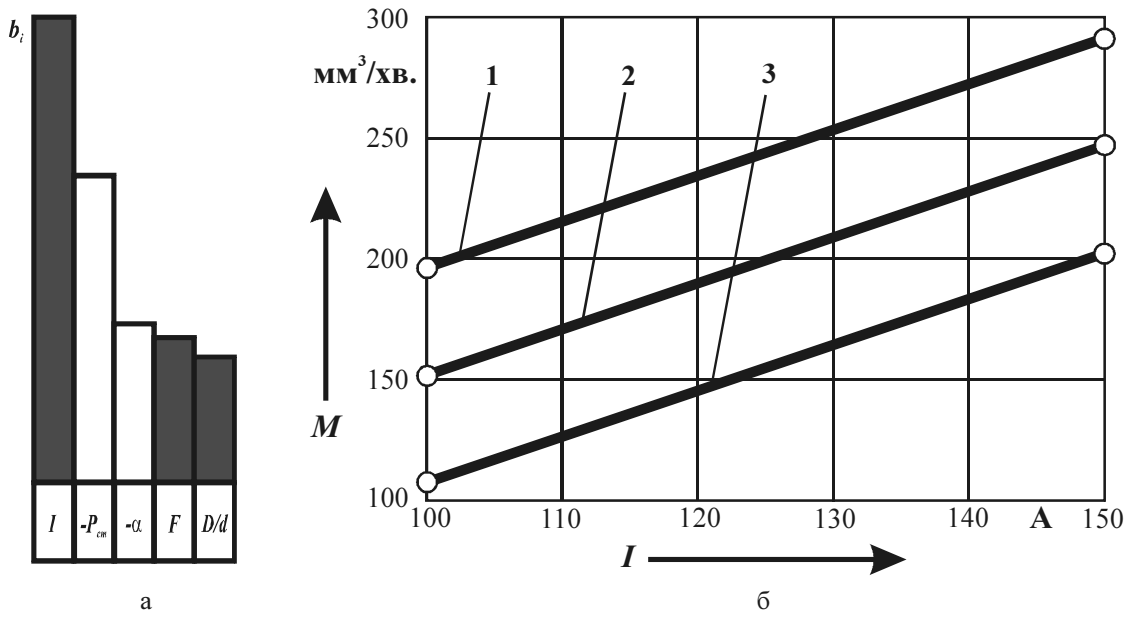
$$y_6 = 0,74 + 0,31x_1 + 0,14x_2 + 0,16x_3. \quad (10)$$

Показано, що найбільший вплив на продуктивність обробки виявляє сила технологічного струму I (рис. 3), із підвищенням якої M збільшується. Останнє підтверджує теплову природу РОД. Таким чином, силу технологічного струму треба розглядати як основний керуючий фактор. Вплив статичного тиску P_{cm} на M теж великий, але з його підвищенням продуктивність зменшується. Вплив кута нахилу α донної поверхні порожнини на продуктивність обробки значно менший, але суттєвий. Із підвищенням α продуктивність обробки зменшується. Останнє пояснюється погіршенням умов евакуації продуктів ерозії із зони обробки при підвищенні кута α : довжина траси евакуації зростає, а імовірність вторинного диспергування продуктів ерозії підвищується. Вплив інших факторів на M значно менший, але має суттєве значення. В рамках експерименту продуктивність процесу РОД фасонних порожнин M змінювалася в межах від 118 до 387 мм³/хв. Завдяки застосування двошарових електродів вперше отримані порожнини к кутом нахилу донної поверхні $\alpha > 12,5^\circ$, що було верхньою межею відомого способу РОД.

Питома продуктивність обробки головним чином залежить від статичного тиску робочої рідини на вході в міжелектродний зазор P_{cm} , із підвищенням якого M_a зменшується. Таким чином, статичний тиск P_{cm} є головним керуючим фактором. Вплив інших факторів (кута нахилу донної поверхні порожнини α , площі обробки F , сили технологічного струму I та відносного діаметра отвору в електроді-інструменті D/d) приблизно однаковий та значно менший, але має істотне значення. В умовах експерименту питома продуктивність процесу РОД фасонних порожнин змінювалася у межах від 1,29 до 2,58 мм³/А·хв.

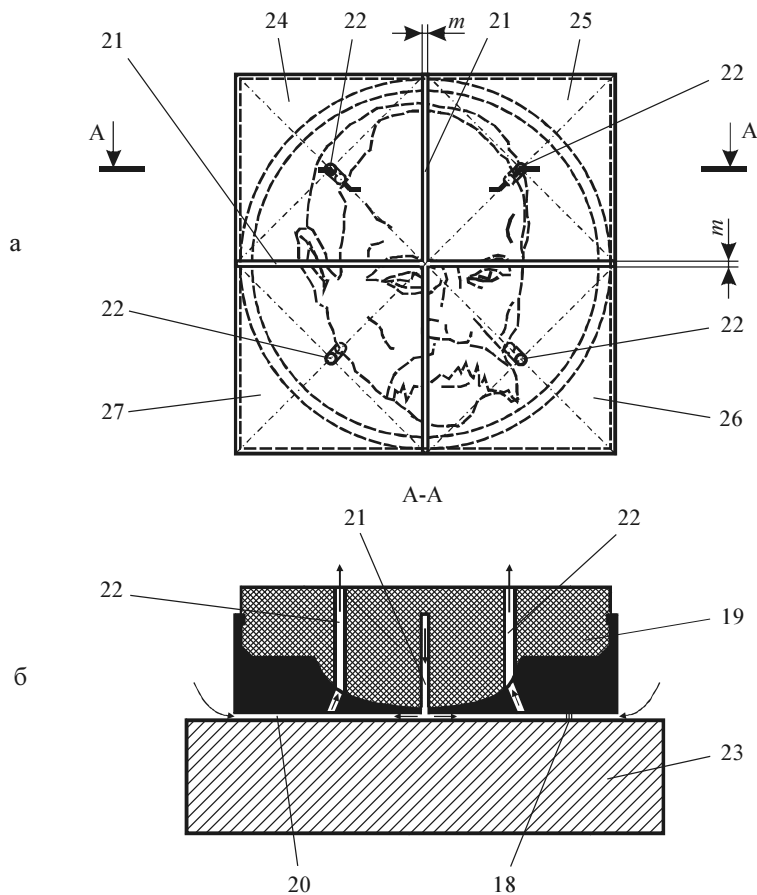
Виявлено, що усі три фактора (площа обробки F , статичний тиск на вході потоку у міжелектродний зазор P_{cm} та сила технологічного струму I) впливають на питому витрату електроенергії a приблизно однаково. В умовах експерименту питома витрата електроенергії процесу РОД фасонних порожнин змінювалася у межах від 24,09 до 53,98 $\frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}$.

Шорсткість бічної поверхні після РОД фасонної порожнини залежить, головним чином, від сили технологічного струму I , причому, із підвищенням сили струму шорсткість збільшується. Шорсткість поверхні – результат накладання одиночних лунок або «доріжок» від горіння розрядів. Відомо, що більшої сили струму відповідає більший діаметр лунки. Отже, більшої сили струму відповідає більша шорсткість поверхні після РОД. Таким чином, фактор I треба розглядати як головний, керуючий. Вплив площі обробки F та статичного тиску P_{cm} трохи менший, але має істотне



а - ступінь впливу факторів; б - графік; 1 - $P_{cm} = 0,5$ МПа; 2 - $P_{cm} = 0,75$ МПа; 3 - $P_{cm} = 1,0$ МПа ($F = 434$ mm^2 ; $\alpha = 20^\circ$; $D/d = 7$)

Рисунок 3 - Залежність продуктивності обробки M від I та P_c .



а - вид на двошаровий електрод-інструмент знизу;
б - початкова фаза обробки

Рисунок 4 - Розмірна обробка дугою великогабаритної торцевої поверхні складного рельєфу (прес-форми) з використанням багатоканального двошарового електрода-інструмента

значення. В умовах експерименту шорсткість бічної поверхні фасонної порожнини змінювалася у межах від $Ra11$ до $Ra31$.

Показано, що єдиний фактор, що впливає на бічний міжелектродний зазор є статичний тиск робочої рідини на вході в міжелектродний зазор $P_{ст}$, із підвищенням якого зазор зменшується. Останнє пояснюється тим, що із підвищенням статичного тиску підвищується динамічний тиск потоку на стовп дуги, внаслідок чого, як відомо, дуга стискується в геометричному розумінні. В умовах експерименту бічний міжелектродний зазор δ_B змінювався в межах від 0,1 до 0,2 мм.

Із математичної моделі відносного лінійного зносу графітового електрода-інструмента виходить, що найбільший вплив на нього виявляє сила технологічного струму I , із збільшенням якої γ_l збільшується. Таким чином, фактор I треба розглядати як головний, керуючий. Вплив площі обробки F та статичного тиску робочої рідини $P_{ст}$ значно менший, але має істотне значення. З їх підвищенням лінійний знос збільшується. В умовах експерименту відносний лінійний знос графітового електрода-інструмента при РОД фасонних порожнин змінювався у межах від 0,1 до 1,3 %. Останнє свідчить про доцільність використання процесу РОД для точного формоутворення фасонних порожнин.

Для забезпечення оптимальних умов обробки електричною дугою великогабаритних торцевих поверхонь складного рельєфу (рис. 4), обробку здійснюють багатоканальним електроодом-інструментом 19, з подачею робочої рідини в торцевий зазор 20 крізь щілини 21 в електроді-інструменті 19, які розділяють канали 22 та утворюють зони прокачування (гідродинамічні модулі). При обробці заготовки 23 налічується чотири зони прокачування: 24, 25, 26, 27. Кожна зона має зовнішній замкнутий контур нагнітання рідини в торцевий зазор: бічний міжелектродний зазор та щілини 21, а також внутрішній замкнутий контур видалення рідини з торцевого зазору: канал 22 в електроді-інструменті 19. Збільшення кількості зон прокачування при обробці великогабаритної порожнини суттєво зменшує довжину траси евакуації продуктів ерозії із торцевого міжелектродного зазору, тобто там, де збуджуються електричні дуги, внаслідок чого зменшується частка продуктів ерозії, що підлягає вторинному диспергуванню. Останнє сприяє підвищенню продуктивності обробки, зменшенню питомої витрати електроенергії та суттєво розширює технологічні можливості процесу в плані підвищення габаритних розмірів торцевих поверхонь складного рельєфу, що обробляються.

Слід відмітити, що, для запобігання утворення технологічного виступу, ширину m щілини 21 на електроді-інструменті 19 виконують із наступної умови:

$$m \leq 2\delta_{\sigma},$$

де δ_{σ} – бічний міжелектродний зазор (на рис. 4 не показано). Звичайно $\delta_{\sigma} = 0,10 \dots 0,20$ мм.

Спосіб розмірної обробки електричною дугою торцевих поверхонь складного рельєфу, що пропонується, який базується на використанні двошарових електродів-інструментів, порівняно з відомим, розширює його технологічні можливості та дозволяє: суттєво підвищити складність рельєфу, якість обробки та габаритні розміри торцевих поверхонь, що обробляються; підвищити продуктивність обробки великогабаритних торцевих поверхонь на 40...50 % при зменшенні питомої витрати електроенергії на 20...30 %. Крім того, він дозволив підвищити кут нахилу донної поверхні порожнини в 2,4 рази (з $12,5^{\circ}$ до 30°).

Список літератури

1. Электроэрозионная и электрохимическая обработка. Расчет, проектирование, изготовление и применение электродов-инструментов. Часть 1 / Под ред. А. Л. Лившица, А. Роша. – М.: НИИМАШ, 1980. – 224 с.
2. Материалы и методы для изготовления фасонных электродов-инструментов электроэрозионных копировально-прошивочных станков // М. Л. Левит, О. В. Падалко. – М.: ЭНИМС, 1975. – 143 с.
3. Артамонов Б. А., Волков Ю. С., Дрожалова В. И. и др. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Учеб. пособие (в 2-х томах). Т. 1. Обработка материалов с применением инструмента / Под ред. В. П. Смоленцева. – М.: Высш. шк., 1983. – 247 с., ил
4. Носуленко В. І. Розмірна обробка металів електричною дугою: Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.03.07 / НТУУ «КПІ». – Київ, 1999. – 36 с.
5. Боков В. М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою. – Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2002. – 300 с.

Предложено высокоэффективный метод размерной обработки электрической дугой торцевых поверхностей сложного рельефа двухслойными электродами-инструментами.

A high-performance method of dimensional arc processing of intricate profile faceplates based on using two-ply tool electrodes is introduced.