

УДК 621.9.048.4

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).313-324](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).313-324)

**В. М. Боков**, проф., канд. техн. наук, **О. Ф. Сіса**, доц., канд. техн. наук,  
**В. В. Юр'єв**, аспі.

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький,  
Україна*

*e-mail: Viktor.alia.kntu@gmail.com*

## Удосконалення процесу обробки тіл обертання електричною дугою

Запропоновано та досліджено високопродуктивний спосіб розмірної обробки тіл обертання електричною дугою в гідродинамічному потоці робочої рідини та пристрій для його реалізації, що покращують умови праці оператора за рахунок усунення ефекту розбризкування робочої рідини та усунення світлового ефекту від горіння дуги в зоні обробки, а також підвищують довговічність роботи електродотримача.

**електрична дуга, гідродинамічний режим, дротовий електрод-інструмент, схема формоутворення, ванна**

**В. М. Боков**, проф., канд. техн. наук, **О. Ф. Сіса**, доц., канд. техн. наук, **В. В. Юр'єв**, асп.

*Центральноукраїнський національний технічний університет*

### Усовершенствование процесса обработки тел вращения электрической дугой

Предложен и исследован высокопроизводительный способ размерной обработки тел вращения электрической дугой в гидродинамическом потоке рабочей жидкости и устройство для его реализации, которые улучшают условия работы оператора за счёт устранения эффекта разбрызгивания рабочей жидкости и устранения светового эффекта от горения дуги в зоне обработки, а также повышают долговечность работы электрододержателя.

**электрическая дуга, гидродинамический режим, проволочный электрод-инструмент, схема формообразования, ванна**

**Постановка проблеми.** Для обробки тіл обертання із важкооброблюваних матеріалів [1, 2] широко застосовуються електроерозійні методи, які забезпечують несилове різання і дозволять обробляти будь-який електропровідний матеріал поза залежністю від його фізико-хімічних властивостей, зокрема твердості. Вибір методу обробки визначається не тільки продуктивністю та точністю обробки, але й умовами праці оператора.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботі [3] запропоновано спосіб розмірної обробки дугою (РОД) тіл обертання, в основу якого покладено ідею «токарної» обробки малогабаритним електродом-інструментом (переважно графітовим), що не обертається. Даний спосіб забезпечує високу продуктивність обробки. Однак, в процесі обробки даним способом графітовий електрод-інструмент може торкатися шорсткої поверхні електрода-заготовки, що обертається, внаслідок чого його лінійний абразивний знос може складати 10 – 20 %. Завдяки наявності інтенсивного зносу електрода-інструмента, цей недолік не дозволяє реалізувати точну обробку.

В роботі [4] запропоновано спосіб РОД тіл обертання з використанням дротового електрода-інструмента, який протягується в зоні обробки і таким чином «компенсує» його електроерозійний знос [5]. Тому точність обробки значно

підвищується. Однак, при реалізації даного способу спостерігається ефект розбризкування робочої рідини за межі робочої зони верстата та підвищений світловий ефект від горіння електричної дуги в зоні обробки. Це погіршує умови праці. Крім того, при протягуванні дротового електрода-інструмента по опуклій поверхні електродотримача виникає тертя ковзання, що приводить з часом до механічного руйнування місця контакту. В наслідок цього на електродотримачі утворюється глибока колія. Коли глибина колії досягає діаметра дротового електрода-інструмента (його діаметр звичайно дорівнює 0,8 мм), починається руйнування електродотримача електричною дугою. Процес обробки зупиняють, а електродотримач виготовляють новий та замінюють. Таким чином, довговічність роботи електродотримача у відомому способі не задовільна.

Із викладеного вище, в роботі пропонується:

- розробити та дослідити спосіб обробки тіл обертання з занурення зони обробки в робочу рідину, який забезпечує покращання умов праці оператора за рахунок усунення ефекту розбризкування робочої рідини та усунення світлового ефекту від горіння дуги в зоні обробки [5];

- розробити та дослідити новий пристрій для реалізації способу обробки тіл обертання з занурення зони обробки в робочу рідину, в якому підвищення довговічність роботи електродотримача забезпечується за рахунок виконання його у вигляді ролика [6]. При цьому тертя ковзання дротового електрода-інструмента об електродотримач замінюється на тертя кочення.

Даний спосіб та пристрій для його реалізації не були об'єктом дослідження.

**Постановка задачі.** Метою дослідження є покращання умов праці при реалізації процесу РОД тіл обертання з використання дротового електрода-інструмента за рахунок усунення ефекту розбризкування робочої рідини та скасування світлового ефекту від горіння дуги в зоні обробки, і підвищення довговічності роботи електродотримача.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі: запропонувати та обґрунтувати нову технологічну схему формоутворення поверхні тіла обертання електричною дугою з використанням дротового електрода-інструмента, при якій обробку здійснюють з зануренням зони обробки в ванну з робочою рідиною; розробити методику експериментального дослідження технологічних характеристик; виконати експериментальні дослідження продуктивності, точності та якості процесу РОД тіл обертання з використанням дротового електрода-інструмента з зануренням зони обробки в ванну з робочою рідиною.

Методика дослідження включає в себе аналіз та порівняння елементів відомої технологічної схеми формоутворення поверхні тіла обертанням зі схемою, що пропонується. Крім того, методика передбачає побудову математичних моделей технологічних характеристик процесу РОД тіл обертання з використанням дротового електрода-інструмента (табл. 1).

На підставі апріорної інформації були одібрані два фактори, які можуть впливати на процес РОД тіл обертання з використанням дротового електрода-інструмента: сила струму  $I (X_1)$ , А; статичний тиск робочої рідини в форсунці перед виходом із неї  $P_{ст} (X_2)$ , МПа.

Таблиця 1 – Матриця планування експерименту (план  $2^2$ )

Фактори				$I, A$	$P_{ср}, MPa$	$M, mm^3/xv$	$M_a, mm^3/A \cdot xv$	$a, \frac{kВт \cdot год}{кг}$	$Ra, мкм$
Основний рівень				100	0,3				
Інтервал варіювання				50	0,1				
Верхній рівень				150	0,4				
Нижній рівень				50	0,2				
Код				$x_1$	$x_2$	$y_1$	$y_3$	$y_4$	$y_6$
Номер дослідів	1	Порядок реалізації	3	+	+	300	2,00	31,85	25
	2		2	-	+	204	4,08	15,61	13
	3		4	+	-	347	2,31	27,53	35
	4		1	-	-	142	2,84	22,43	15
Досліди в центрі плану		1		0	0	280	2,80	22,74	22
		2		0	0	280	2,80	22,74	21
		3		0	0	240	2,40	26,54	23
		4		0	0	240	2,40	26,54	23

Джерело: розроблено автором

Для дослідження технологічних характеристик процесу РОД тіл обертання з використанням дротового ЕІ з зануренням зони обробки в робочу рідину використовувався модернізований універсальний токарний верстат моделі 16К20. Різцетримач з цього верстату демонтований, а на його місце встановлений розроблений та виготовлений експериментальний пристрій (рис. 1).

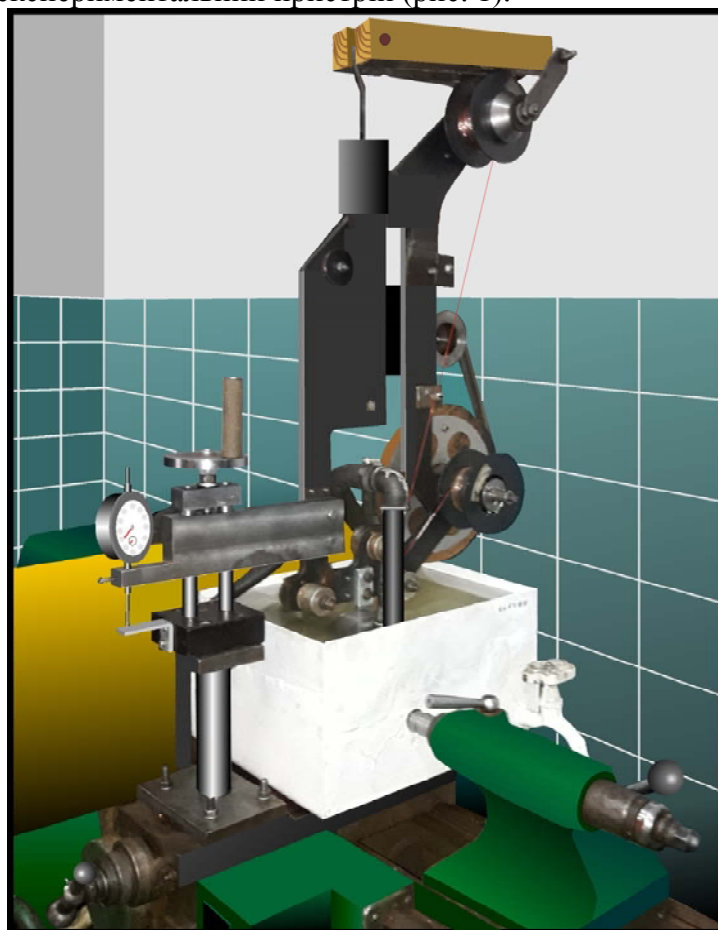
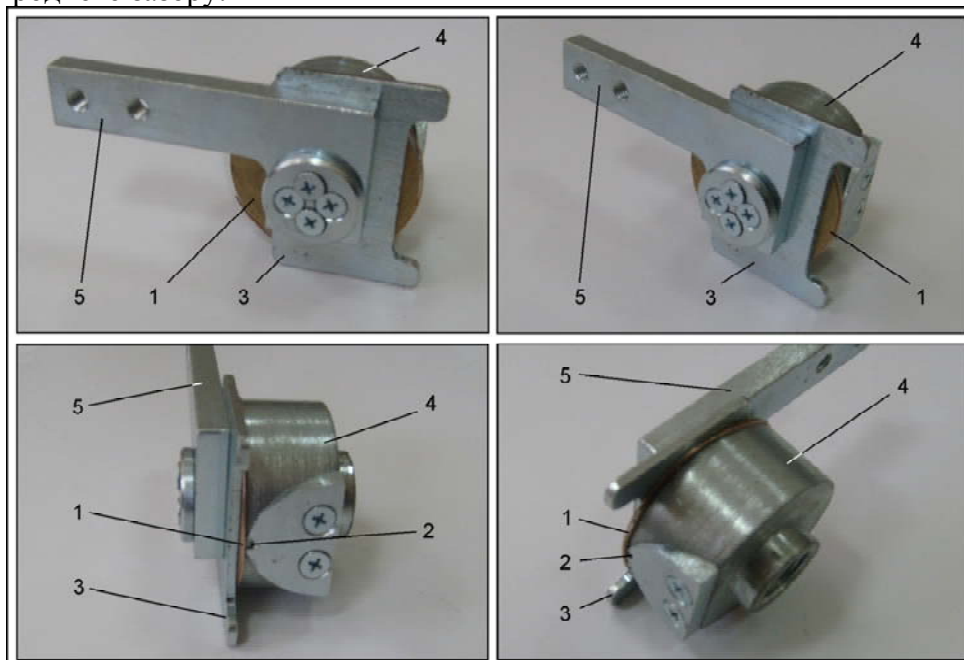


Рисунок 1 – Експериментальний пристрій для РОД тіл обертання з використанням дротового електрода-інструмента з зануренням зони обробки у ванну з робочою рідиною

Джерело: розроблено автором

Пристрій для точіння дугою включає в себе: інструментальну головку (рис. 2), в якій електродотримач виконано у вигляді ролика; механізм перемотування дроту; ванну з технічною водою; стійку, на якій монтується механізм регулювання торцевого міжелектродного зазору.

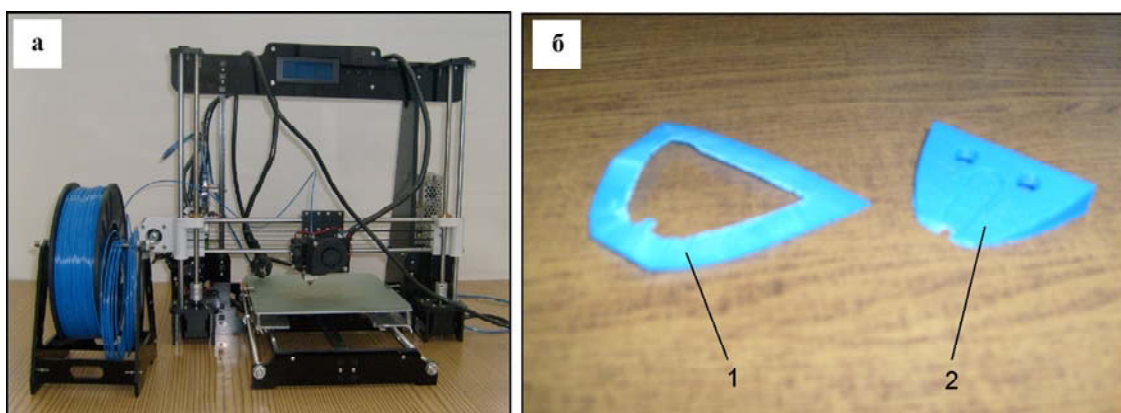


1 – електродотримач (ролик); 2 – форсунка для створення кумулятивного потоку; 3 – напрямляч дроту;  
4 – корпус; 5 – планка для кріплення головки до механізму перемотування дроту

Рисунок 2 – Інструментальна головка пристрою для РОД тіл обертання з використанням дротового ЕІ

*Джерело: розроблено автором*

Пристрій працює таким чином. Електрод-заготовка встановлюється в центрах та обертається від повідцю. Робоча зона ущільнюється манжетами, які встановлені в протилежних стінках ванни. В інструментальну головку подають технічну воду під регульованим тиском, а витікає рідина крізь форсунку б, яка формує кумулятивний (що звужується) струмінь та спрямовує його поперечно стовпу електричної дуги. Складна форма пластмасової форсунки обумовила доцільність її виготовлення на 3D принтері (рис. 3).



1 – основа, що передує друку деталі; 2 – деталь «форсунка»  
Рисунок 3 – 3D-принтер моделі A8 3D Printer (а) та деталь «форсунка», яка отримана на ньому (б)

*Джерело: розроблено автором*

**Виклад основного матеріалу.** В способі РОД тіл обертання з використанням дротового електрода-інструмента з зануренням зони обробки в робочу рідину, що пропонується, використовується нова технологічна схема формоутворення. Електричну дугу збуджують в гідродинамічному потоці робочої рідини між електродом-заготовкою, що обертається, та дротовим електродом-інструментом, який протягують в зоні обробки по опуклій поверхні електродотримача в площині, що перпендикулярна осі обертання електрода-заготовки, а процес здійснюють при гарантованому зазорі між не обробленою поверхнею електрода-заготовки та електродом-інструментом, тобто без можливого контакту електрода-інструмента з електродом заготовкою та без застосування слідкуючої подачі електрода-інструмента. Процес здійснюють з зануренням зони обробки в робочу рідину. Електродотримач виконано у вигляді ролика, який обертається, з напрямною канавкою для дротового електрода-інструмента, а форсунка змонтована окремо, але в суміжному з електродотримачем, нерухомому корпусі.

Реалізацію даного способу здійснюють з використанням пристрою (рис. 4), що монтується на модернізованому токарному верстаті. Електрод-заготовку 1 закріплюють в трьохкулачковому патроні та обертають. Від джерела живлення 2 постійного електричного струму електричну дугу 3 збуджують в гідродинамічному поперечному потоці робочої рідини 4 між електродом-заготовкою 1 та дротовим електродом-інструментом 5 діаметром  $d$ , який протягують в зоні обробки по опуклій поверхні 6 електродотримача 7 в площині, що перпендикулярна осі обертання 8 електрода-заготовки 1. Процес здійснюють при гарантованому зазорі  $Z$  між не обробленою поверхнею 9 електрода-заготовки 1 та дротовим електродом-інструментом 5, тобто без можливого контакту електрода-інструмента 5 з електродом-заготовкою 1.

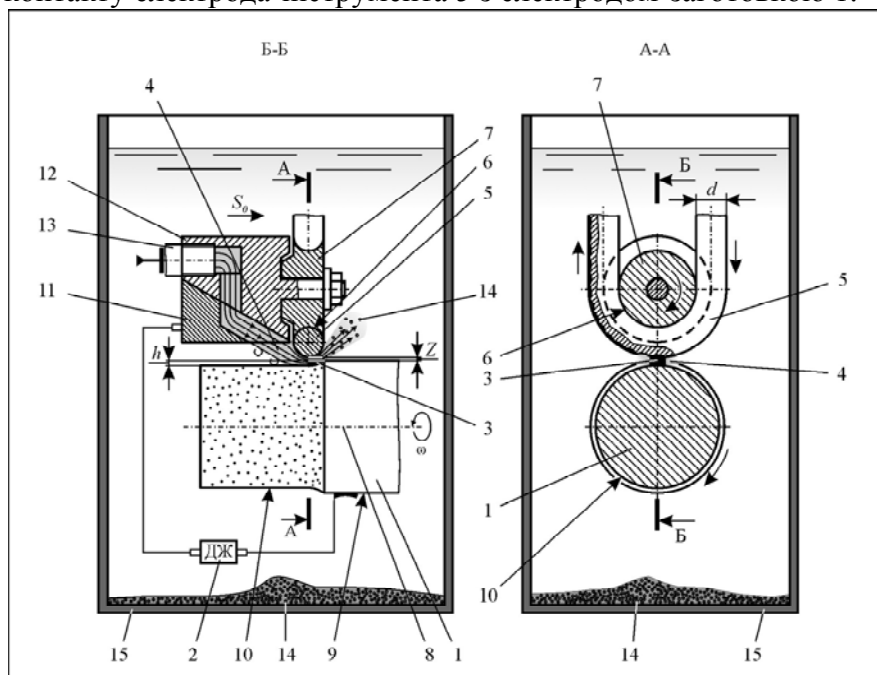


Рисунок 4 – Принципова схема пристрою для реалізації технологічної схеми формоутворення поверхні тіла обертання електричною дугою з використанням дротового електрода-інструмента та зануренням зони обробки в робочу рідину

*Джерело: розроблено автором*

Оскільки електродотримач 7 виконано у вигляді ролика, який обертається, з напрямною канавкою для дротового електрода-інструмента 5, останній протягується по

опуклій поверхні 6 електродотримача 7 без проковзування, а тертя ковзання не виникає. Саме тому, місце контакту дротового електрода-інструмента 5 з електродотримачем 7 (роликом) не руйнується, а термін роботи електродотримача 7 значно підвищується.

Така технологічна схема формоутворення циліндричної поверхні 10 компенсує знос дротового електрода-інструмента 5 (кожна нова дуга горить на новому місці) та дозволяє здійснювати процес обробки без застосування слідкуючої подачі електрода-інструмента 5, тобто при постійній осьовій подачі  $S_0$ . Останнє, в свою чергу, забезпечує підвищення точності формоутворення циліндричної поверхні 10 та її рівномірну шорсткість, зокрема деталей великого діаметра, що виготовляються із важко-оброблюваних матеріалів.

Пристрій постачається форсункою 11, яка змонтована в окремому, але суміжному з електродотримачем 7, нерухомому корпусі 12. Форсунка 11 живиться від насоса через патрубок 13.

З метою усунення можливості розбризкування робочої рідини на виході із міжелектродного зазору, організації збирання продуктів ерозії 14 та покращення умов роботи оператора, обробку здійснюють із зануренням робочої зони в ванну 15 з робочою рідиною.

Використання способу, що пропонується, порівняно з відомим, дозволяє покращити умови праці оператора при реалізації процесу РОД тіл обертання з використанням дротового електрода-інструмента за рахунок усунення ефекту розбризкування робочої рідини та скасування світлового ефекту від горіння дуги з зони обробки, і підвищити довговічність роботи електродотримача в 80 – 100 разів.

Отримано рівняння регресії та математичні моделі технологічних характеристик, що визначають продуктивність, точність та якість процесу РОД тіл обертання електричною дугою з використанням дротового електрода-інструмента з зануренням зони обробки в робочу рідину та дозволяють керувати ними і прогнозувати їх :

- продуктивність обробки  $M(y_1)$ , мм<sup>3</sup>/хв

$$y_1 = 248 + 75,25x_1,$$

$$M = 97,5 + 1,5 \cdot I ;$$

- питома продуктивність обробки  $M_a(y_2)$ , мм<sup>3</sup>/А·хв.

$$y_2 = 2,81 - 0,6525x_1 \cdot y_2,$$

$$M_a = 4,115 - 0,01305 \cdot I ;$$

- питома витрата електроенергії  $a(y_3)$ , кВт·год/кг

$$y_3 = 24,35 + 5,33x_1,$$

$$a = 13,69 + 0,107 \cdot I ;$$

- шорсткість поверхні після обробки  $Ra(y_5)$ , мкм

$$y_4 = 22 + 8x_1 - 12x_2 ,$$

$$Ra = 42 + 0,16 \cdot I - 120 \cdot P_{cm}.$$

Показано (рис. 5), що найбільший вплив на продуктивність РОД тіл обертання  $M$  виявляє сила технологічного струму  $I$  (ступінь впливу 100 %), із підвищенням якої продуктивність обробки збільшується. Останнє підтверджує теплову природу процесу РОД. Таким чином, силу технологічного струму треба розглядати як основний

керуючий фактор. В рамках експерименту продуктивність обробки змінювалася у межах від 142 до 347  $\text{мм}^3/\text{хв}$ .

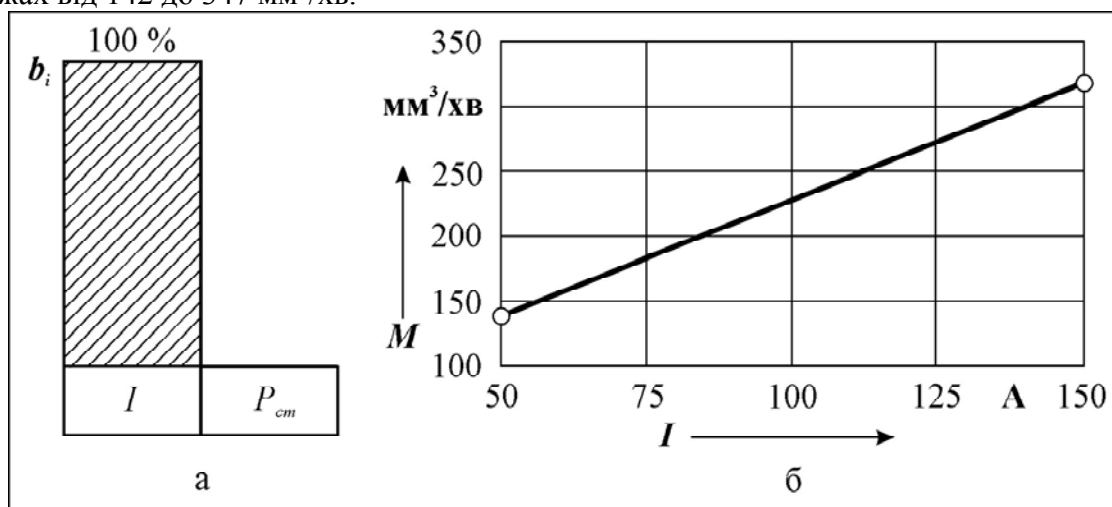


Рисунок 5 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність продуктивності обробки  $M$  від  $I$  (б)  
Джерело: розроблено автором

Із отриманої математичної моделі питомої продуктивності обробки тіл обертання електричною дугою дротовим електродом-інструментом з зануренням зони обробки в робочу рідину  $M_a$  витікає (рис. 6), що найбільш впливовим фактором, а отже головним керуючим, є сила технологічного струму (ступінь впливу 100 %). Із зменшенням сили струму  $M_a$  збільшується. В умовах експерименту питома продуктивність обробки змінювалася у межах від 2,0 до 4,08  $\text{мм}^3/\text{А}\cdot\text{хв}$ .

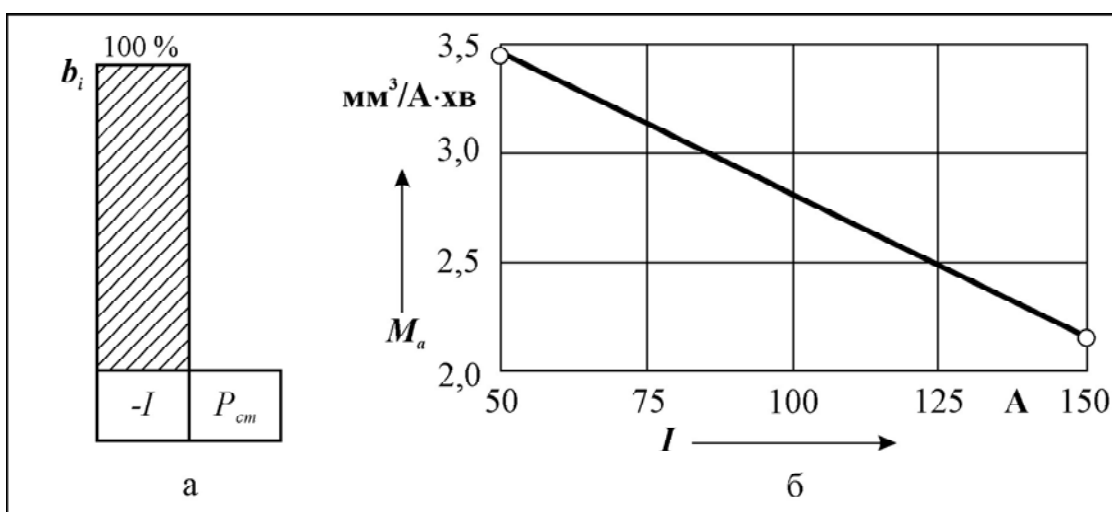


Рисунок 6 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність питомої продуктивності обробки  $M_a$  від  $I$   
Джерело: розроблено автором

Показано, що найбільший вплив на питому витрату електроенергії процесу обробки тіл обертання електричною дугою дротовим електродом-інструментом з зануренням зони обробки в робочу рідину  $a$  (ступінь впливу 100 %) виявляє сила струму  $I$ , із підвищенням якої  $a$  збільшується (рис. 7). Саме тому  $I$  слід розглядати як головний керуючий фактор. В умовах експерименту питома витрата електроенергії змінювалася у межах від 15,61 до 31,85  $\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{кг}$ .

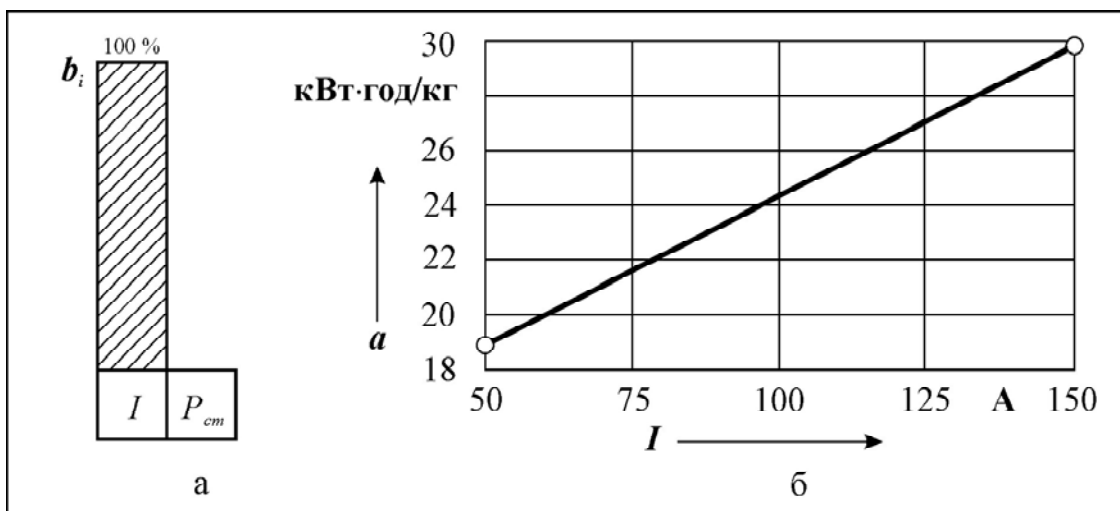
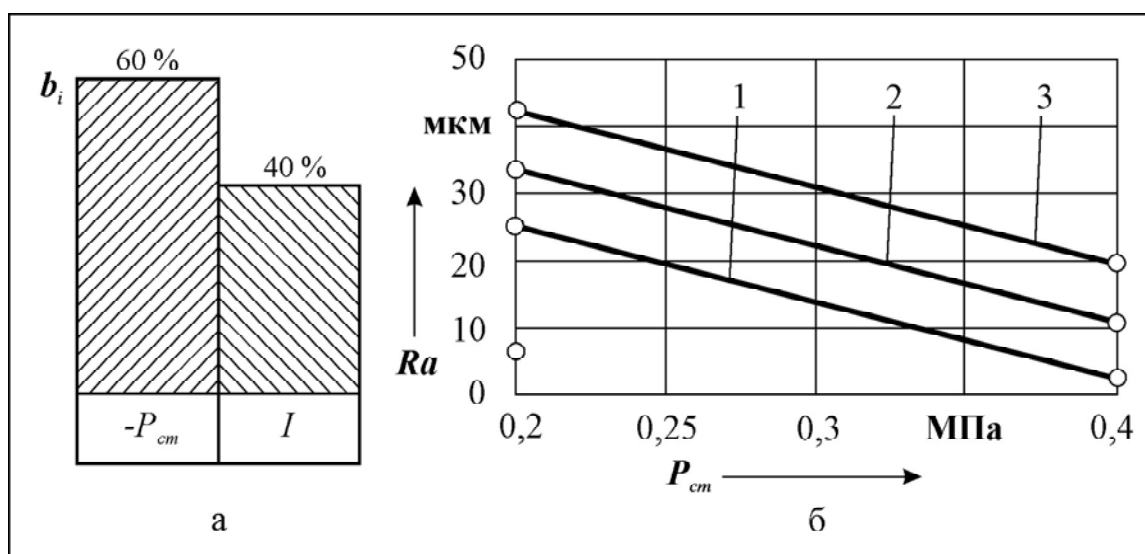


Рисунок 7 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність питомої витрати електроенергії  $a$  від  $I$   
 Джерело: розроблено автором

Показано, що на шорсткість  $Ra$  обробленої поверхні найбільш впливає статичний тиск робочої рідини на вході в форсунку  $P_{cm}$  (ступінь впливу 60%), із підвищенням якого  $Ra$  зменшується (рис. 8). Саме тому  $P_{cm}$  слід розглядати як головний керуючий фактор. Вплив сили струму  $I$  трохи менший, але суттєвий, і складає 40%. В умовах експерименту шорсткість поверхні  $Ra$  обробки тіл обертання електричною дугою дротовим електродом-інструментом з зануренням зони обробки в робочу рідину змінювалася у межах від 13 до 35 мкм (рис. 9).



1 -  $I = 50$  А; 2 -  $I = 100$  А; 3 -  $I = 150$  А

Рисунок 8 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність шорсткості поверхні обробки  $Ra$  від  $P_{cm}$  та  $I$  (б)

Джерело: розроблено автором





Рисунок 9 – Зразок із сталі 45 після РОД циліндричної поверхні з використанням дротового електрода-інструмента з зануренням зони обробки у ванну з робочою рідиною

*Джерело: розроблено автором*

Сліди від горіння електричної дуги, зануреної в рідину, вивчалися під мікроскопом зі збільшенням зображення у 6 разів (рис. 10). Ексцентрично розташована при обробці циліндрична початкова поверхня зразка дозволила виявити, що поверхня обробки тіла обертання формується елементарною електроерозійною доріжкою.

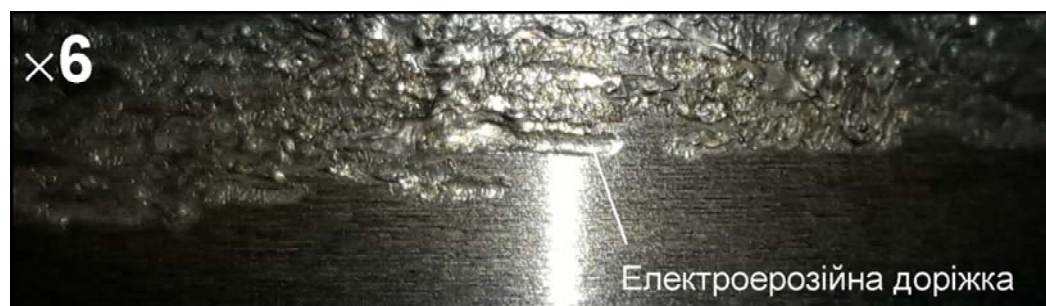


Рисунок 10 – Сліди від горіння електричної дуги, зануреної в робочу рідину, на шліфованій циліндричній поверхні (Режим обробки:  $I = 150$  А;  $U = 30$  В;  $P_{cm} = 0,4$  МПа; пряма полярність)

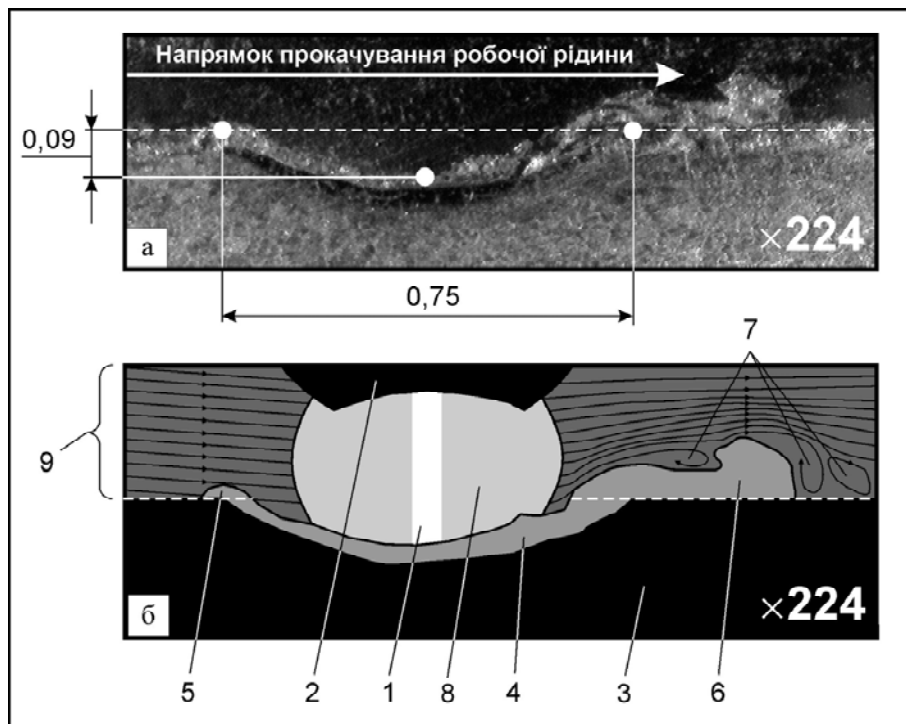
*Джерело: розроблено автором*

Із аналізу мікрошліфу поперечного перерізу електроерозійної доріжки (рис. 11, а) була отримана наступна інформація (рис. 11, б):

- отримані геометричні параметри доріжки: ширина – 0,75 мм при діаметрі електрода-дроту  $d = 0,8$  мм; глибина – 0,09 мм; коефіцієнт глибини електроерозійного сліду  $k = 8,3$ ;

- показано, що форма сліду асиметрична за рахунок збільшення висоти та ширини заднього валика 6, що формується із розплавленого металу доріжки. Останнє пояснюється турбулентністю, що виникає за газовою порожниною, яка утворюється навколо електричної дуги. В області турбулентності утворюються замкнуті вихори, в яких розплав рухається разом з потоком та застигає поблизу доріжки з утворенням валика 6 підвищеного розміру, порівняно з переднім валиком 5;

- із мікроструктури сталі 45 після РОД тіла обертання дровим електродом-інструментом виявлено (рис. 12), що товщина білого шару на вказаному типовому режимі (див. рис. 10) не перевищує 0,03 мм.



1 – електрична дуга; 2 – дровий електрод-інструмент; 3 – електрод-заготовка; 4 – наплавлений шар металу, що не вилучився із доріжки; 5 – передній валик в напрямку потоку; 6 – задній валик в напрямку потоку; 7 – зона турбулентності; 8 – газова порожнина (пузир); 9 – гідродинамічний потік робочої рідини (води) із форсунки

Рисунок 11 – Мікрошліф поперечного перерізу електроерозійної доріжки (а) та модельне уявлення процесу формоутворення електроерозійної доріжки при РОД тіла обертання з зануренням зони обробки в ванну з робочою рідиною (б):

*Джерело: розроблено автором*

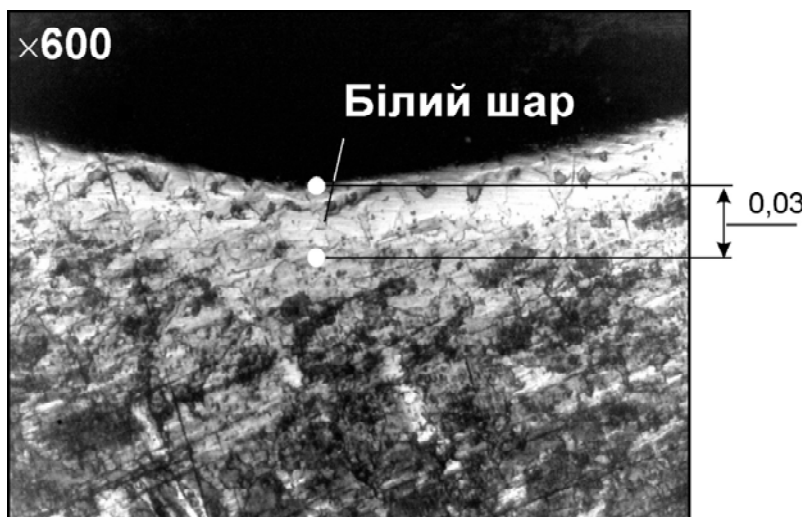


Рисунок 12 – Мікроструктура сталі 45 після РОД тіла обертання дровим електродом-інструментом з зануренням зони обробки в робочу рідину

*Джерело: розроблено автором*

**Висновки.** Запропоновано спосіб РОД тіл обертання з використанням дротового електрода-інструмента з зануренням зони обробки в ванну з робочою рідиною, що дозволяє покращити умови праці оператора шляхом усунення ефекту розбризкування рідини та скасування світлового ефекту від горіння дуги з зоні обробки. Крім того, запропоновано електродотримач виконати у вигляді ролика, який обертається з напрямною канавкою для дротового електрода-інструмента, а форсунку для створення поперечного гідродинамічного потоку рідини змонтувати в окремому, але суміжному з електродотримачем, нерухомому корпусі. Дане технічне рішення замінює тертя ковзання на тертя кочення, що підвищує довговічність роботи електродотримача. Отримано математичні моделі технологічних характеристик процесу РОД тіл обертання дротом електродом-інструментом з зануренням зони обробки в робочу рідину, які дозволяють керувати продуктивністю обробки, питомою продуктивністю обробки, питомою витратою електроенергії та шорсткістю обробленої поверхні.

## Список літератури

1. Думпе В. Э. Электроэрозионная обработка деталей. К.: Техніка, 1975. 144 с.
2. Размерная электрическая обработка металлов: учебное пособие для вузов / Б. А. Артамонов, А. Л. Винницкий, Ю. С. Волков, А. В. Глазков; под ред. А. В. Глазков. М.: Высш. шк., 1978. 336 с.
3. Спосіб обробки тіл обертання електричною дугою і електрод-інструмент для його реалізації: пат. 24439А Україна: МПК В23Р 17/00. № 97041927; заявл. 22.04.97; опубл. 30.10.98, Бюл. № 5.
4. Боков В. М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою: монографія. Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс – ЛТД», 2002. 300 с.
5. Спосіб обробки поверхонь тіл обертання електричною дугою в гідродинамічному потоці робочої рідини: пат. 121498 Україна: МПК В23К 9/013, В23К 35/38. № u201705537; заявл. 06.06.2017; опубл. 11.12.2017, Бюл. № 23.
6. Пристрій для обробки поверхонь тіл обертання електричною дугою в гідродинамічному потоці робочої рідини: пат. 130822 Україна: МПК В23К 9/013, В23К 35/38, В23К 103/00. № u2018 06873; заявл. 18.06.2018; опубл. 26.12.2018, Бюл. № 24.

## References

1. Dumpe, V. Je. (1975). *Jelektroerozionnaja obrabotka detalej [Electrical discharge machining of parts]*. Kyiv: Tehnika [in Russian].
2. Artamonov, B.A., Vinnickij, A.L., Volkov, Ju.S. & Glazkov, A.V. (1978). *Dimensional electrical processing of metals: a textbook for universities*. A.V. Glazkov (Ed.). Moscow: Vyssh. shk. [in Russian].
3. Pat. 24439A Ukraine, MPK V23R 17/00. Sposib obrobky til obertannia elektrychnoiu duhoiu i elektrod-instrument dlia joho realizatsii [The method of wrapping til wrapping with an electric arc and an electro-tool for yogo implementation]. No. 97041927; stated. April 22, 1997; has been published October 30, 1998, Bul. No. 5. [in Ukrainian].
4. Bokov, V.M. (2002). *Rozmirne formoutvorennia poverkhon' elektrychnoiu duhoiu: monohrafia [The shape-setting of the surface with an electric arc: monograph]*. Kirovohrad: Polihrafichno-vydavnychyj tsentr TOV «Imeks – LTD» [in Ukrainian].
5. Pat. 121498 Ukraine, MPK V23K 9/013, V23K 35/38. Sposib obrobky poverkhon' til obertannia elektrychnoiu duhoiu v hidrodinamichnomu pototsi robochoi ridyny [The method of processing surfaces by wrapping with an electric arc in a hydrodynamic potting of a working day]. No. u201705537; stated. June 06, 2017; has been published December 11, 2017, Bul. No. 23. [in Ukrainian].
6. Pat. 130822 Ukraine, MPK V23K 9/013, V23K 35/38, V23K 103/00. Prystrij dlia obrobky poverkhon' til obertannia elektrychnoiu duhoiu v hidrodinamichnomu pototsi robochoi ridyny [Pristiy for obrobony surface til wraparound with an electric arc in a hydrodynamic flow of work]. No. u2018 06873; stated. June 18, 2018; has been published December 26, 2018, Bul. No.24. [in Ukrainian].

**Victor Bokov**, Prof., PhD tech. sci., **Oleh Sisa**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vasyl Yuryev**, post-graduate  
*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Improving Electrical Discharge Machining Process for Bodies of Rotation**

In modern mechanical engineering, electrical discharge machining (EDM) methods are widely used for machining bodies of rotation from difficult-to-machine materials. Those methods ensure sparing cutting and

make it possible to machine any electrically conductive material irrespective of its physical and chemical properties, in particular hardness. There is a known method for dimensional machining of bodies of rotation with electric arc using a wire electrode tool that is pulled along in the machining area thus "compensating" for that tool's EDM wear and tear. The machining accuracy is therefore significantly heightened. However, when implementing this method, an effect of splashing the working fluid outside the working area of the machine and a pronounced luminous effect from the burning of the electric arc in the machining area are observed. That worsens the working conditions. In addition, when pulling the wire electrode tool along the convex surface of the electrode holder, the sliding friction arises, which eventually leads to mechanical destruction of the contact point. As a result, a deep kerf is formed on the electrode holder. When the depth of the kerf reaches the diameter of the wire electrode tool, the destruction of the electrode holder by the electric arc begins. Consequently, the durability of the electrode holder in the known method is unsatisfactory.

A method of dimensional machining of bodies of rotation with electric arc using a wire electrode tool with the immersion of the machining area in the working fluid has been proposed, which makes it possible to improve the working conditions of the operator by eliminating the effect of fluid splashing and removing the luminous effect of arc burning in the machining area. In addition, it has been proposed to make the electrode holder in the form of a roller that rotates with a guide groove for the wire electrode tool, while the nozzle for creating the transverse hydrodynamic fluid flow has been proposed to be mounted in a separate fixed housing that is adjacent to the electrode holder. This technical solution replaces the sliding friction with the rolling one thus enhancing the durability of the electrode holder. Mathematical models of the process characteristics of the DMA-process (dimensional machining with electric arc) for bodies of rotation using a wire electrode tool with the immersion of the machining area in the working fluid have been obtained that make it possible to control the machining productivity, the specific machining productivity, the specific electric power consumption, and the roughness of the surface machined.

**electric arc, hydrodynamic conditions, wire electrode tool, shaping arrangement, immersion tank**

*Одержано (Received) 30.07.2020*

*Прорецензовано (Reviewed) 05.08.2020*

*Прийнято до друку (Approved) 19.10.2020*

**УДК 656.078**

**DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).324-330](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).324-330)**

**І.О. Хітров**, доц., канд. техн. наук, **М.Є. Кристопчук**, доц., канд. техн. наук  
*Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне,  
Україна  
e-mail: [i.o.khitrov@nuwm.edu.ua](mailto:i.o.khitrov@nuwm.edu.ua), [m.ie.krystopchuk@nuwm.edu.ua](mailto:m.ie.krystopchuk@nuwm.edu.ua)*

## **Закономірності формування і розподілу транспортних та пасажирських потоків**

Проведено аналіз результатів досліджень розміщення об'єктів транспортної інфраструктури, зокрема автовокзалів та транспортно-пересадочних вузлів в плані міста, залежно від планувальних особливостей транспортної мережі. Встановлено, що для побудови раціональної маршрутної мережі міст та стійкого зв'язку між об'єктами транспортної інфраструктури необхідне дослідження пасажирських кореспонденцій та розподілу транспортних потоків.

**транспортна інфраструктура, транспорт, транспортна мережа, транспортні потоки, пасажирські потоки, розподіл потоків, ефективність**

**И.А. Хитров**, доц., канд. техн. наук, **М.Е. Кристопчук**, доц., канд. техн. наук  
*Національний університет водного господарства та природопользования, г. Ровно, Украина*  
**Закономерности формирования и распределения транспортных и пассажирских потоков**

© І.О. Хітров, М.Є. Кристопчук, 2020