

Центральноукраїнський національний технічний університет  
Факультет механіко-технологічний  
Кафедра «Машинобудування, мехатроніки і робототехніки»

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри ММР

к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Андрій ГРЕЧКА

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**за другим (магістрським) рівнем вищої освіти**

**на тему**

**«Чорнова обробка отворів мідним електрод-  
інструментом електричною дугою»**  
**«Rough finishing of holes with a copper electrode  
tool using an electric arc»**

Виконав здобувач II курсу групи ПМ-24Мз-2

ОПП «Прикладна механіка»

спеціальності 131 «Прикладна механіка»

\_\_\_\_\_ Андрій ПУГАЧ

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

Керівник проекту

доцент, канд.техн.наук

\_\_\_\_\_ Олег СІСА

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

Рецензент

\_\_\_\_\_ Віктор ПУКАЛОВ

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

м. Кропивницький

Факультет: Механіко-технологічний  
 Кафедра: «Машинобудування, мехатроніка і робототехніка»  
 Рівень вищої освіти: другий (магістерський)  
 Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»  
 Спеціальність: 131 «Прикладна механіка»  
 Освітньо-професійна програма: «Прикладна механіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
 Зав. кафедри ММР  
 канд. техн. наук, доцент  
 \_\_\_\_\_ Андрій ГРЕЧКА  
 29 серпня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ  
 ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ  
 Пугачу Андрію Григоровичу**

1. Тема роботи: «Чорнова обробка отворів мідним електрод-інструментом електричною дугою».
2. Керівник роботи: Сіса Олег Федорович, к. т. н., доцент.
3. Строк подання роботи до захисту: 26 грудня 2025 р.
4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи.  
 Мета: прогнозування технологічних характеристик та підвищення ефективності процесу РОД отворів мідними електродами-інструментами.  
 Завдання: обґрунтувати технологічну схему формоутворення отвору способом РОД; розробити та проаналізувати математичні моделі, що обумовлюють технологічні характеристики точності, якості та продуктивності процесу РОД отворів мідним ЕІ; виконати аналіз технологічної схеми формоутворення та інтенсифікація процесу РОД малого отвору мідним ЕІ.
5. Консультант по роботі, із зазначенням розділу роботи:

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
№ 5 «Економічна частина»	Савеленко Г. В., к. т. н., доц.	1.09.2025 р.	23.12.2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Опрацювання навчальної та наукової літератури	16.09.2025 р.	
2	Проведення наукових досліджень, обробка фактичного матеріалу	6.10.2025 р.	
3	Написання першого варіанта тексту, подання його на ознайомлення керівникові	28.11.2025 р.	
4	Усунення недоліків, написання останнього варіанта тексту	16.12.2025 р.	
5	Перевірка роботи на плагіат	23.12.2025 р.	
6	Зовнішнє рецензування роботи	24.12.2025 р.	
7	Захист випускної кваліфікаційної роботи на засіданні екзаменаційної комісії	26.12.2025 р.	

Дата видачі завдання  
01 вересня 2025 р.

Підпис керівника

\_\_\_\_\_ О. Сіса

Завдання прийнято до виконання  
01 вересня 2025 р.

Підпис здобувача

\_\_\_\_\_ А. Пугач

## Анотація

на випускню кваліфікаційну роботу студента групи ПМ-24Мз-2 Пугача Андрія Григоровича зі спеціальності 131 «Прикладна механіка» на тему: «Чорнова обробка отворів мідним електрод-інструментом електричною дугою».

Випускню кваліфікаційну роботу присвячено проблемі отримання отворів способом розмірної обробки електричною дугою (РОД) металевими електрод-інструментами, зокрема мідними. Ця проблема носить гострий характер так, як напруга на електродах, разом з іншими факторами, суттєво впливає на відносний лінійний знос мідного електрод-інструмента (ЕІ) при обробці малих отворів. Необхідність використання мідного ЕІ для РОД малих отворів (діаметром менше трьох мм) обумовлюється суттєвими технічними складностями виготовлення трубчастого ЕІ із графіту, як більш електроерозійностійкого матеріалу, у зв'язку механічною міцністю останнього.

В роботі, на підставі експериментальних досліджень, отримано математичні моделі технологічних характеристик процесу чорнкової обробки отворів мідним електрод-інструментом електричною дугою. встановлено, що на відносний лінійний знос мідного ЕІ при РОД отворів одночасно та приблизно в рівній мірі впливають три фактора: напруга на електродах, із підвищенням якої знос зменшується; сила струму, із зменшенням якої знос зменшується; статичний тиск робочої рідини на вході в міжелектродний зазор, із підвищенням якого знос зменшується. Встановлена закономірність дозволила мінімізувати знос до значення 4,9 %, що у 6 разів менше, порівняно з відомими експериментальними даними. Отримані математичні моделі дозволяють прогнозувати та оптимізувати режим виготовлення отворів способом РОД з використанням мідного електрод-інструмента.

**Ключові слова:** електрична дуга, електрод-інструмент, технологія, технологічні характеристики, обладнання.

## Summary

for the final qualification work of the student of the PM-24Mz-2 group, Andriy Grigorovich Pugach, in the specialty 131 "Applied Mechanics" on the topic: "Rough finishing of holes with a copper electrode tool using an electric arc".

The final qualification work is devoted to the problem of obtaining holes by the method of dimensional processing by electric arc (abbreviated as DMA) with metal electrode tools, in particular copper ones. This problem is acute in that the voltage on the electrodes, together with other factors, significantly affects the relative linear wear of the copper electrode tool (abbreviated as ET) when processing small holes. The need to use copper ET for DMA of small holes (with a diameter of less than three mm) is due to the significant technical difficulties of manufacturing tubular ET from graphite, as a more electroerosion-resistant material, due to the mechanical strength of the latter.

In the work, based on experimental studies, mathematical models of the technological characteristics of the process of roughing holes with a copper electrode tool by electric arc were obtained. It was established that the relative linear wear of copper ET during DMA of holes is simultaneously and approximately equally influenced by three factors: the voltage on the electrodes, with an increase in which the wear decreases; the current strength, with a decrease in which the wear decreases; the static pressure of the working fluid at the entrance to the interelectrode gap, with an increase in which the wear decreases. The established pattern allowed minimizing the wear to a value of 4.9%, which is 6 times less, compared to the known experimental data. The obtained mathematical models allow predicting and optimizing the mode of manufacturing holes by the DMA method using a copper electrode tool.

**Keywords: electric arc, electrode-tool, technology, technological characteristics, equipment.**

**ЗМІСТ**

ВСТУП .....	8
<b>РОЗДІЛ 1</b> <b>ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБРАНОГО НАПРЯМКУ</b>	
<b>ДОСЛІДЖЕННЯ</b> .....	12
1.1 Характеристика електроерозійної обробки отворів .....	12
1.2 Про технологічні можливості процесу РОД отворів .....	15
1.3 Узагальнення результатів огляду способів обробки отворів та обґрунтування напрямку дослідження .....	20
<b>РОЗДІЛ 2</b> <b>МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО</b>	
<b>ДОСЛІДЖЕННЯ</b> .....	22
2.1 Обґрунтування технологічної схеми формування отвору способом РОД .....	22
2.2 Методика математичного моделювання технологічних характеристик процесу РОД отворів мідним ЕІ .....	24
2.3 Експериментальне обладнання та оснащення	29
<b>РОЗДІЛ 3</b> <b>МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ</b>	
<b>ХАРАКТЕРИСТИК ТОЧНОСТІ, ЯКОСТІ ТА</b>	
<b>ПРОДУКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ РОД ОТВОРІВ</b>	
<b>МІДНИМ ЕІ</b> .....	36
3.1 Відносний лінійний знос мідного ЕІ .....	36
3.2 Бічний міжелектродний зазор .....	40
3.3 Шорсткість обробленої поверхні .....	43

3.4	Продуктивність обробки .....	47
3.5	Питома продуктивність обробки .....	49
3.6	Питома витрата електроенергії .....	53
3.7	Висновки .....	56
РОЗДІЛ 4	АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ФОРМУ- УТВОРЕННЯ ТА ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ РОД МАЛОГО ОТВОРУ МІДНИМ ЕІ .....	59
4.1	Гідродинамічний режим робочої рідини в каналі ЕІ .....	59
4.2	Експериментальні випробування нового способу РОД малих отворів з використанням мідного ЕІ .....	61
4.3	Висновки .....	66
РОЗДІЛ 5	ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА .....	68
5.1	Економічна ефективність способу чорнової обробки отворів мідним електрод-інструментом електричною дугою .....	68
	ВИСНОВКИ .....	72
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	75

## ВСТУП

### Актуальність теми

Сучасними методами обробки отворів є методи електро-ерозійної обробки, які дозволяють обробляти будь-який за твердістю електропровідний матеріал (наприклад, загартовані сталі та тверді сплави), а також отримувати отвори складного (не круглого) перерізу при використанні простого поступального руху електрода-інструмента (ЕІ).

Одним із найбільш перспективних високопродуктивних методів електроерозійної обробки отворів є спосіб розмірної обробки металів електричною дугою (РОД), який відомий за роботою Носуленка В. І. [1]. У порівнянні з відомими способами електроерозійної обробки, спосіб РОД дозволяє збільшити продуктивність обробки приблизно на порядок і більше, зменшити приблизно в два рази питомі витрати електроенергії та в 3-5 разів знизити вартість джерел живлення технологічним струмом [2].

При обробці отворів способом РОД електрична дуга горить в торцевому міжелектродному зазорі (МЕЗ) між електроодом-інструментом (ЕІ) та електроодом-заготовкою (ЕЗ) в потужному поперечному потоці робочої рідини. Її енергетичні та геометричні параметри, що обумовлюють технологічні характеристики процесу РОД, залежать не тільки від сили технологічного струму  $I$  та динамічного тиску робочої рідини в зазорі  $P_0$ , як показано в роботах [1 – 4], але й від інших умов, зокрема, як буде показано нижче, від величини напруги  $U$  на електродах. Так, напруга на електродах, разом з іншими факторам, суттєво впливає на відносний лінійний знос мідного ЕІ при обробці малих отворів. Необхідність використання мідного ЕІ для РОД малих отворів (діаметром менше трьох мм) обумовлюється суттєвими технічними складностями виготовлення трубчастого ЕІ із графіту, як більш електроерозійностійкого матеріалу, у зв'язку механічною міцністю останнього.

Отримані в роботі математичні трьохфакторні моделі відносного лінійного зносу мідного ЕІ та інших технологічних характеристик даного

Експериментальні дослідження технологічних характеристик процесу РОД отворів проводилися з використання методів багатофакторного математичного планування експерименту та проводилися за допомогою сучасної вимірювальної апаратури. Вивчення фрактографій поверхні після РОД мідним ЕІ здійснювалося з використанням растрового електронного мікроскопу моделі РЕМ-106И виробництва Сумського ВАТ «SELMІ».

### **Наукова новизна одержаних результатів**

Вперше встановлено, що на відносний лінійний знос мідного ЕІ при РОД отворів одночасно та приблизно в рівній мірі впливають три фактора: напруга на електродах, із підвищенням якої знос зменшується; сила струму, із зменшенням якої знос зменшується; статичний тиск робочої рідини на вході в міжелектродний зазор, із підвищенням якого знос зменшується. Встановлена закономірність дозволила мінімізувати знос до значення 4,9 %, що у 6 разів менше, порівняно з відомими експериментальними даними.

Вперше отримані математичні моделі таких технологічних характеристик, як продуктивність обробки, питома продуктивність обробки, питома витрата електроенергії, шорсткість обробленої поверхні, величина бічного міжелектродного зазору та відносний лінійний знос ЕІ, які дозволяють прогнозувати їх та оптимізувати режим виготовлення отворів способом РОД з використанням мідного ЕІ.

### **Практичне значення одержаних результатів**

1. Одержані математичні моделі процесу РОД отворів мідним ЕІ знаходять практичне застосування при прогнозуванні:

- відносного лінійного зносу ЕІ та бічного міжелектродного зазору – характеристик, що визначають точність обробки;

- шорсткості обробленої поверхні – характеристики, що визначає якість обробки;

- продуктивності, питомої продуктивності обробки – характеристик, що визначають економічну ефективність обробки.

2. Отримана математична модель відносного лінійного зносу мідного ЕІ дозволяє визначити та реалізувати такий режим обробки отвору, що відповідає мінімальному зносу ЕІ (4,9 %), що в 6 разів менше, порівняно з відомими експериментальними даними.

3. Запропоновано нову технологічну схему формоутворення, спроектовано експериментальний пристрій та реалізовано новий спосіб обробки електричною дугою малих отворів, який дозволив зменшити найменший діаметр отвору, що обробляється з 3,0 мм до 2,0 мм з використанням мідного ЕІ.

### **Апробація результатів дисертації**

Основні положення та результати випускної кваліфікаційної роботи повідомлені і обговорені на LIX науково-технічній конференції здобувачів вищої освіти приуроченій «Дню науки – 2025» в ЦНТУ.

### **Структура та обсяг роботи**

Випускна кваліфікаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, переліку джерел посилання. Загальний обсяг роботи 78 сторінок, в тому числі 22 рисунків і 12 таблиць, список використаних джерел з 38 найменувань.

## ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБРАНОГО НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 1.1 Характеристика електроерозійної обробки отворів

Електроерозійний метод обробки було запропоновано в 1943 році Б. Р. Лазаренко та Н. І. Лазаренко [5], а одним із перших його промислових застосувань була обробка отворів [6-8]. В загальному випадку електроерозійне прошивання отворів здійснюється при використанні одного поступального руху електрода-інструмента, що потребує для реалізації процесу простих кінематичних засобів. Метод електроерозійної обробки дозволив обробляти практично будь-які отвори за геометричною складністю та в будь-якому електро-провідному матеріалі незалежно від його механічних властивостей [9]. Останнє є головною перевагою електроерозійного метода обробки отворів, порівняно з методами їх механічної обробки [10, 11].

Електроерозійна обробка включає в себе: електроіскрову, електроімпульсну, електроконтактну та розмірну обробку електричною дугою (РОД).

**Електроіскрова обробка** отворів заснована на використанні електричних розрядів малої тривалості та малої енергії (до 4-5 Дж) [12, с. 19]. Ці розряди мають велику шпаруватість ( $q > 10$ ) та високу частоту (до  $1,5 \cdot 10^6$  кГц). Даний спосіб застосовується переважно для прецизійної обробки невеликих отворів в деталях радіоелектронної промисловості паливної апаратури [7, 13-17]. Електроіскрова обробка дозволяє отримати поверхні з високою точністю та малою шорсткістю [18], але така обробка має невелику продуктивність. Процес супроводжується значним зносом ЕІ, який суттєво скорочує технологічний діапазон електроіскрової обробки. Тому електроіскровий режим ефективний лише для виготовлення дрібних отворів. Ефективність ще збільшується, якщо матеріал деталі важко піддається традиційним методам механічної обробки або якщо оброблюваний отвір має

складну конфігурацію та якщо отвір має криволінійну вісь. Такі отвори характерні для приладобудування, точного машинобудування, інструментального виробництва.

Подальше збільшення ефективності обробки отворів пов'язано із зменшенням шпаруватості за рахунок генерування спеціальних імпульсів, які мають більшу енергію [19]. Такій спосіб отримав назву **електроімпульсної обробки** [20]. За рахунок підвищення енергії розряду, продуктивність електроімпульсної обробки перебільшує аналогічний показник електроіскрової обробки в 15...20 разів [13, с. 27]. Збільшення тривалості імпульсів при низькій шпаруватості ( $1 < q < 10$ ) приводить до різкого зниження зносу електрода-інструмента [21]. На відміну від електроіскрової обробки отворів тут засто-совується зворотна полярність: анод – інструмент, катод – заготовка. Для реалізації електроімпульсної обробки отворів використовуються відносно складні та багато коштовні джерела живлення: машинні, магнітонасичені або тиристорні генератори низьких та середніх частот (для попередньої обробки); електронно-напівпровідникові індукторні, широкодіапазонні транзисторні генератори підвищених та високих частот (для чистової обробки). Потужність генераторів досягає декілька десятків кіловат і більше [22]. Збільшення потужності імпульсних джерел живлення, підвищення сили технологічного струму (з метою підвищення продуктивності обробки), пов'язане з суттєвими технічними складностями. Крім того, із збільшенням сили технологічного струму зростає шорсткість обробленої поверхні, яка в кінцевому випадку обмежує подальше підвищення продуктивності. Так, за даними роботи [23] найбільша продуктивність прошивання отворів при електроімпульсній обробці прямокутними імпульсами з використанням електрода-інструмента із вуглеграфітових матеріалів в діапазоні діаметрів 35...138 мм при силі струму від 45 А до 250 А, досягає 660...2380 мм<sup>3</sup>/хв., а питома продуктивність – 9,%... 15,6 мм<sup>3</sup>/А·хв. При цьому на всіх режимах обробки шорсткість обробленої поверхні – поза класом. Спроби зменшення часу

електроімпульсної обробки при зберіганні високої якості обробленої поверхні було зроблено колективом авторів в роботах [24-26].

Подальше збільшення продуктивності електроерозійної обробки отворів пов'язано з використанням дугових форм електричного розряду [27]. Відомо, що продуктивність процесу електроерозійної обробки в залежності від форми електричного розряду збільшується у напрямку «електроіскрова форма» → «електроімпульсна форма» → «електродугова форма» за рахунок зменшення шпаруватості з 10...20 до 1.

Одним із прогресивних способів електроерозійної обробки отворів, що використовує дугову форму розряду, є **електроконтактна обробка**. Вона заснована на електроерозійному руйнуванні електрода-заготовки під дією електродугових розрядів між нею та електродом-інструментом, що обертається. При обробці отворів розряди горять в діелектричній рідині, яку, як правило, нагнітають у міжелектродний зазор крізь технологічний отвір в круглому електроді-інструменті (пряме прокачування), або в герметичну камеру навколо електрода-інструмента (зворотне прокачування). Однією із головних переваг даного способу є можливість введення в зону обробки відносно простими засобами великої потужності технологічного струму, і за рахунок цього суттєвого підвищення продуктивності обробки. Так, за даними робіт [28, 29] при використанні сили технологічного струму до 1000 А обробка отворів в діапазоні  $D = 35...40$  мм може здійснюватися з продуктивністю до 24 000 мм<sup>3</sup>/хв. Однак шорсткість обробленої поверхні лежить поза класом. Це пояснюється тим, що при електроконтактній обробці використовується не інтенсивне (маловитратне) прокачування робочої рідини крізь МЕЗ, що приводить до слабкої взаємодії гідродинамічного потоку з дугою. Мало стиснута дуга характеризується підвищеною довжиною стовпа: міжелектродний зазор в даному випадку складає 1,5...2 мм, що негативно впливає на точність обробки. Крім того, технологічні можливості електроконтактної обробки отворів за формою поперечного перерізу суттєво

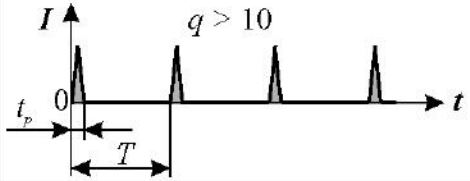
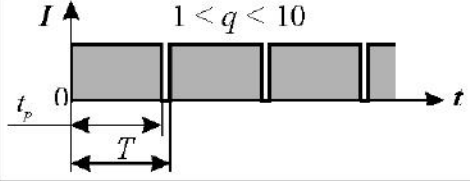
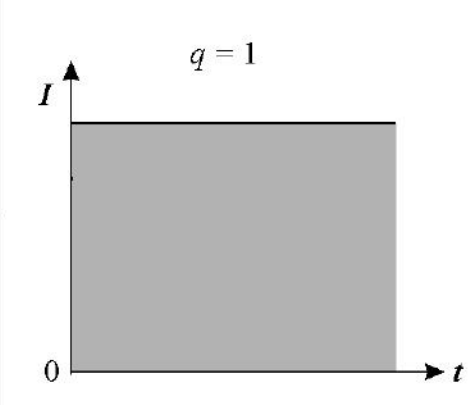
обмежені кінематичною схемою формоутворення: отримання отворів не круглої форми даним способом неможливо.

Певний науковий та практичний інтерес стосовно обробки отворів являє собою високопродуктивний спосіб розмірної обробки металів електричною дугою, який відомий за роботами [1-4] Носуленка В. І. – автора методу та отримав подальший розвиток у роботах [30, 31] Бокова В. М.

## 1.2 Про технологічні можливості процесу РОД отворів

Сутність процесу РОД полягає в тому, що обробку здійснюють стаціонарною електричною дугою, яка горить між електродом-інструментом та електродом-заготовкою в потоці робочої рідини при динамічному тиску не менш 1...2 кПа.

Таблиця 1.1 – Відмінні особливості способів електроерозійної обробки отворів

Способи обробки отворів, (інструмент)	Кінематична та гідродинамічна характеристика процесу	Форма перерізу отвору, що обробляється	Графічна залежність $I = f(t)$ . Характеристика шпаруватості
ЕІсО (іскра)	- поступальний рух ЕІ; - ЕЗ нерухома; - рідина нерухома	Будь-яка	
ЕІмО (імпульс)	- поступальний рух ЕІ; - ЕЗ нерухома; - рідина нерухома	Будь-яка	
ЕКО (дуга)	- обертальний та поступальний рух ЕІ; - ЕЗ нерухома; - рідина мало-рухома	Тільки кругла	
РОД (дуга)	- поступальний рух ЕІ; - ЕЗ нерухома; - рідина прокачується під тиском	Будь-яка	

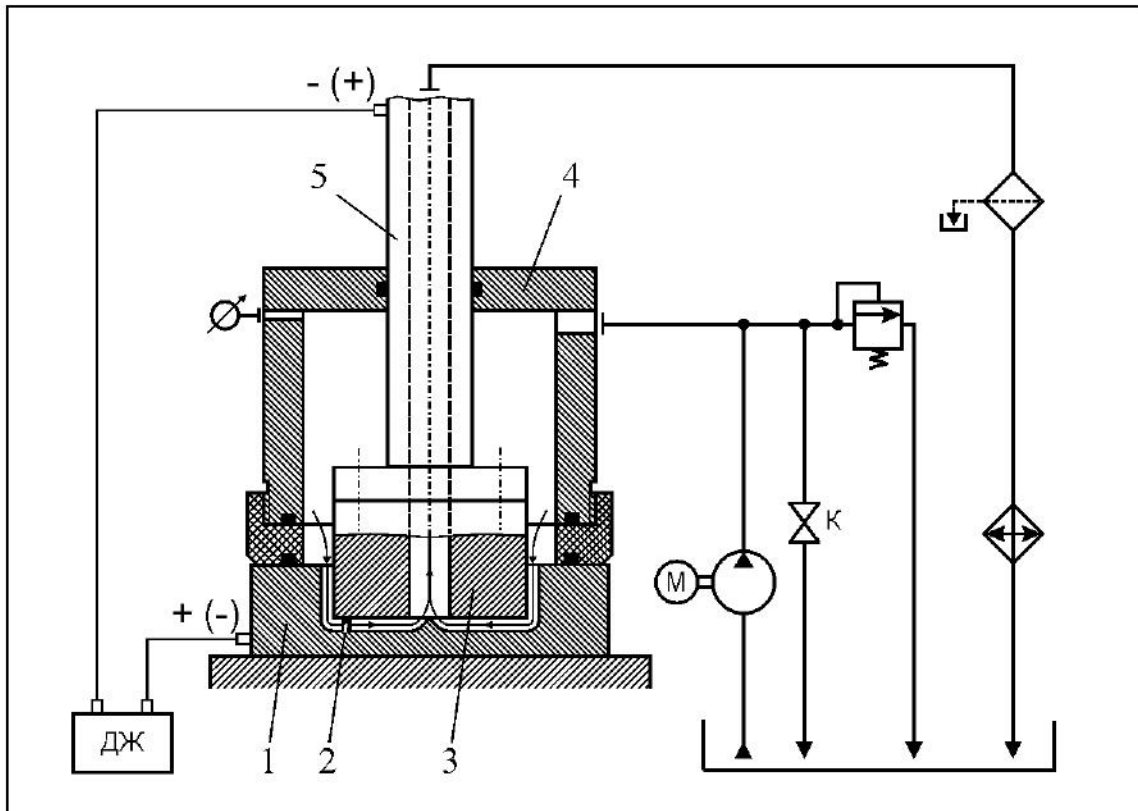
У порівнянні з електроімпульсною обробкою, спосіб РОД дозволяє збільшити продуктивність обробки приблизно на порядок і більше, зменшити приблизно в два рази питому витрату електроенергії та в 3...5 разів знизити вартість джерел живлення технологічним струмом [2]. Інші відмінні особливості та переваги способу РОД над відомими способами обробки отворів демонструє таблиця 1.1.

При обробці отворів способом РОД звичайно використовують електричну дугу в поперечному потоці робочої рідини (на рисунку 1.1) Рідина нагнітається в торцевий міжелектродний зазор за напрямком від периферії до центру ЕІ, а вилучається із нього разом з продуктами ерозії крізь центральний отвір (канал) в ЕІ. Для забезпечення даного способу прокачування, який отримав назву зворотного, робоча зона верстата для РОД отворів постачається герметичною камерою, яка локалізує зону підвищеного тиску рідини на вході потоку в між-електродний проміжок. Останнє дозволяє уникнути застосування великогабаритної ванни з робочою рідиною, якою постачаються відомі електроімпульсні верстати. Слід відмітити особливу роль потоку робочої рідини при формоутворенні отворів способом РОД:

- результатом взаємодії потоку робочої рідини з електричною дугою є зміна її енергетичних та геометричних параметрів. Так, із підвищенням швидкості потоку густина струму  $j$  та напруженість електричного поля в стовпі дуги  $E$  підвищуються [2] і досягають рівня  $j = 50 \text{ кА/см}^2$ ,  $E = 3 \text{ кВ/см}$  і більше, а площа поперечного перерізу  $S = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ ,  $L = 0,05 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Це дозволяє використовувати таку дугу для достатньо точної розмірної обробки отворів;

- із підвищенням швидкості потоку інтенсифікується процес вилучення продуктів ерозії із МЕЗ. Це дає можливість підтримувати рівновагу між кількістю часток продуктів ерозії, що поступають в міжелектродний зазор в процесі обробки, та кількістю часток, які вилучаються із нього при

інтенсифікації процесу РОД отворів за рахунок підвищення сили технологічного струму.



1 – ЕІ; 2 – електрична дуга; 3 – ЕІ; 4 – герметична камера; 5 – шпиндель

Рисунок 1.1 – Принципова схема процесу РОД

Технологічні характеристики процесу РОД були об'єктом дослідження роботи [32], де наводяться деякі наступні математичні двофакторні моделі щодо обробки сталі 5ХНТ в функції сили струму  $I$  та динамічного тиску потоку  $P_{\partial}$ , при використанні в якості робочої рідини органічного середовища, при застосуванні ЕІ із графіту марки МПГ-7, при силі технологічного струму  $I = 100 \dots 1000$  А і динамічному тиску  $P_{\partial} = 0,01 \dots 0,5$  МПа та зворотній полярності електродів:

- модель продуктивності обробки,  $\text{мм}^3/\text{хв}$ .

$$M = 47,62 \cdot I^{0,95} \cdot P_{\partial}^{-0,09}; \quad (1.1)$$

- модель питомої витрати електроенергії, кДж/м<sup>3</sup>

$$a = 27,08 \cdot I^{-0,02} \cdot P_{\partial}^{0,18}; \quad (1.2)$$

- модель шорсткості обробленої поверхні, мкм

$$Ra = 2323 \cdot I^{0,17} \cdot P_{\partial}^{-0,55}; \quad (1.3)$$

- модель глибини зони термічного впливу, мкм

$$H = 99,4 \cdot 10^6 \cdot I^{0,28} \cdot P_{\partial}^{-1,49}. \quad (1.4)$$

Як бачимо, практично усі технологічні характеристики процесу РОД залежать від гідродинамічного фактору – динамічного тиску потоку  $P_{\partial}$  в зоні обробки.

Слід відмітити, що дані моделі не враховують такий змінний фактор, як напруга  $U$  на електродах, хоча для деяких технологічних характеристик вплив напруги може бути суттєвим.

В роботі [33] наводиться класифікація отворів за геометричними параметрами (на рисунку 1.2), в основу якої покладено такі класифікаційні ознаки, як:

- глибина отвору  $H$ ;
- форма поперечного перерізу;
- форма поздовжнього перерізу;
- поперечний розмір  $D$ ;
- форма осі.

Дана класифікація дозволяє систематизувати отвори не тільки за геометричною формою, але й за однаковими технологічними умовами їх обробки.

Звернемо увагу на малі отвори, які за поперечним розміром  $D \leq 5$  мм. Найменший діаметр отвору, що отриманий способом РОД, до теперішньої роботи дорівнював три міліметра. Обробка здійснювалася з використанням графітового електрода-інструмента, що пов'язано із забезпеченням його малого лінійного зносу. Виготовити трубчатий графітовий електрод-інструмент меншого діаметру практично не можливо, так як в процесі обробки на електрод-інструмент діють сили різання, які перевищують його механічну міцність. Отже виникає проблема обробки електричною дугою малих отворів, діаметр яких менше трьох міліметрів.

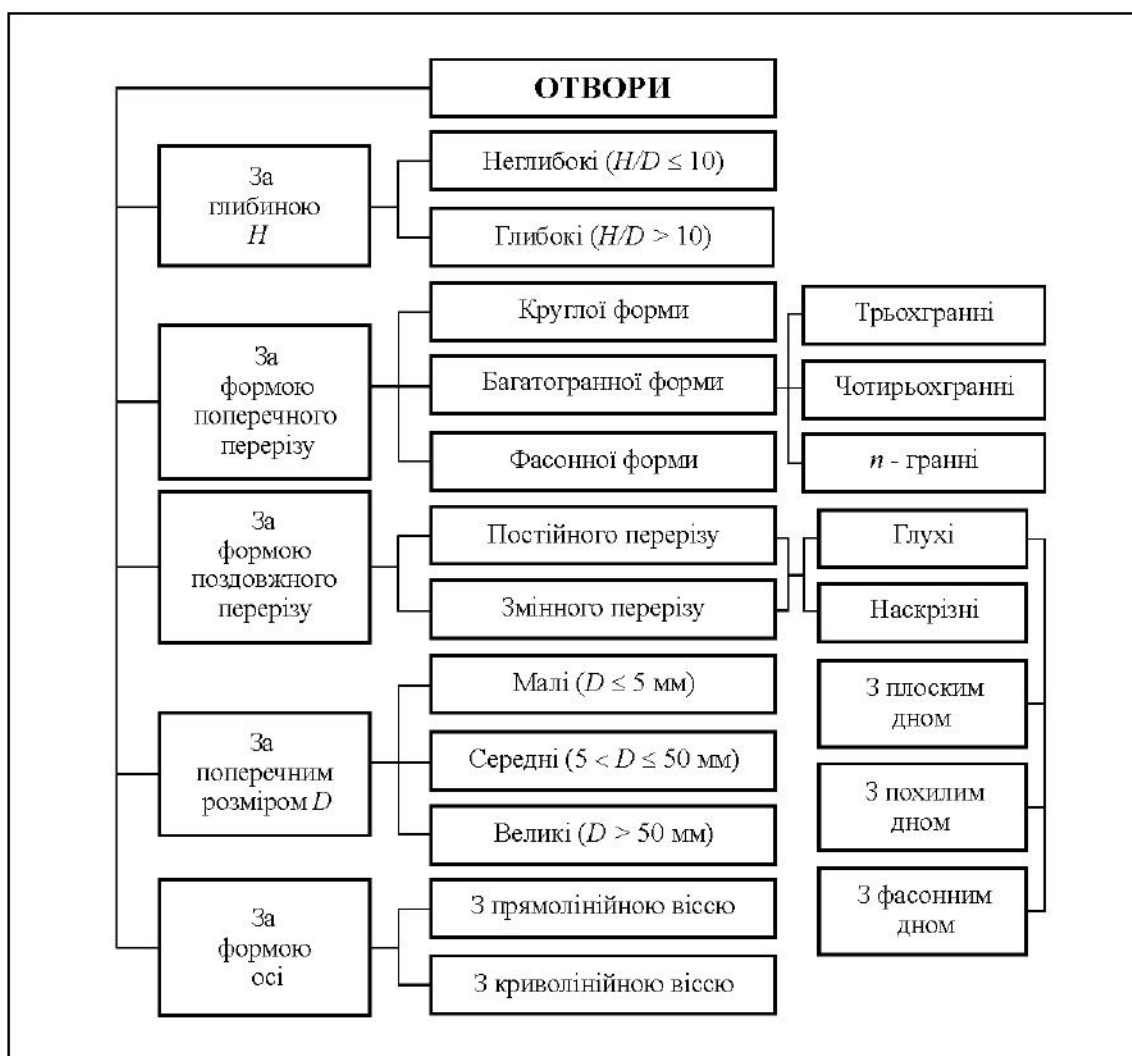


Рисунок 1.2 – Класифікація отворів за геометричними параметрами

### **1.3 Узагальнення результатів огляду способів обробки отворів та обґрунтування напрямку дослідження**

Із огляду сучасних способів електроерозійної обробки отворів витікає наступне:

- одним із самих високопродуктивних, а тому перспективних способів електроерозійної обробки отворів, є спосіб РОД, який порівняно з електроімпульсною обробкою, що широко поширена у світі, дозволяє на порядок і більше підвищити продуктивність обробки, зменшити приблизно в два рази питомі витрати електроенергії та в 3...5 разів знизити вартість джерел живлення теологічним струмом;

- отримані до даної роботи двофакторні математичні моделі технологічних характеристик процесу РОД не відбивають вплив напруги на електродах, а тому не можуть бути використані для прогнозування та обґрунтування вибору режиму обробки, зокрема для забезпечення мінімального зносу електрода-інструмента;

- відсутні практичні рекомендації щодо обробки електричною дугою отворів, діаметром менше трьох міліметрів.

Певний науковий інтерес представляє можливість РОД малих отворів металевими електродами-інструментами, зокрема мідними. За даними роботи [23, с. 25] при використанні в електроімпульсній обробці мідних електродів-інструментів з гребінчастими імпульсами лінійний відносний знос не перевищує 0,1...0,2 %. В той же час разові експерименти щодо застосування мідних електродів-інструментів для РОД отворів на випадковому режимі показали знос на рівні 30 %.

На підставі викладеного вище головним напрямком дослідження є прогнозування технологічних характеристик та підвищення ефективності процесу РОД отворів мідними електродами-інструментами.

Поставлена мета реалізується шляхом вирішення наступних задач:

- обґрунтування технологічної схеми формоутворення отвору способом РОД;

- розробка та аналіз математичних моделей, що обумовлюють технологічні характеристики точності, якості та продуктивності процесу РОД отворів мідним ЕІ;

- аналіз технологічної схеми формоутворення та інтенсифікація процесу РОД малого отвору мідним ЕІ.

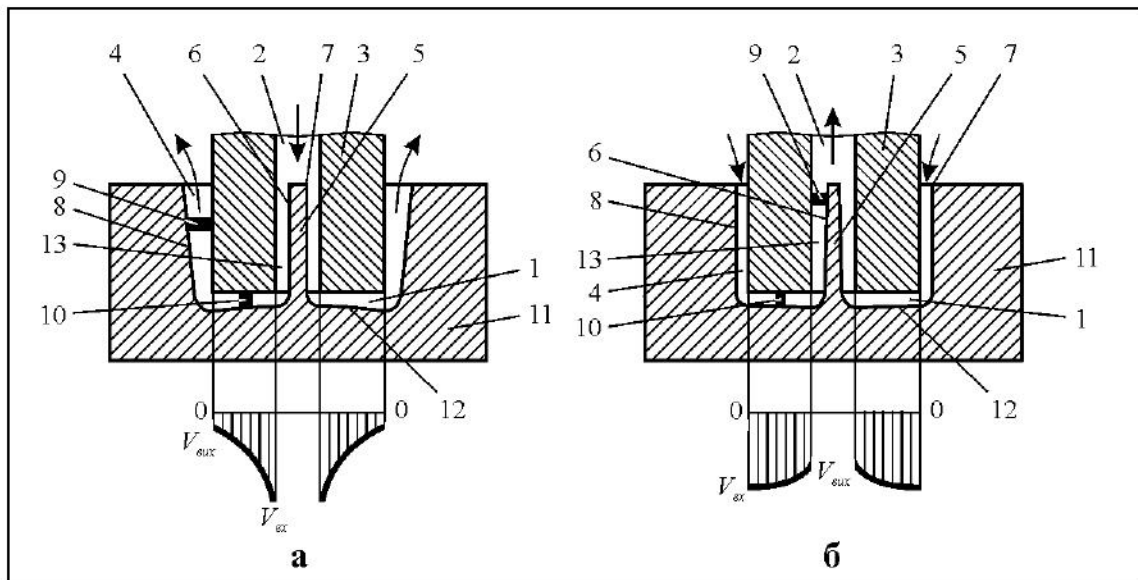
## МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Обґрунтування технологічної схеми формоутворення отвору способом РОД

В роботі [30] показано, що технологічна схема формоутворення поверхні способом РОД включає в себе такі елементи, як відносний рух електрода-інструмента, відносний рух електрода-заготовки та спосіб прокачування робочої рідини крізь торцевий міжелектродний зазор. Розрізняють два основні способи прокачування робочої рідини крізь торцевий міжелектродний зазор. Це способи прямого та зворотного прокачування.

При прямому прокачуванні (на рисунку 2.1, а) робоча рідина нагнітається в торцевий міжелектродний зазор 1 під технологічним тиском крізь технологічний канал 2 (отвір) в електроді-інструменті 3, рухається в ньому за напрямком від центру до периферії електрода-інструмента, а вилучається із нього разом з продуктами ерозії крізь зовнішній бічний міжелектродний зазор 4. При використанні даного способу прокачування для обробки отворів утворюється технологічний виступ 5, якій відповідає геометричним параметрам та формі технологічного каналу 2 в електроді-інструменті. Спостерігається підвищена якість та точність формування бічної поверхні виступу 6 та утворення на ньому гострої кромки 7. В той же час якість і точність бічної поверхні отвору 8, яка є об'єктом обробки, незадовільні та відрізняються підвищеною шорсткістю даної поверхні і утворенням конусності. Останнє пояснюється горінням в бічному зовнішньому міжелектродному зазорі 4 електричної дуги 9 підвищеної довжини та з низькими енергетичними параметрами, що утворюється за рахунок вторинного диспергування продуктів ерозії в даному зазорі при низької

При прямому прокачуванні (на рисунку 2.1, а) робоча рідина нагнітається в торцевий міжелектродний зазор 1 під технологічним тиском крізь технологічний канал 2 (отвір) в електроді-інструменті 3, рухається в ньому за напрямком від центру до периферії електрода-інструмента, а вилучається із нього разом з продуктами ерозії крізь зовнішній бічний міжелектродний зазор 4. При використанні даного способу прокачування для обробки отворів утворюється технологічний виступ 5, якій відповідає геометричним параметрам та формі технологічного каналу 2 в електроді-інструменті.



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

Рисунок 2.1 – Технологічні схеми формоутворення отворів з використанням прямого (а) та зворотнього (б) способів прокачування робочої рідини крізь торцевий МЕЗ

Спостерігається підвищена якість та точність формування бічної поверхні виступу 6 та утворення на ньому гострої кромки 7. В той же час

якість і точність бічної поверхні отвору 8, яка є об'єктом обробки, незадовільні та відрізняються підвищеною шорсткістю даної поверхні і утворенням конусності. Останнє пояснюється горінням в бічному зовнішньому міжелектродному зазорі 4 електричної дуги 9 підвищеної довжини та з низькими енергетичними параметрами, що утворюється за рахунок вторинного диспергування продуктів ерозії в даному зазорі при низькій швидкості потоку. Тому даний спосіб прокачування не доцільно використовувати для обробки отворів.

При зворотному прокачуванні (на рисунку 2.2, б) робоча рідина нагнітається в торцевий міжелектродний зазор 1 під технологічним тиском крізь зовнішній бічний міжелектродний зазор 4, а вилучається із нього крізь внутрішній бічний міжелектродний зазор 13 разом з продуктами ерозії. Оскільки при ідеально організованому процесі електричні дуги 9, 10 горять тільки в торцевому та внутрішньому бічному МЕЗ, в зовнішньому бічному МЕЗ тече чиста робоча рідина (без продуктів ерозії). Саме тому спостерігаються задовільні якість і точність формоутворення зовнішньої бічної поверхні отвору 8, а на вході в бічний зовнішній МЕЗ 4 на електроді-заготовці 11 утворюється гостра кромка 7. При цьому спостерігається відносна низька якість та точність формоутворення стрижневого виступу 5, але при наскрізній обробці отворів останнє не має значення.

Таким чином, для обробки отворів способом РОД доцільно використовувати технологічну схему формоутворення, яка включає в себе поступальний зустрічний взаємний рух електродів та спосіб зворотного прокачування робочої рідини крізь торцевий міжелектродний зазор.

## **2.2 Методика математичного моделювання технологічних характеристик процесу РОД отворів мідним ЕІ**

### **2.2.1 Прийняття рішень перед плануванням експерименту [34].**

Моделювання процесу розмірного прошивання отворів електричною дугою з

використанням мідного електрода-інструмента здійснювали циліндричними ЕІ при зворотному прокачуванні робочої рідини крізь торцевий міжелектродний зазор (на рисунку 2.1, б).

На підставі апріорної інформації було вибрано три фактора, які повинні впливати на технологічні характеристики процесу РОД отворів мідним електродом-інструментом:

- сила технологічного струму  $I (X_1)$ , А;
- напруга на електродах  $U (X_2)$ , В;
- статичний тиск робочої рідини на вході в міжелектродний зазор  $P_{cm} (X_3)$ , МПа.

Усі вибрані фактори задовольняють умовам керованості, операціональності та однозначності.

Інші параметри процесу були зафіксовані на постійних рівнях.

Так, для встановлення оптимальної полярності обробки попередньо виконали порівнювальний експеримент. Мідним електродом діаметром 20 мм обробили два отвори відповідно на прямій та зворотній полярності в умовах однакового режиму обробки ( $I = 100$  А;  $U = 35$  В;  $P_{cm} = 1,4$  МПа). Відносний лінійний знос мідного електрода-інструмента на прямій полярності склав 13 %, а на зворотній – 76 %. Саме тому прийняли пряму полярність обробки ЕЗ із сталі ЖС6К мідним ЕІ.

В якості робочої рідини використовувалося органічне середовище наступного складу:

- масло «Індустріальне І-20А» ГОСТ 20790-75 – 50 %;
- гас освітлювальний ГОСТ 4953-68 – 50 %.

Після експерименту розраховувалися або вимірювалися такі технологічні характеристики процесу РОД мідним електродом-інструментом, як:

- відносний лінійний знос мідного ЕІ  $\gamma_l$ , %;
- бічний міжелектродний зазор  $\delta_b$ , мм;
- шорсткість обробленої поверхні  $Ra$ , мкм;

- продуктивність обробки  $M$ , мм<sup>3</sup>/хв.;
- питома продуктивність обробки  $M_a$ , мм<sup>3</sup>/А·хв.;
- питома витрата електроенергії  $a$ , кВт·год/кг.

**2.2.2 Побудова матриці планування експерименту.** Значення факторів на основному, верхньому та нижньому рівнях, а також інтервали варіювання наведено в таблиці 2.1.

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

Таблиця 2.1 – Матриця планування експерименту (план 2<sup>3</sup>)

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

$$x_1 = \frac{X_1 - 75}{25}; \quad (2.1)$$

$$x_2 = \frac{X_2 - 30}{5}; \quad (2.2)$$

$$x_3 = \frac{X_3 - 1}{0,4}. \quad (2.3)$$

Повний факторний експеримент для трьох факторів ( $k$ ) і двох рівнів ( $P$ ) повинен включати в себе таку кількість дослідів:

$$N = P^k = 2^3 = 8.$$

Задача зводиться до будівництва лінійної математичної моделі вигляду

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i, \quad (2.4)$$

де  $b_0, b_i$  - коефіцієнти регресії моделі.

Відповідно до вибраного плану ( $2^3$ ) було проведено 8 дослідів, причому кожний дослід виконувався тільки один раз. Крім того, для оцінки дисперсії провели чотири дослідів в центрі плану.

### 2.2.3. Послідовність побудови математичної моделі:

- розраховуємо дисперсію дослідів за формулою [35, с. 13]

$$S_y^2 = \frac{\sum \left( y_{0q} - \bar{y}_0 \right)^2}{f_1}, \quad (2.5)$$

де  $y_{0q}$  - результат  $q$ -го дубля (повтору) дослідів у центрі плану;

$\bar{y}_0$  - середнє арифметичне значення усіх  $n_0$  дублів центрального дослідів;

$f_1$  - число ступенів свободи

$$f_1 = n_0 - 1 = 4 - 1 = 3. \quad (2.6)$$

- розраховуємо коефіцієнти регресії моделі за формулою [35, с. 14]

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} Y_u}{N}, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (2.7)$$

де  $N$  – число дослідів.  $N = 8$ ;

- перевіряємо статистичну значимість коефіцієнтів регресії. Перевірка містить розрахунок дисперсії оцінок, який виконуємо з використанням формули [35, с. 14]

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{N}, \quad (2.8)$$

відповідно середньо квадратична помилка  $S_{b_i} = \sqrt{S_{b_i}^2}$ .

За рівнем значимості  $\alpha = 0,05$  та числом ступенів свободи  $f_1 = 3$ , табличне значення  $t$ -критерія Стьюдента  $t_{0,05;3} = 3,18$ .

Довірчий інтервал коефіцієнтів регресії буде

$$\Delta b_i = t_{\alpha, f} S_{b_i}. \quad (2.9)$$

Ті коефіцієнти регресії, для яких виконується вимога  $|b_i| \geq \Delta b_i$ , слід признати статистично значимими;

- будемо рівняння регресії (математичну модель), яке набуває вигляду:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3; \quad (2.10)$$

- перевіряємо гіпотезу про адекватність моделі за  $t$ -критерієм Стьюдента [35, с. 15]

$$t^{розр} = \frac{|b_0 - \bar{y}_0| \sqrt{N}}{S_y}. \quad (2.11)$$

Якщо  $t^{розр} \leq t_{\alpha, f}^{табл} = 3,18$ , гіпотеза про адекватність моделі не відхиляється.

## 2.3 Експериментальне обладнання та оснащення

**2.3.1 Експериментальний верстат.** Для дослідження техноло-гічних характеристик процесу РОД отворів мідним ЕІ використовувався експериментальний електроерозійний копіювально-прошивний верстат моделі «Дуга-8Г» [31] (на рисунку 2.2).

Універсальний двостояковий електроерозійний верстат «Дуга-8Г» призначено для РОД отворів, стержнів та порівняно дрібних фасонних порожнин, габаритні розміри яких у плані вписуються в коло діаметром 150 мм. Типовими представниками обробки є деталі, які виготовляються з важкооброблюваних матеріалів, зокрема, із загартованої сталі.

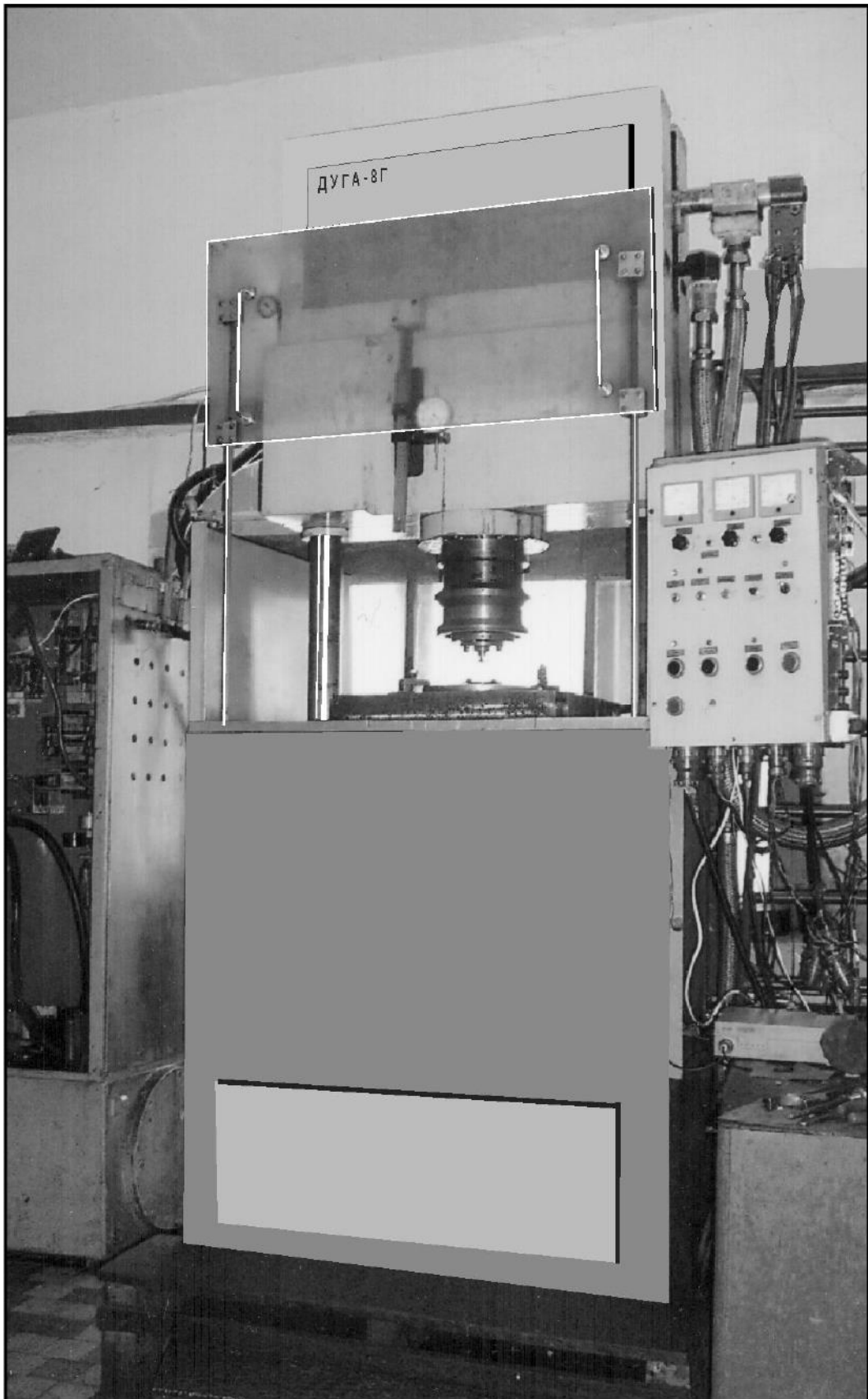
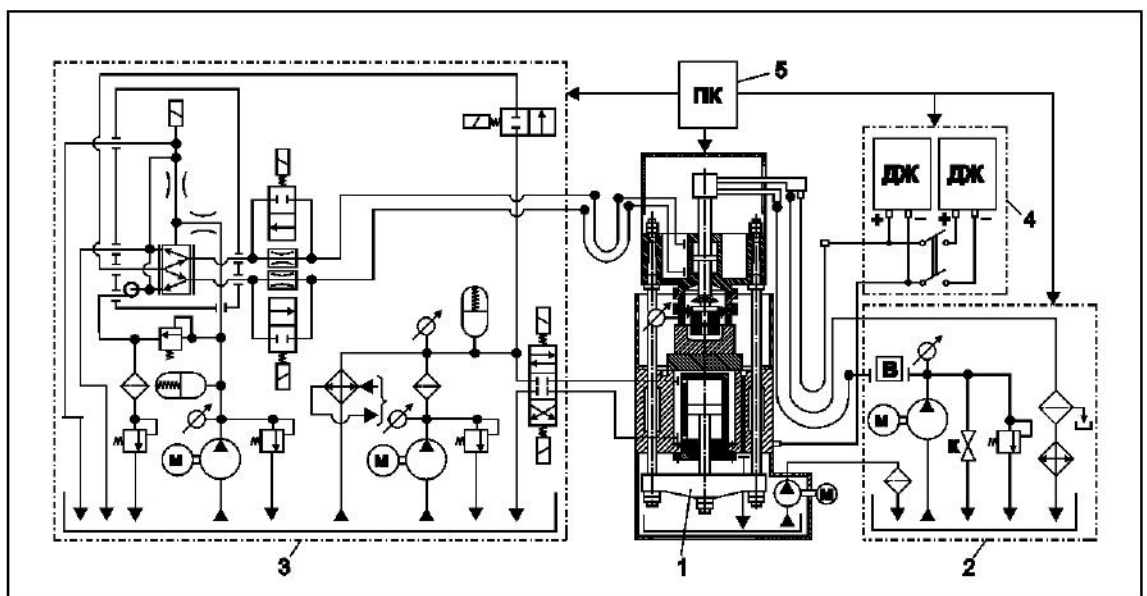


Рисунок 2.2 – Экспериментальный электроэрозионный верста «Дуга-8Г»

Верстат «Дуга-8Г» являє собою установку (на рисунку 2.3), що включає в себе:

- власне, верстат 1, інструментальну головку якого виконано у вигляді жорсткої замкнутої рами із силовим замиканням за допомогою гідроциліндра;
- станцію робочої рідини 2, що забезпечує пряме, зворотне та бічне прокачування органічного середовища під технологічним тиском крізь міжелектродний зазор;
- станцію гідроприводу 3 для живлення гідроциліндрів електрогідравлічного приводу подачі електрода-інструмента та переміщення інструментальної головки;
- джерело живлення технологічним струмом 4 – два зварювальних випрямляча ВДУ-504;
- пульт електрокерування верстатом.



1 – верстат; 2 – станція робочої рідини; 3 – станція гідроприводу; 4 – джерела живлення технологічним струмом ; 5 –пульт керування

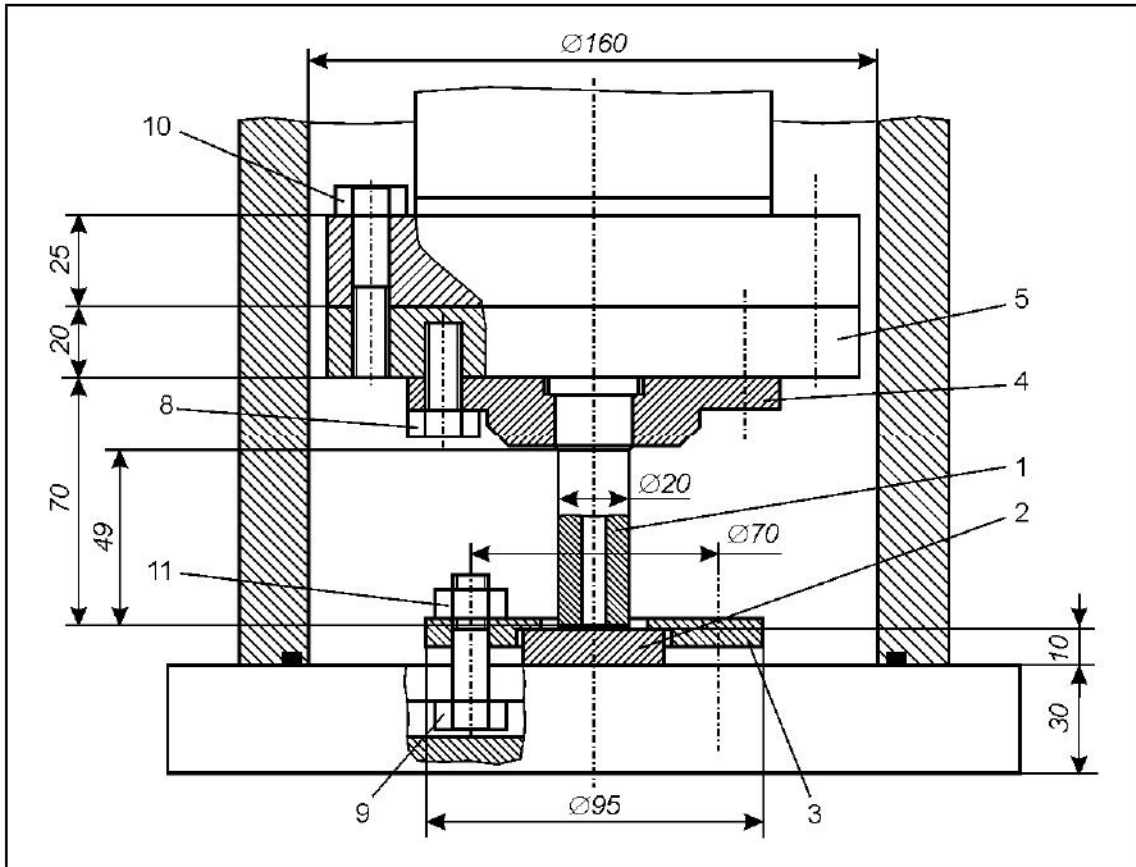
Рисунок 2.3 – Електрогідрокинематична схема експериментального копіювально-прошивного верстата моделі «Дуга 8Г»

Основні дані верстата «Дуга-8Г»

Розміри стола (довжина x ширина), мм .....	400 x 300
Найбільша маса ЕІ, кг .....	35
Найбільша маса заготовки, кг .....	100
Найбільший розмір оброблюваної порожнини в плані, мм .....	150
Найбільша відстань від торцевої поверхні електродотримача до робочої поверхні стола, мм .....	325
Робочий хід шпинделя, мм .....	200
Установочне переміщення інструментальної головки, мм .....	300
Робоча рідина, %:	
- масло індустріальне І-20А ГОСТ 20790-75 .....	70
- гас освітлювальний ГОСТ 4953-68 .....	30
Об'єм робочої рідини, що заливається в бак, л .....	800
Привод слідкуючої подачі шпинделя .....	електрогідравлічний
Межі регулювання струму, А .....	50-1000
Межі регулювання напруги, В .....	24 – 45
Найбільша продуктивність при використанні вуглеграфітового електрода-інструмента, мм <sup>3</sup> /хв:	
- по сталі 45 .....	22 000
- по титановому сплаву ВТ3-1 .....	30 000
Найменша шорсткість поверхні після РОД по ГОСТ 2789-73, Ra, мкм .....	3,2
Габарит верстата (довжина x ширина x висота), мм .	1000 x 1000 x 2740
Маса верстата, кг .....	2100

**2.3.2 Експериментальний пристрій.** Для дослідження технологічних характеристик процесу РОД отворів мідним електродом-інструментом спроектовано (див. додатки Д1, Д2) та виготовлено оригінальний

експериментальний пристрій до електро-ерозійного верстата «Дуга-8Г» ( на рисунку 2.4).



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

Рисунок 2.4 – Експериментальний пристрій № 1

Пристрій включає в себе наступні основні деталі:

- мідний електрод-інструмент 1 діаметром 20 мм, який закріплюється в електродотримачі 4 за допомогою буртику;
- електрод-заготовка 2, що виконана із сталі 45, яка закріплюється на плиті стола за допомогою притискача 3.

Пристрій працює таким чином. Перед початком роботи електрод-інструмент 1 та електрод-інструмент 3 закріплюють у пристрої так, як показано на рис. 2.4. за допомогою болтів 8, 9 та гайок 11. Болтове з'єднання

забезпечує надійний електричний контакт електродів із струмонесучими частинами верстату. Далі закривають герметичну камеру, вмикають електродвигун насосу робочої рідини, зварювальний випрямляч і ведуть процес РОД отвору мідним електродом-інструментом 1 в електроді-заготовці 3. Процес здійснюють з використанням показаної на рисунку 2.1, а технологічної схеми формоутворення. При цьому електрична дуга горить у міжелектрод-ному зазорі в потужному гідродинамічному потоці робочої рідини, який відповідальний за стиснення дуги та за вилучення продуктів ерозії з робочої зони пристрою та верстата, яке здійснюється через центральний отвір в електроді-інструменті 1. Результатом є глухі отвори, що отримані способом РОД мідним електродом-інструментом (на рисунку 2.5).

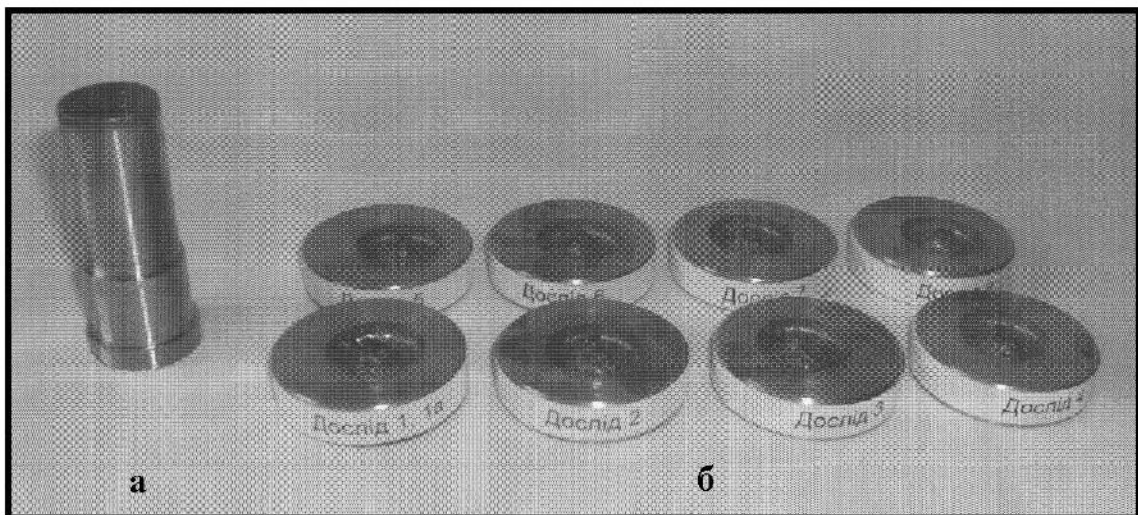


Рисунок 2.5 – Мідний електрод-інструмент (а) та сталеві електрод-заготовки (б) після РОД отвору діаметром 20 мм

В якості контрольно-вимірювальних приборів та інструмента застосовувалися:

- для керування силою струму: кілоамперметр типу М367;
- для контролю напруги: вольтметр типу М4200; осцилограф, що запам'ятовує типу С8-12;

- для керування статичним тиском робочої рідини на вході в міжелектродний зазор: манометр типу М1-2-2;
- для вимірювання часу обробки: секундомір із ціною поділки 0,05 с;
- для вимірювання геометричних параметрів електрода-інструмента та електрода-заготовки: мікрометр типу МК ГОСТ 6407-78 із ціною поділки 0,01 мм; штангенциркуль типу ШЦ-11 ГОСТ 166-80 із ціною поділки 0,05 мм;
- для вимірювання лінійного переміщення шпинделя подачі електрода-інструмента: індикатор годинникового типу ИЧ-25;
- для вимірювання шорсткості поверхні після РОД: еталони електроерозійної шорсткості;
- для точного зважування електродів-інструментів та електродів-заготовок до та після РОД: ваги типу ВЛКТ-500г-М ГОСТ 19491-74 із ціною поділки 0,01 г.

**МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ТОЧНОСТІ, ЯКОСТІ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ РОД  
ОТВОРІВ МІДНИМ ЕІ**

**3.1 Відносний лінійний знос мідного ЕІ**

Для побудови математичної моделі відносного лінійного зносу мідного ЕІ скористуємося методикою, що наведена підрозділі 2.2.

**Розрахунок дисперсії дослідів** здійснюємо за формулою (2.5). Дані для розрахунку вносимо в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Дані для розрахунку дисперсії дослідів

Номер дубля	$y_{0q}$	$\Delta y = \left( y_{0q} - \bar{y}_0 \right)$	$\Delta y^2$
1	18,5	0,925	0,8556
2	17,8	0,225	0,0506
3	16,5	1,075	1,1556
4	17,5	0,075	0,0056
	$\bar{y}_0 = 17,575$		$\sum \Delta y^2 = 2,0674$

Тоді

$$S_y^2 = \frac{2,0674}{3} = 0,6891$$

і відповідно

$$S_y = 0,8301.$$

**Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі** здійснювали за формулою (2.7):

$$b_0 = \frac{1}{8}(13 + 5 + 22 + 13 + 21 + 12 + 30 + 22) = 17,25;$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(13 - 5 + 22 - 13 + 21 - 12 + 30 - 22) = 4,25;$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(13 + 5 - 22 - 13 + 21 + 12 - 30 - 22) = -4,5;$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(13 + 5 + 22 + 13 - 21 - 12 - 30 - 22) = -4.$$

**Розрахунок дисперсії оцінок** здійснювали за формулою (2.8):

$$S_{b_i}^2 = \frac{0,6891}{8} = 0,0861,$$

відповідно середньо квадратична помилка

$$S_{b_i} = 0,293.$$

**Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії** здійснювали за формулою (2.9):

$$\Delta b_i = 3,18 \cdot 0,293 = 0,932.$$

У даному випадку для усіх коефіцієнтів регресії виконується вимога  $|b_i| \geq \Delta b_i$  тому їх слід визнати статистично значимими.

**Рівняння регресії**, або математична модель відносного лінійного зносу мідного електрода-інструмента набуде вигляду

$$y_1 = 17,25 + 4,25x_1 - 4,5x_2 - 4x_3. \quad (3.1)$$

**Перевірку гіпотези про адекватність математичної моделі** здійснювали за  $t$ -критерієм Стьюдента за формулою (2.11):

$$t^{позр} = \frac{|17,25 - 17,575| \sqrt{8}}{0,8301} = 1,107.$$

Оскільки  $1,107 < 3,18$ , гіпотеза про адекватність моделі не відхиляється.

**Аналіз моделі.** Ступінь впливу факторів на відносний лінійний знос мідного електрода-інструмента показано на рисунку 3.1.

Як бачимо, на відносний лінійний знос мідного електрода-інструмента  $\gamma_l$  одночасно та практично рівномірно впливають усі три фактора:

- напруга на електродах  $U$  – головний керуючий фактор: ступінь впливу – 35,3 %. Із підвищенням  $U$  знос зменшується;
- сила технологічного струму  $I$ : ступінь впливу – 33,3 %. Із підвищенням  $I$  знос збільшується;
- статичний тиск робочої рідини на вході потоку в міжелектродний зазор  $P_{ст}$ : ступінь впливу – 31,4 %. Із підвищенням  $P_{ст}$  знос зменшується.

Виявлений факт одночасного впливу трьох факторів на знос мідного електрода-інструмента дозволив розгадати загадку цього феномена та дав можливість прогнозувати малозносний процес РОД отворів мідним ЕІ (рис. 3.2).

В умовах експерименту відносний лінійний знос мідного ЕІ змінювався у межах від 4,88 % до 31,6 %.

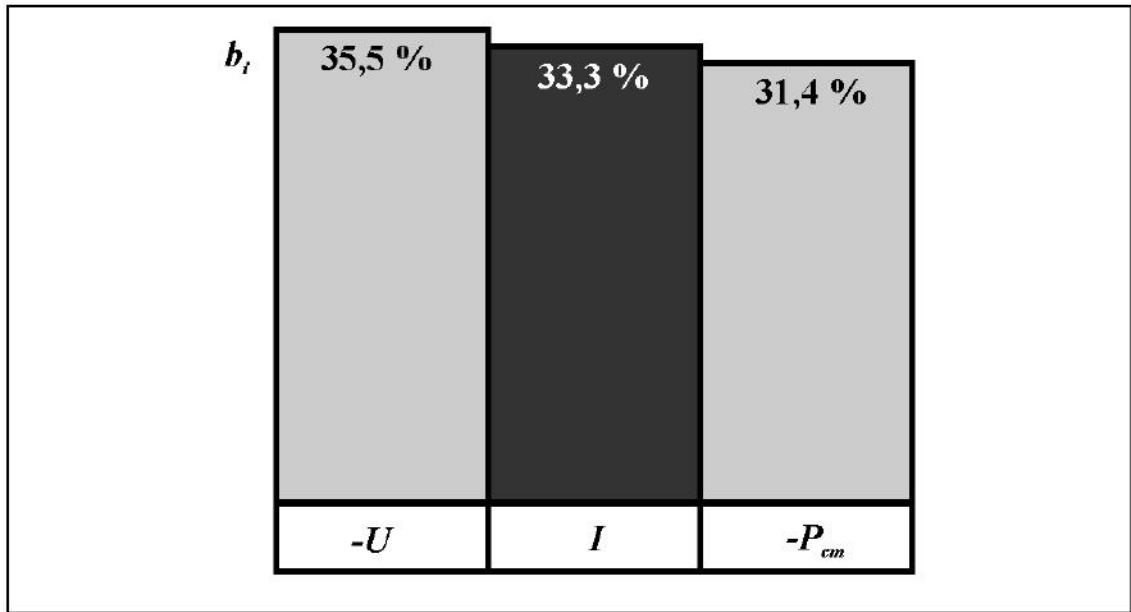
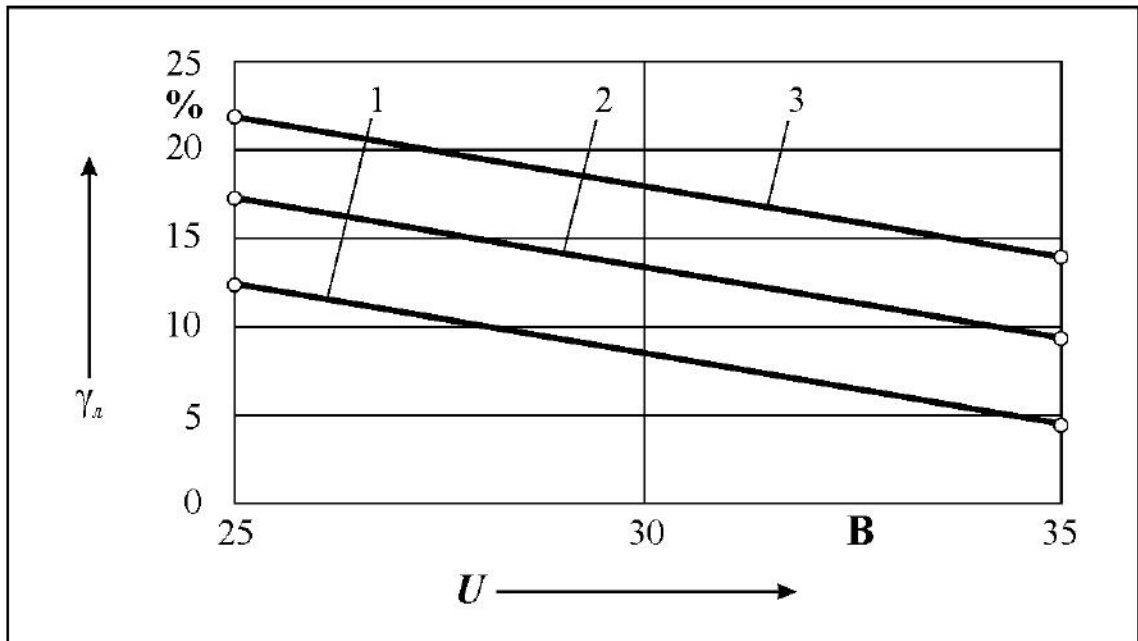


Рисунок 3.1 – Ступінь впливу факторів на відносний лінійний знос мідного електрода-інструмента



1 –  $I = 50$  А; 2 –  $I = 75$  А; 3 –  $I = 100$  А

Рисунок 3.2 – Залежність відносного лінійного зносу мідного ЕІ  $\gamma_a$  від  $U$  та  $I$  ( $P_{cm} = 1,4$  МПа)

### 3.2 Бічний міжелектродний зазор

**Розрахунок дисперсії дослідів** здійснюємо за формулою (2.5).

Дані для розрахунку вносимо в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Дані для розрахунку дисперсії дослідів

Номер дубля	$y_{0q}$	$\Delta y = \left( y_{0q} - \bar{y}_0 \right)$	$\Delta y^2$
1	0,07	0,005	0,000025
2	0,07	0,005	0,000025
3	0,06	0,005	0,000025
4	0,06	0,005	0,000025
	$\bar{y}_0 = 0,065$		$\sum \Delta y^2 = 0,0001$

Тоді

$$S_y^2 = \frac{0,001}{3} = 0,0000333$$

і відповідно

$$S_y = 0,00577.$$

**Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі** здійснювали за формулою (2.7):

$$b_0 = \frac{1}{8}(0,075 + 0,06 + 0,075 + 0,05 + 0,1 + 0,06 + 0,06 + 0,06) = 0,0675;$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(0,075 - 0,06 + 0,075 - 0,05 + 0,1 - 0,06 + 0,06 - 0,06) = 0,01;$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(0,075 + 0,06 - 0,075 - 0,05 + 0,1 + 0,06 - 0,06 - 0,06) = 0,00625;$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(0,075 + 0,06 + 0,075 + 0,05 - 0,1 - 0,06 - 0,06 - 0,06) = -0,0025.$$

**Розрахунок дисперсії оцінок** здійснювали за формулою (2.8):

$$S_{b_i}^2 = \frac{0,0000333}{8} = 0,0000041,$$

відповідно середньо квадратична помилка

$$S_{b_i} = 0,00202.$$

**Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії** здійснювали за формулою (2.9):

$$\Delta b_i = 3,18 \cdot 0,00202 = 0,0064.$$

У даному випадку для коефіцієнтів регресії  $b_2$  та  $b_3$  не виконується вимога  $|b_i| \geq \Delta b_i$  тому їх слід визнати статистично не значимими.

**Рівняння регресії**, або математична модель бічного міжелектродного зазору набуде вигляду

$$y_2 = 0,0675 + 0,01x_1. \quad (3.2)$$

**Перевірку гіпотези про адекватність математичної моделі** здійснювали за  $t$ -критерієм Стьюдента за формулою (2.11):

$$t^{pozp} = \frac{|0,0675 - 0,065| \sqrt{8}}{0,00577} = 1,23.$$

Оскільки  $1,107 < 3,18$ , гіпотеза про адекватність моделі не відхиляється.

**Аналіз моделі.** Ступінь впливу факторів на бічний міжелектродний зазор показано на рисунку 3.3.

Як бачимо, бічний міжелектродний зазор повністю визначається лише одним фактором – силою технологічного струму  $I$ . Саме тому  $I$  є головним керуючим фактором. Із підвищенням сили струму зазор збільшується.

В умовах експерименту бічний міжелектродний зазор змінювався у межах від 0,05 мм до 0,10мм.

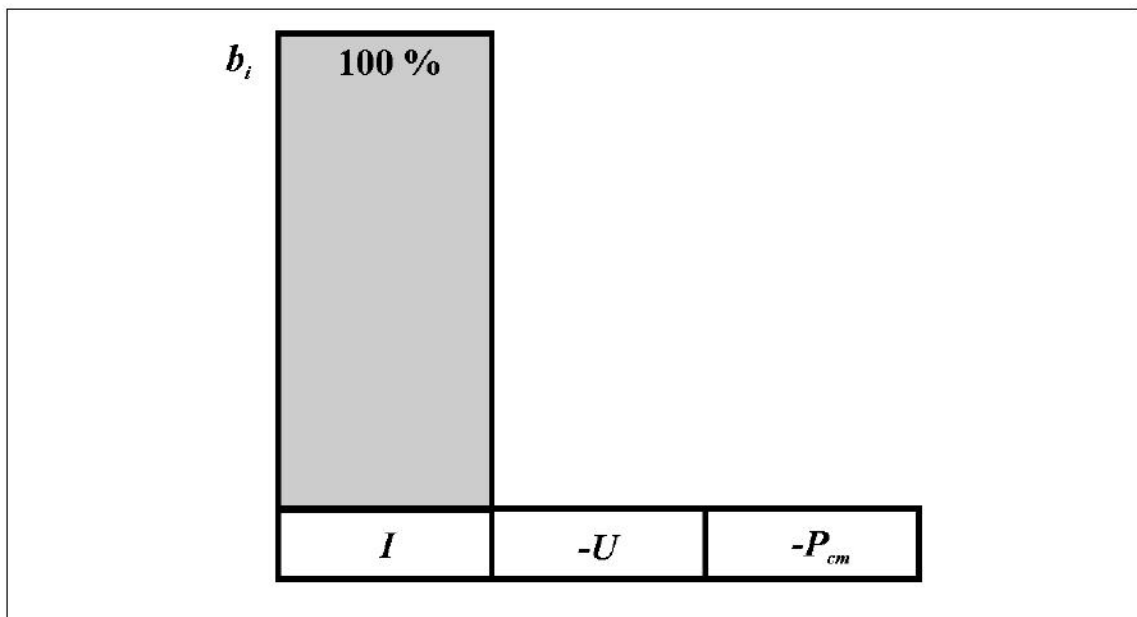


Рисунок 3.3 – Ступінь впливу факторів на бічний між електродний зазор  $\delta_e$

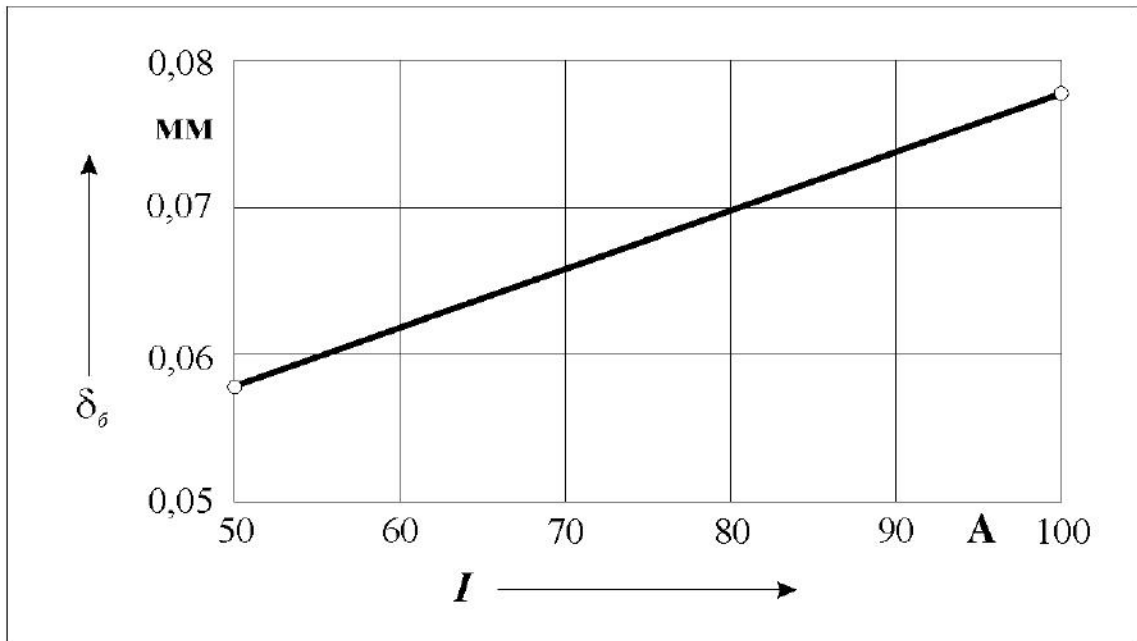


Рисунок 3.4 – Залежність бічного між електродного зазору  $\delta_6$  від  $I$

### 3.3 Шорсткість обробленої поверхні

**Розрахунок дисперсії дослід** здійснюємо за формулою (2.5). Дані для розрахунку вносимо в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Дані для розрахунку дисперсії дослід

Номер дубля	$y_{0q}$	$\Delta y = \left( y_{0q} - \bar{y}_0 \right)$	$\Delta y^2$
1	8,5	0,15	0,0225
2	7,9	0,75	0,5625
3	9,0	0,35	0,1225
4	9,2	0,55	0,3025
	$\bar{y}_0 = 8,65$		$\sum \Delta y^2 = 1,01$

Тоді

$$S_y^2 = \frac{1,01}{3} = 0,337,$$

і відповідно

$$S_y = 0,580.$$

**Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі** здійснювали за формулою (2.7):

$$b_0 = \frac{1}{8}(9,2 + 7,09 + 10,9 + 5,5 + 12,5 + 7,9 + 10,9 + 7,09) = 8,88;$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(9,2 - 7,09 + 10,9 - 5,5 + 12,5 - 7,9 + 10,9 - 7,09) = 1,99;$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(9,2 + 7,09 - 10,9 - 5,5 + 12,5 + 7,9 - 10,9 - 7,09) = 0,29;$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(9,2 + 7,09 + 10,9 + 5,5 - 12,5 - 7,9 - 10,9 - 7,09) = -0,71.$$

**Розрахунок дисперсії оцінок** здійснювали за формулою (2.8):

$$S_{b_i}^2 = \frac{0,337}{8} = 0,0421,$$

відповідно середньо квадратична помилка

$$S_{b_i} = 0,205.$$

**Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії** здійснювали за формулою (2.9):

$$\Delta b_i = 3,18 \cdot 0,205 = 0,652 .$$

У даному випадку для коефіцієнта регресії  $b_2$  не виконується вимога  $|b_i| \geq \Delta b_i$  тому його слід визнати статистично не значимим.

**Рівняння регресії**, або математична модель шорсткості обробленої поверхні набуде вигляду

$$y_3 = 8,88 + 1,99x_1 - 0,71x_3 . \quad (3.3)$$

**Перевірку гіпотези про адекватність математичної моделі** здійснювали за  $t$ -критерієм Стьюдента за формулою (2.11):

$$t^{розр} = \frac{|8,88 - 8,65| \sqrt{8}}{0,580} = 1,12 .$$

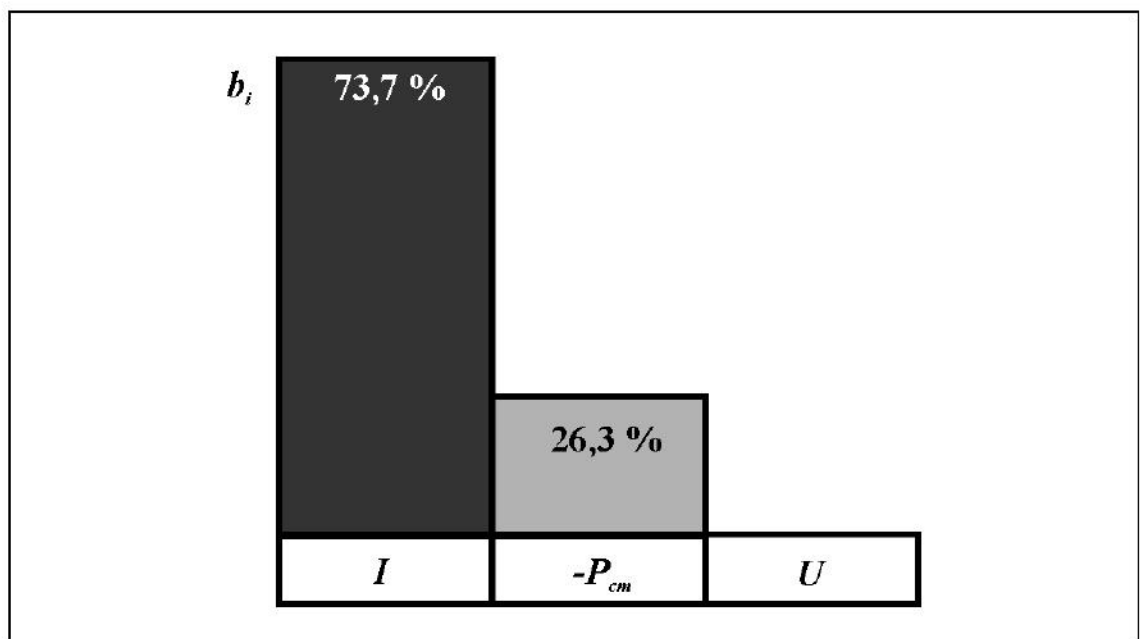
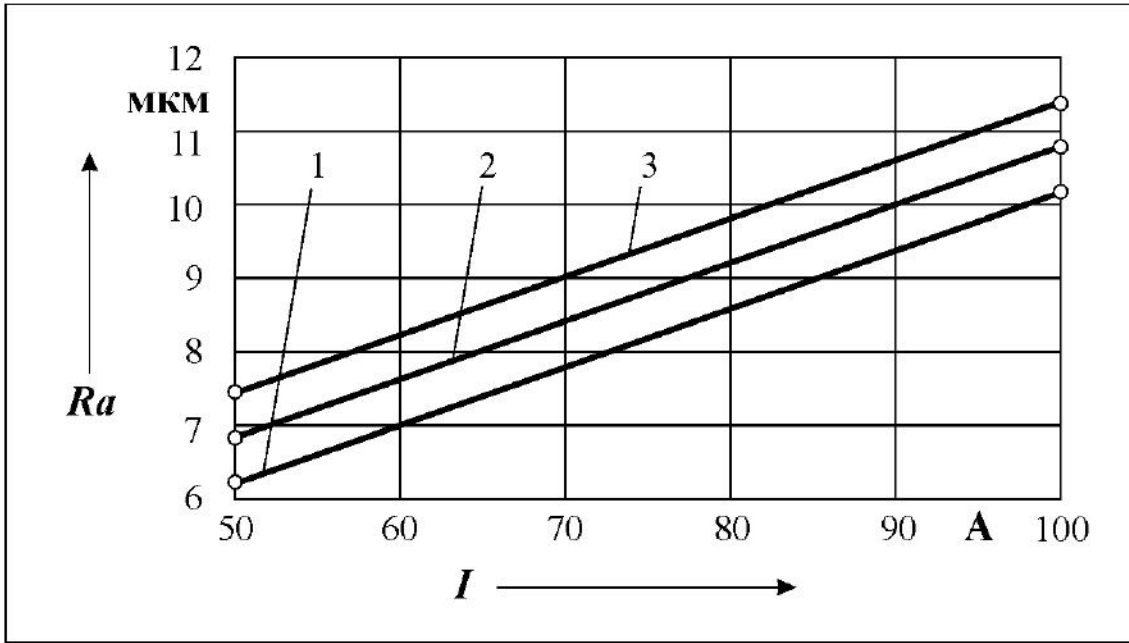


Рисунок 3.5 – Ступінь впливу факторів на шорсткість бічної поверхні отвору після РОД  $Ra$



1 –  $P_{cm} = 1,4$  Мпа; 2 –  $P_{cm} = 1,0$  Мпа; 3 –  $P_{cm} = 0,6$  Мпа

Рисунок 3.6 – Залежність шорсткості бічної поверхні отвору після РОД  $Ra$  від  $I$  та  $P_{cm}$

Оскільки  $1,12 < 3,18$ , гіпотеза про адекватність моделі не відхиляється.

**Аналіз моделі.** Ступінь впливу факторів на шорсткість бічної поверхні отвору  $Ra$  показано на рисунку 3.5.

Як бачимо, найбільш впливає на шорсткість бічної поверхні отвору такий фактор, як сила технологічного струму  $I$ , тому його слід визнати головним, керуючим. Ступінь впливу складає 73,7 %. Із підвищенням  $I$  шорсткість збільшується (на рисунку 3.6).

Вплив статичного тиску потоку на вході в міжелектродний зазор  $P_{cm}$  на шорсткість поверхні – у 2,8 рази менший (26,3 %), але має істотне значення. Із підвищенням тиску  $Ra$  зменшується.

В умовах експерименту шорсткість бічної поверхні отвору після РОД змінювалася у межах від  $Ra5,5$  до  $Ra12,5$ .

### 3.4 Продуктивність обробки

**Розрахунок дисперсії дослідів** здійснюємо за формулою (2.5). Дані для розрахунку вносимо в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 – Дані для розрахунку дисперсії дослідів

Номер дубля	$y_{0q}$	$\Delta y = \left( y_{0q} - \bar{y}_0 \right)$	$\Delta y^2$
1	360	12,5	156,25
2	350	2,5	6,25
3	325	22,5	506,25
4	355	7,5	56,25
	$\bar{y}_0 = 347,5$		$\sum \Delta y^2 = 725$

Тоді

$$S_y^2 = \frac{725}{3} = 241,67,$$

і відповідно

$$S_y = 15,54.$$

**Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі** здійснювали за формулою (2.7):

$$b_0 = \frac{1}{8}(487 + 235 + 375 + 297 + 493 + 297 + 368 + 297) = 356;$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(487 - 235 + 375 - 297 + 493 - 297 + 368 - 297) = 74,62;$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(487 + 235 - 375 - 297 + 493 + 297 - 368 - 297) = 21,87;$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(487 + 235 + 375 + 297 - 493 - 297 - 368 - 297) = -7,62.$$

**Розрахунок дисперсії оцінок** здійснювали за формулою (2.8):

$$S_{b_i}^2 = \frac{241,67}{8} = 30,21,$$

відповідно середньо квадратична помилка

$$S_{b_i} = 5,50$$

**Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії** здійснювали за формулою (2.9):

$$\Delta b_i = 3,18 \cdot 5,5 = 17,49.$$

У даному випадку для коефіцієнта регресії  $b_3$  не виконується вимога  $|b_i| \geq \Delta b_i$  тому його слід визнати статистично не значимим.

**Рівняння регресії**, або математична модель продуктивності обробки набуде вигляду

$$y_4 = 356 + 74,62x_1 + 21,87x_2. \quad (3.4)$$

**Перевірку гіпотези про адекватність математичної моделі** здійснювали за  $t$ -критерієм Стьюдента за формулою (2.11):

$$t^{позп} = \frac{|356 - 347,5| \sqrt{8}}{15,54} = 1,55.$$

Оскільки  $1,55 < 3,18$ , гіпотеза про адекватність моделі не відхиляється.

**Аналіз моделі.** Ступінь впливу факторів на продуктивність обробки отвору  $M$  показано на рисунку 3.7.

Як бачимо, найбільш впливає на продуктивність обробки отвору такий фактор, як сила технологічного струму  $I$ , тому його слід визнати головним, керуючим. Ступінь впливу складає 77,3 %. Із підвищенням  $I$  продуктивність обробки збільшується (на рисунку 3.8).

Вплив напруги на електродах  $U$  на  $M$  – у 3,4 рази менший (22,7 %), але має істотне значення. Із підвищенням напруги  $M$  збільшується.

Позитивний вплив сили технологічного струму та напруги на продуктивність обробки, з фізичної точки зору, пояснюються введенням в зону обробки додаткової енергії та, як відомо, теплової природою електричної ерозії.

В умовах експерименту продуктивність обробки отворів способом РОД з використанням мідного ЕІ змінювалася у межах від 297 мм<sup>3</sup>/хв. до 493 мм<sup>3</sup>/хв.

### 3.5 Питома продуктивність обробки

**Розрахунок дисперсії дослідів** здійснюємо за формулою (2.5). Дані для розрахунку вносимо в таблицю 3.5.

Таблиця 3.5 – Дані для розрахунку дисперсії дослідів

Номер дубля	$y_{0q}$	$\Delta y = \left( y_{0q} - \bar{y}_0 \right)$	$\Delta y^2$
1	4,80	0,13	0,0169
2	4,67	0,04	0,0016
3	4,33	0,30	0,0900
4	4,73	0,10	0,0100
	$\bar{y}_0 = 4,63$		$\sum \Delta y^2 = 0,1185$

Тоді

$$S_y^2 = \frac{0,1185}{3} = 0,0395,$$

і відповідно

$$S_y = 0,199.$$

**Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі** здійснювали за формулою (2.7):

$$b_0 = \frac{1}{8}(4,87 + 4,7 + 3,75 + 5,94 + 4,93 + 5,94 + 3,68 + 5,94) = 4,97;$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(4,87 - 4,7 + 3,75 - 5,94 + 4,93 - 5,94 + 3,68 - 5,94) = -0,66;$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(4,87 + 4,7 - 3,75 - 5,94 + 4,93 + 5,94 - 3,68 - 5,94) = 0,14;$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(4,87 + 4,7 + 3,75 + 5,97 - 4,93 - 5,94 - 3,68 - 5,94) = 0,029.$$

**Розрахунок дисперсії оцінок** здійснювали за формулою (2.8):

$$S_{b_i}^2 = \frac{0,0395}{8} = 0,00494,$$

відповідно середньо квадратична помилка

$$S_{b_i} = 0,0703.$$

**Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії** здійснювали за формулою (2.9):

$$\Delta b_i = 3,18 \cdot 0,0703 = 0,223.$$

У даному випадку для коефіцієнтів регресії  $b_2$  та  $b_3$  не виконується вимога  $|b_i| \geq \Delta b_i$  тому їх слід визнати статистично не значимими.

**Рівняння регресії**, або математична модель питомої продуктивності обробки набуде вигляду

$$y_5 = 4,95 - 0,66x_1. \quad (3.5)$$

**Перевірку гіпотези про адекватність математичної моделі** здійснювали за  $t$ -критерієм Стьюдента за формулою (2.11):

$$t^{розр} = \frac{|4,97 - 4,63| \sqrt{8}}{0,199} = 4,8.$$

При  $t^{табл.} = 5,84$  [34] умова  $t^{розр.} < t^{табл.}$  виконується і гіпотеза про адекватність моделі не відхиляється.

**Аналіз моделі.** Ступінь впливу факторів на питому продуктивність обробки отвору  $M_a$  показано на рисунку 3.9.

Як бачимо, на питому продуктивність обробки отвору впливає лише один фактор – сила технологічного струму  $I$ , тому його слід визнати головним, керуючим. Ступінь впливу складає 100 %. Із підвищенням  $I$  питома продуктивність обробки зменшується (на рисунку 3.10).

В умовах експерименту питома продуктивність обробки отворів способом РОД з використанням мідного ЕІ змінювалася у межах від 3,68 мм<sup>3</sup>/А·хв. до 5,94 мм<sup>3</sup>/А·хв.

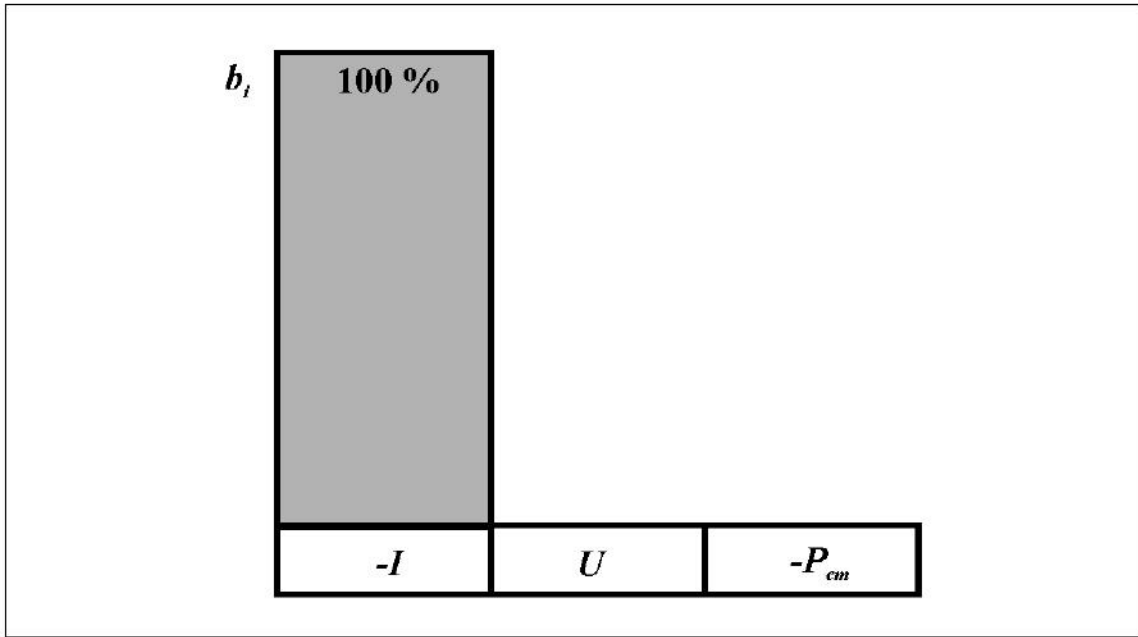


Рисунок 3.9 – Ступінь впливу факторів на питому продуктивність обробки отвору мідним ЕІ  $M_a$

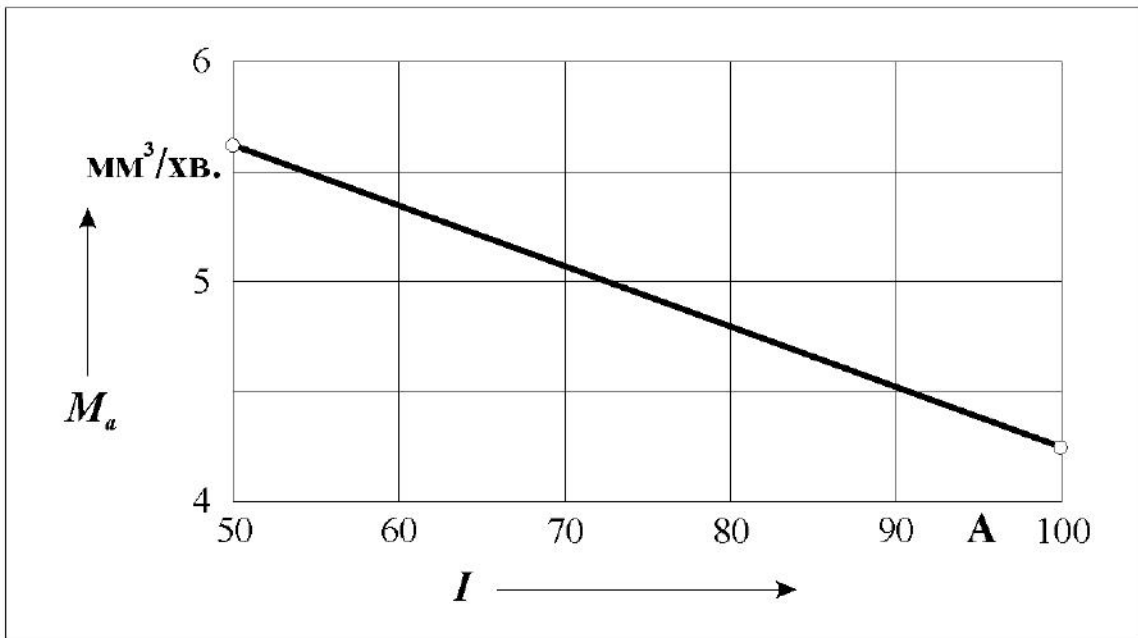


Рисунок 3.10 – Залежність питомої продуктивності обробки отвору мідним ЕІ  $M_a$  від  $I$

### 3.6 Питома витрата електроенергії

**Розрахунок дисперсії дослідів** здійснюємо за формулою (2.5). Дані для розрахунку вносимо в таблицю 3.6.

Таблиця 3.6 – Дані для розрахунку дисперсії дослідів

Номер дубля	$y_{0q}$	$\Delta y = \left( y_{0q} - \bar{y}_0 \right)$	$\Delta y^2$
1	13,27	0,50	0,2500
2	13,65	0,12	0,0144
3	14,70	0,93	0,8649
4	13,46	0,31	0,0961
	$\bar{y}_0 = 13,77$		$\sum \Delta y^2 = 1,2244$

Тоді

$$S_y^2 = \frac{1,2244}{3} = 0,408,$$

і відповідно

$$S_y = 0,639.$$

**Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі** здійснювали за формулою (2.7):

$$b_0 = \frac{1}{8}(15,25 + 15,8 + 14,14 + 8,92 + 15,04 + 12,51 + 14,42 + 12,51) = 13,57;$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(15,25 - 15,8 + 14,14 - 8,92 + 15,04 - 12,51 + 14,42 - 12,51) = 1,14;$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(15,25 + 15,8 - 14,14 - 8,92 + 15,04 + 12,51 - 14,42 - 12,51) = 1,08;$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(15,25 + 15,8 + 14,14 + 8,92 - 15,04 - 12,51 - 14,42 - 12,51) = -0,046.$$

**Розрахунок дисперсії оцінок** здійснювали за формулою (2.8):

$$S_{b_i}^2 = \frac{0,408}{8} = 0,051,$$

відповідно середньо квадратична помилка

$$S_{b_i} = 0,226.$$

**Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії** здійснювали за формулою (2.9):

$$\Delta b_i = 3,18 \cdot 0,226 = 0,719.$$

У даному випадку для коефіцієнта регресії  $b_3$  не виконується вимога  $|b_i| \geq \Delta b_i$  тому його слід визнати статистично не значимим.

**Рівняння регресії**, або математична модель питомої витрати електроенергії набуде вигляду

$$y_6 = 13,57 + 1,14x_1 + 1,08x_2. \quad (3.6)$$

**Перевірку гіпотези про адекватність математичної моделі** здійснювали за  $t$ -критерієм Стьюдента за формулою (2.11):

$$t^{розр} = \frac{|13,57 - 13,77| \sqrt{8}}{0,639} = 0,88.$$

Оскільки  $0,88 < 3,18$ , гіпотеза про адекватність моделі не відхиляється.

**Аналіз моделі.** Ступінь впливу факторів на питому витрату електроенергії  $a$  показано на рисунку 3.11

Як бачимо, найбільший вплив на питому витрату електроенергії оказує сила технологічного струму  $I$ , тому його слід визнати головним, керуючим. Ступінь впливу складає 51,3 %. Із підвищенням  $I$  питома витрата електроенергії збільшується (на рисунку 3.12).

В умовах експерименту питома витрата електроенергії процесу РОД отворів з використанням мідного ЕІ змінювалася у межах від 8,92 кВт·год/кг до 15,80 кВт·год./кг.

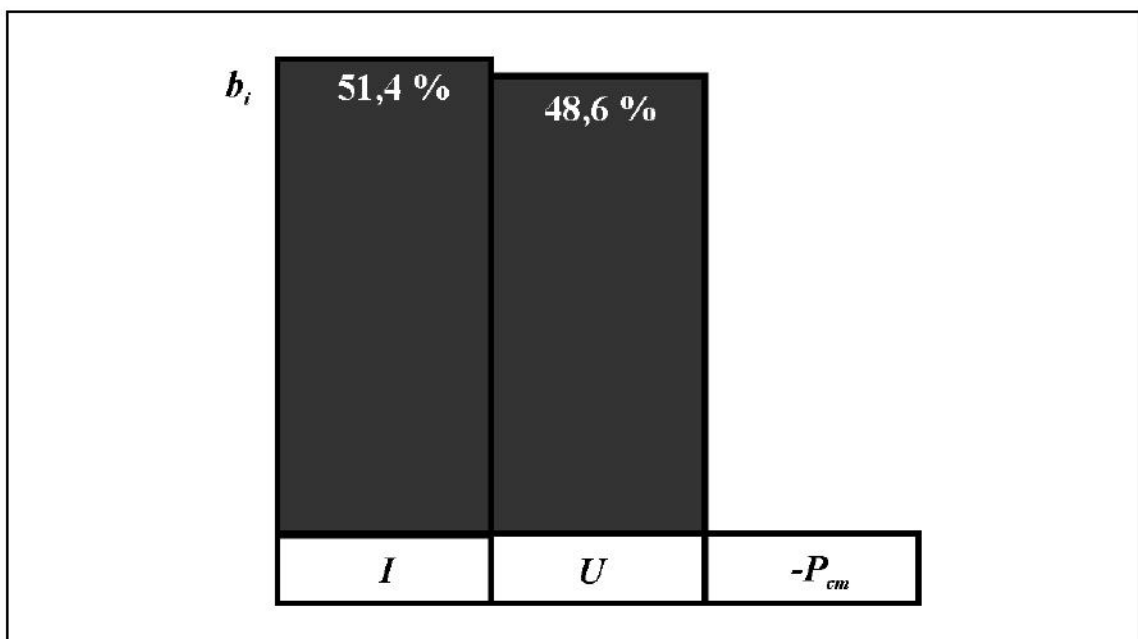
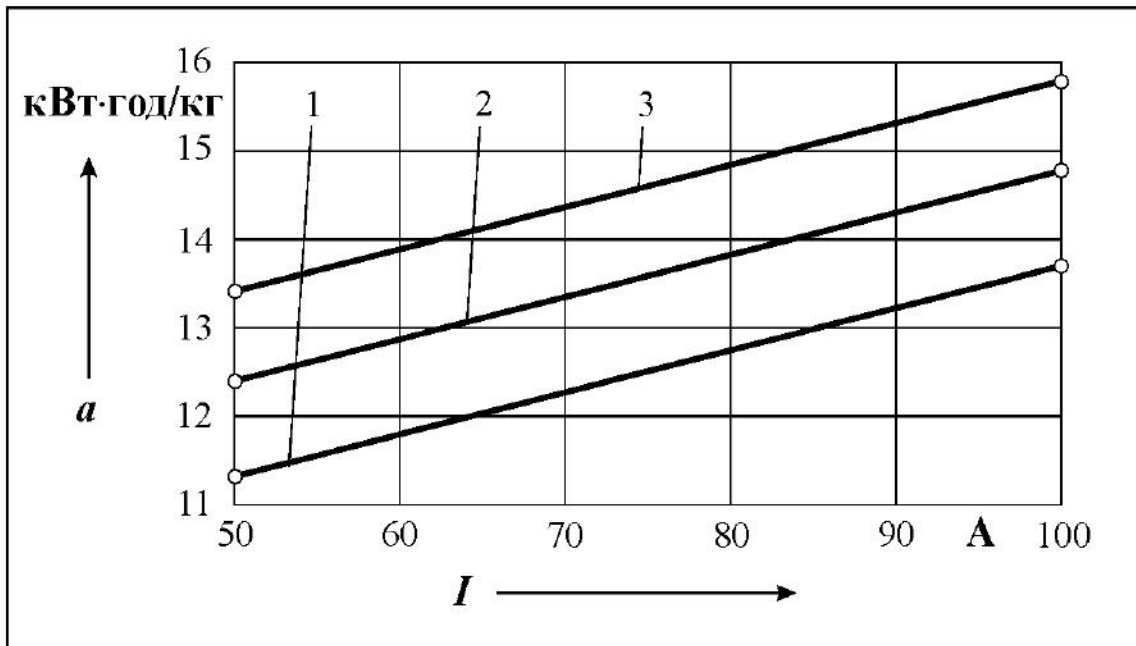


Рисунок 3.11 – Ступінь впливу факторів на питому витрату електроенергії  $a$



$$1 - U = 25 \text{ V}; 2 - U = 30 \text{ V}; 3 - U = 35 \text{ V}$$

Рисунок 3.12 – Залежність питомої витрати електроенергії  $a$  від  $I$  та  $U$

### 3.7 Висновки

1. Отримано математичну модель відносного лінійного зносу мідного електрода-інструмента  $\gamma_d$ . Показано, що на знос одночасно та практично рівномірно впливають усі три фактора: напруга на електродах  $U$  – головний керуючий фактор (ступінь впливу – 35,3 %). Із підвищенням  $U$  знос зменшується; сила технологічного струму  $I$  (ступінь впливу – 33,3 %). Із підвищенням  $I$  знос збільшується; статичний тиск робочої рідини на вході потоку в міжелектродний зазор  $P_{cm}$  (ступінь впливу – 31,4 %). Із підвищенням  $P_{cm}$  знос зменшується. Модель дозволяє прогнозувати малозносний процес РОД отворів мідним електродом-інструментом. В умовах експерименту відносний лінійний знос мідного ЕІ змінювався у межах від 4,88 % до 31,6 %.

2. Отримано математичну модель бічного міжелектродного зазору  $\delta_b$ . Показано, що зазор повністю визначається лише одним фактором – силою

технологічного струму  $I$ . Саме тому  $I$  є головним керуючим фактором. Із підвищенням сили струму зазор збільшується.

В умовах експерименту бічний міжелектродний зазор змінювався у межах від 0,05 мм до 0,10мм.

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

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

5. Отримано математичну модель питомої продуктивності обробки отвору  $M_a$ . Показано, що на питому продуктивність обробки отвору впливає лише один фактор – сила технологічного струму  $I$ , тому його слід визнати головним, керуючим (ступінь впливу – 100 %). Із підвищенням  $I$  питома продуктивність обробки зменшується. В умовах експерименту питома

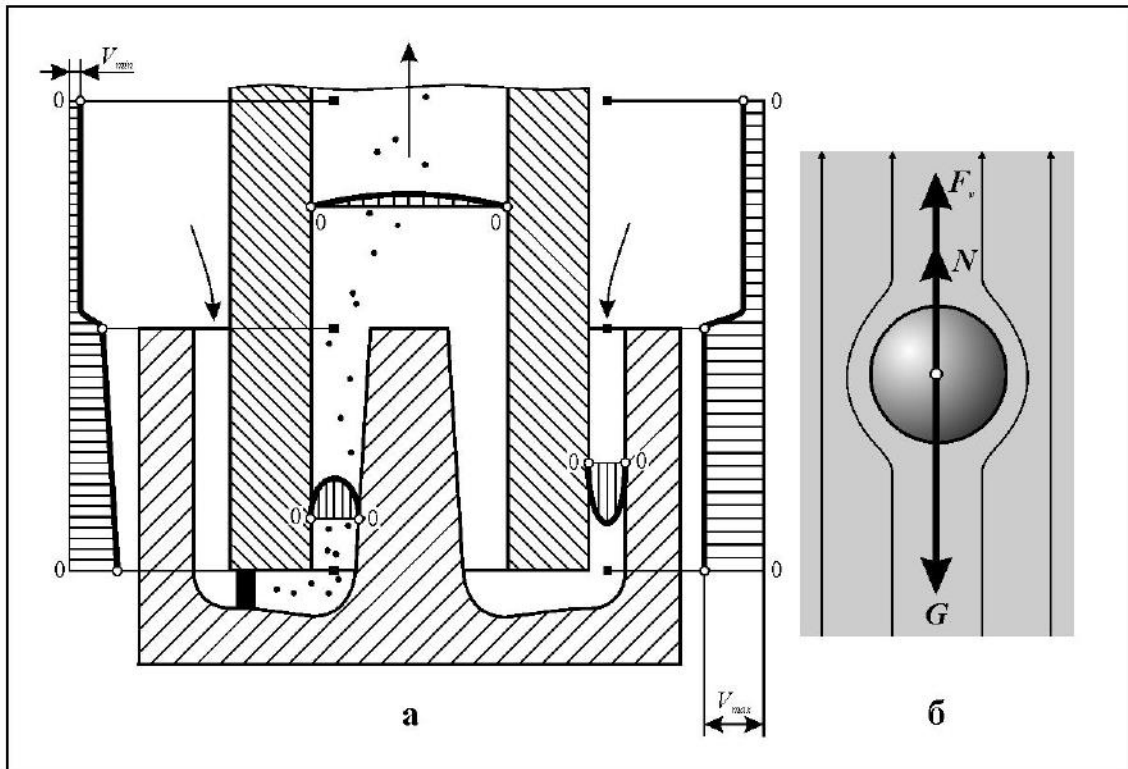
продуктивність обробки отворів способом РОД з використанням мідного ЕІ змінювалася у межах від  $3,68 \text{ мм}^3/\text{А}\cdot\text{хв.}$  до  $5,94 \text{ мм}^3/\text{А}\cdot\text{хв.}$

6. Отримано математичну модель питомої витрати електро-енергії *a*. Показано, що, найбільший вплив на питому витрату електроенергії оказує сила технологічного струму *I*, тому його слід визнати головним, керуючим (ступінь впливу – 51,3 %). Із підвищенням *I* питома витрата електроенергії збільшується. В умовах експерименту питома витрата електроенергії процесу РОД отворів з використанням мідного ЕІ змінювалася у межах від  $8,92 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{кг}$  до  $15,80 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{кг}$ .

## АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ФОРМОУТВОРЕННЯ ТА ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ РОД МАЛОГО ОТВОРУ МІДНИМ ЕІ

### 4.1 Гідродинамічний режим робочої рідини в каналі ЕІ

Відомо [30, 33], що для РОД отворів широко використовується типова технологічна схема формоутворення, при якій вилучення продуктів ерозії із зони обробки здійснюється в напрямку знизу вгору (на рисунку 4.1).



а – схема; б – схема сил, що діють на частку у вертикальному каналі ЕІ

Рисунок 4.1 – Епюра швидкостей в каналі ЕІ та в МЕЗ при РОД отвору з використанням типової (відомої) технологічної схеми формоутворення

Найбільш складні умови евакуації продуктів ерозії спостерігаються у вертикальному каналі електрода-інструмента, в якому на частку діє, з одного боку, сила ваги  $G$ , а з другого – сила гідродинамічного тиску  $F_v$  та сила Архімеда  $N$ . Рівновага цих сил визначається умовою

$$F_v = G - N. \quad (4.1)$$

Як бачимо, для того, щоб частка рухалася в напрямку знизу вгору треба перебороти силу ваги силою гідродинамічного тиску. В свою чергу, гідродинамічний тиск потоку в каналі характеризується швидкістю робочої рідини. Отже, існує така критична швидкість робочої рідини, нижче якої продукти ерозії не вилучаються із робочої зони. Процес обробки отвору дестабілізується та припиняється. За даними роботи [30] критичну швидкість можна визначити за формулою

$$V_{кр} = \sqrt{\frac{8Rg}{3C_x} \left( \frac{K_n \rho_n}{\rho_{жс}} - 1 \right)}, \quad (4.2)$$

де  $R$  – радіус частки, м;

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

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

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

$C_x$  – коефіцієнт лобового опору частки;

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

В роботі [31, с.150] показано, що в широкому діапазоні зміни радіусу частки для більшості металів та сплавів критична швидкість в каналі електрода-інструмента не перевищує 0,5 м/с.

Однак при прошиванні електричною дугою отворів малого діаметру ( $d < 5$  мм) швидкість потоку в каналі електрода-інструмента як правило менша критичної. Тому при нормальних тисках (до 2 МПа) процес дестабілізується

та припиняється. А підвищення тиску на рівень 6...8 МПа, з метою збільшення швидкості потоку в каналі до величини, що більша критичної, є суттєвим обмеженням електро-ерозійних верстатів, які реалізують процес РОД.

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

#### **4.2 Експериментальні випробування нового способу РОД малих отворів з використанням мідного ЕІ**

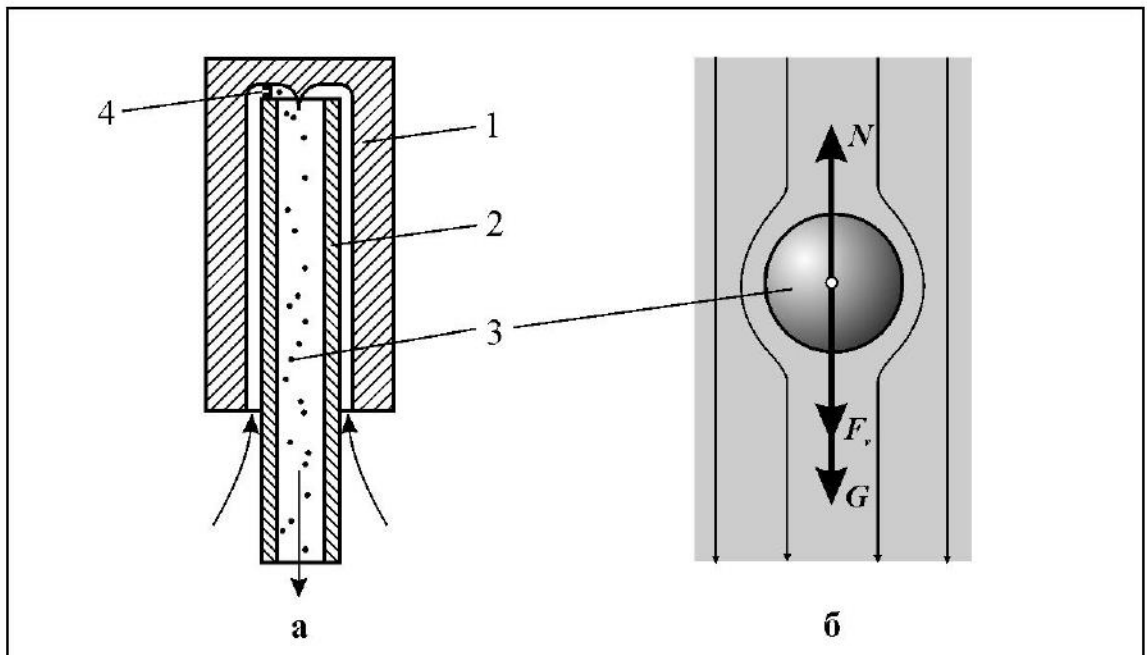
Суть нового способу РОД малих отворів схематично показано на рисунку 4.2.

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

$$F = F_v + G - N. \quad (4.3)$$

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

Для реалізації способу, що пропонується, спроектовано експериментальний пристрій (на рисунку 4.3). На плиті 10 жорстко встановлюється тримач 9, на якому за допомогою накидної гайки 8 змонтовано електродотримач 8 з електродом-інструментом 1, який являє собою мідну трубку зовнішнім діаметром 2 мм.

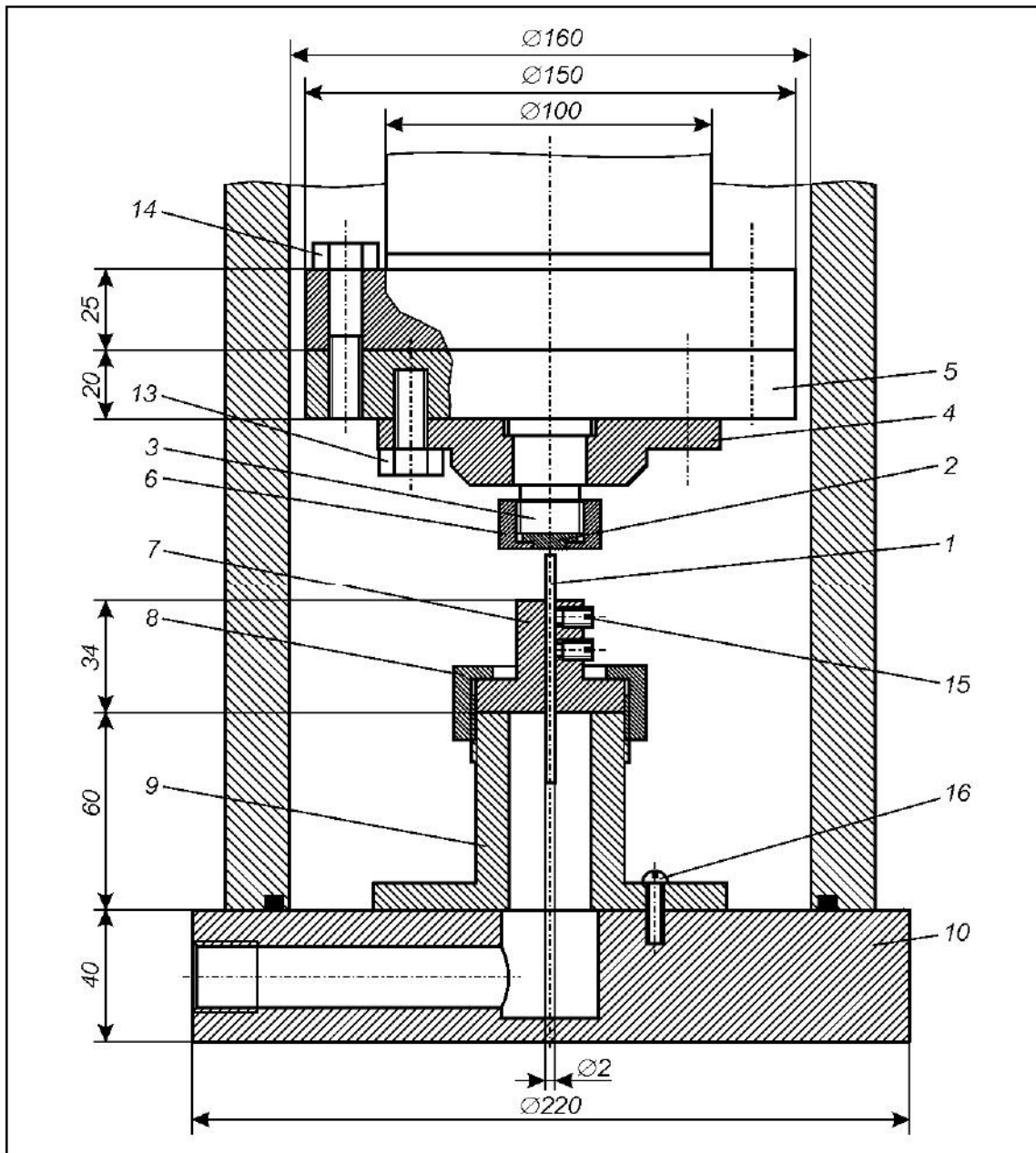


1 – ЕЗ; 2 – мідний ЕІ (трубка); 3 – продукти ерозії; 4 – електрична дуга

Рисунок 4.2 – Схема нового способу РОД малих отворів (а) та сили, що діють на частку у вертикальному технологічному каналі ЕІ (б)

Консоль електрода-інструмента 1 регулюється гвинтами 15 в залежності від глибини отвору, що прошивається, та з урахуванням величини його лінійного зносу. Електрод-заготовка 2 закріплюється на шпинделі верстату за допомогою плити 5, тримачів 3, 4 та накидної гайки 6.

Для РОД малого отвору герметизують зону обробки шляхом опускання камери, подають під технологічним тиском в неї робочу (органічну) рідину, вмикають технологічний струм та у слідкуючому за торцевим міжелектродним зазором режимі ведуть процес обробки. При цьому продукти ерозії від горіння електричної дуги вільно вилучаються із вертикального каналу в ЕІ навіть при порівняно невеликих тисках робочої рідини на вході в міжелектродний зазор. Останнє пояснюється застосуванням такої технологічної схеми формоутворення, при якій, як показано вище, на частку, в вертикальному каналі діє гарантована сила  $F$ , яка спрямована вниз.



1 – ЕІ; 2 – ЕЗ; 3,4,9 – тримачі; 5,10 – плита; 6 – накладна гайка М20х1,5;  
7 – електродотримач; 8 – накладна гайка М48х2; 13,14 – болти; 15,16 – гвинти

Рисунок 4.3 – Експериментальний пристрій для РОД отвору діаметром  
2 мм з використанням мідного ЕІ

Режим обробки та результати прошивання отвору діаметром 2 мм в електроді-заготовці із сталі 45 з використанням мідного електрода-інструмента та вказаного експериментального пристрою (рис. 4.4) наведено в таблиці 4.1

Таблиця 4.1 – Режими та результати обробки отвору діаметром 2 мм з використанням мідного електрода-інструмента

№ досліду	$I$ , А	$U$ , В	$P_{ст}$ , МПа	Полярність	$V$ , мм/хв.	$\gamma_{л}$ , %	$\delta_{б}$ , мм	Наявність технологічного виступу
1	3	50	1,0	пряма	5,0	44	0,10	немає
2	3	50	1,5	пряма	5,1	34	0,10	немає

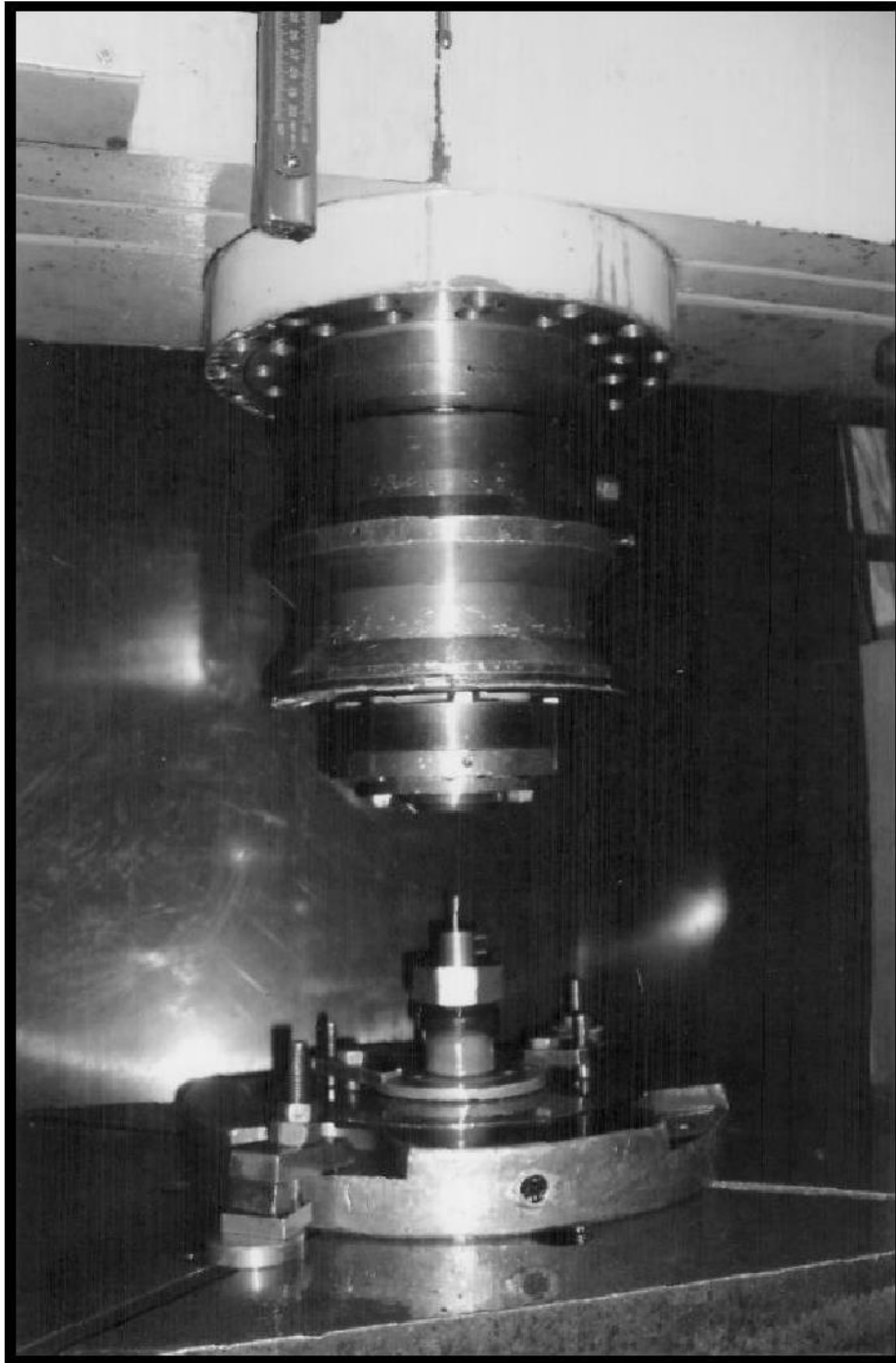


Рисунок 4.4 – Фото експериментального пристрою для РОД отвору діаметром 2 мм мідним ЕІ

Як бачимо, процес отримання наскрізних малих отворів, глибиною 5,6 мм (на рисунку 4.5), характеризується, з одного боку, великою швидкістю прошивання  $V$ , яка приблизно у 1,5 рази за аналогічних умов перебільшує швидкість електроімпульсної обробки отворів мідним ЕІ, а з другого боку, підвищеним лінійним зносом мідного ЕІ.

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

- зменшення сили технологічного струму. В умовах експерименту зменшення сили струму здійснювалося шляхом використання баластного реостату. Зменшення сили струму до величини нижче 3 А не можливо за технічних причин;

- підвищення напруги на електродах. В умовах експерименту технічним обмеженням підвищення напруги є джерело живлення – зварювальний випрямляч ВДУ-504, у якого напруження холостого ходу не перевищує 80 В, а верхня межа регулювання робочої напруги при падаючій вольт-амперної характеристики не перевищує 50 В;

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

Таким чином, для РОД отворів діаметром 2 мм з відносним лінійним зносом мідного ЕІ на рівні 5 % необхідно вести процес при полярності обробки примій, на наступному режимі:

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

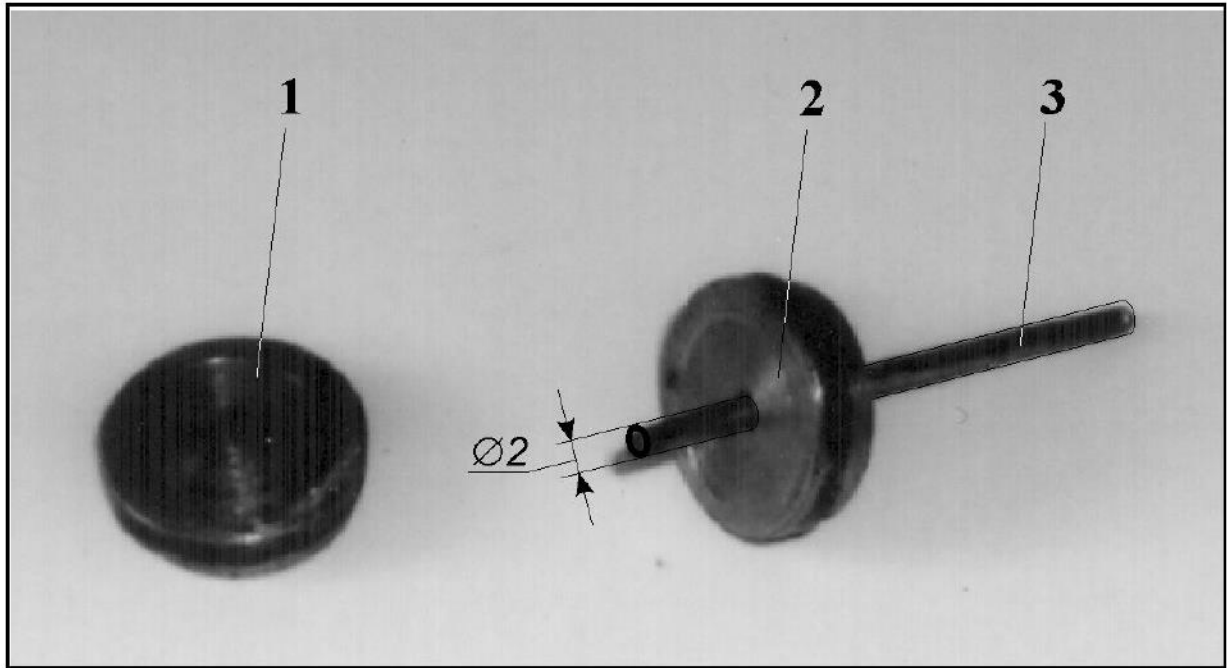


Рисунок 4.5 – ЕЗ до РОД (1), ЕЗ після РОД (2) та мідним ЕІ (3)

Забезпечення такого режиму РОД малих отворів потребує розробки нового обладнання.

#### 4.3. Висновки

1. В результаті аналізу гідродинамічного режиму робочої рідини при вилученні продуктів ерозії із МЕЗ за напрямком знизу вгору показано, що найбільш складні умови евакуації продуктів ерозії спостерігаються у вертикальному каналі електрода-інструмента, в якому на частку діє, з одного боку, сила ваги  $G$ , а з другого – сила гідродинамічного тиску  $F_v$  та сила Архімеда. Доведено, що існує така критична швидкість робочої рідини, нижче якої продукти ерозії не вилучаються із робочої зони.

2. Запропоновано новий спосіб обробки електричною дугою малих отворів, який відрізняється тим, що обробку здійснюють при видаленні робочої рідини разом з продуктами ерозії із технологічного каналу в

електроді-інструменті за напрямком зверху вниз, тобто з використанням гравітаційної сили. Спосіб дозволяє ефективно вилучати продукти ерозії навіть з малих за діаметром каналів і тим самим забезпечує обробку отворів діаметром менше трьох міліметрів. Процес здійснюється без утворення технологічного виступу.

3. Виконані експериментальні випробування процесу прошивання наскрізних отворів діаметром 2 мм, глибиною 5,6 мм мідним ЕІ. Показано, що процес характеризується, з одного боку, великою швидкістю прошивання ( $V = 5$  мм/хв.), яка приблизно у 1,5 рази за аналогічних умов перебільшує швидкість електроімпульсної обробки, а з другого боку, підвищеним лінійним зносом мідного ЕІ.

4. Показано, що в умовах експерименту гідравлічний опір течії робочої рідини в технологічному каналі мідного електрода-інструмента (діаметр каналу 1 мм) був настільки великий, що для забезпечення певного рівня гідродинамічного тиску потоку на дугу є потреба в підвищенні статичного тиску на вході в зазор до рівня 6...7 МПа. Останнє є технічним обмеженням насосної установки, що використовувалася. На підставі отриманих експериментальних даних запропоновано наступний оптимальний режим для РОД отворів діаметром 2 мм з відносним лінійним зносом мідного ЕІ на рівні 5 %: сила технологічного струму – 1...3 А; робоча напруга на дузі – 120...150 В; статичний тиск робочої рідини на вході в МЕЗ – 6...7 МПа; полярність обробки – пряма.

## ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

### 5.1 Економічна ефективність способу чорнової обробки отворів мідним електрод-інструментом електричною дугою

Розрахунок очікуваного річного економічного ефекту [36,37,38] від впровадження у виробництво способу чорнової обробки отворів мідним електрод-інструментом електричною дугою базується на наступних умовах:

- за базовий варіант прийнято найбільш розповсюджений сучасний метод електроімпульсної обробки отворів. За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ», м. Бровари, Київської області, час прошивання отвору заготовки складає 0,42 годин з середньою продуктивністю  $M_{баз} = 20 \text{ мм}^3/\text{хв.}$ ;

- за проектний варіант прийнято спосіб чорнової обробки отворів мідним електрод-інструментом електричною дугою середньою продуктивністю обробки  $M_{пр} = 52 \text{ мм}^3/\text{хв.}$ , що відповідає силі технологічного струму  $I = 3 \text{ А}$ ;

- за даними на науково-виробничому товаристві ТОВ «ІНТЕРВІТ», річний об'єм виробництва заготовок 3 т. У перерахунку на кількість заготовок, що обробляються, це становить 12000 шт/рік.

Вихідні дані для подальшого розрахунку наведені у таблиці 5.1

Таблиця 5.1 – Вихідні дані

№ п/п	Найменування показників	Умовні позначення	Одиниці виміру	Варіанти		Джерело даних
				базовий	проектний	
1	Річна програма (кількість заготовок)	$n$	шт/рік	12000	12000	За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ»
2	Середня трудомісткість обробки однієї заготовки	$t$	год/шт	0,42	0,16	Дані випробування
3	Вартість обробки однієї заготовки	$T$	грн/шт	45	30	За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ»
4	Дійсний фонд часу обладнання при однозмінній роботі	$F$	год	2008	2008	За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ»
5	Вартість обладнання	$K$	грн	1 440 000	980 000	За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ»
6	Виробнича площа, що займає одиниця обладнання	$S$	м <sup>2</sup>	9	16	За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ»

## Продовження таблиці 5.1

7	Коефіцієнт, що враховує додаткову виробничу площу на одну одиницю обладнання	$\kappa_d$	-	1,1	1,1	За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ»
8	Вартість 1 м <sup>2</sup> виробничої площі	$C_n$	грн/м <sup>2</sup>	5000	5000	За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ»
9	Сумарна потужність двигунів та джерел живлення	$N$	кВт	11,67	30	За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ»
10	Коефіцієнт використання потужності обладнання	$\kappa_n$	-	0,9	0,7	Дані випробування
11	Вартість однієї кВт/год електроенергії	$C_e$	грн	4,75	4,75	За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ»
12	Річна норма амортизаційних відрахувань	$a_a$	%	11,48	11,48	За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ»
13	Річна норма відрахувань на утримання та поточний ремонт обладнання	$a_y$	%	3,64	3,64	За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ»
14	Річна норма відрахувань на ремонт, амортизацію та утримання виробничої площі	$a_n$	%	2,4	2,4	За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ»
15	Коефіцієнт, що враховує додаткову заробітну плату	$K_{dz}$	-	1,089	1,089	За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ»
16	Коефіцієнт завантаження обладнання	$\kappa_{zo}$	-	0,75	0,75	За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ»

Для розрахунку суми капітальних вкладень визначаємо: розрахункову та прийняту кількість обладнання для різання заготовок за програмою  $n$ ; вартість всього обладнання  $K_{об}$ ; вартість виробничих приміщень  $K_{вп}$ . Дані розрахунки наведено нижче в таблиці 5.2

Таблиця 5.2

Таблиця 5.2 – Розрахунок суми капітальних вкладень у виробництво

№ пп	Найменування показників	Умовні познач.	Одиниці виміру	Варіанти		Формули, розрахунок
				Базовий	Проектний	
1	Розрахункова кількість обладнання	$H_p$	шт	2,3	0,9	$H_p = \frac{n \cdot t}{F}$ $H_{p(b)} = \frac{12000 \cdot 0,42}{2008} = 2,3$ $H_{p(n)} = \frac{12000 \cdot 0,16}{2008} = 0,9$
2	Прийнята кількість обладнання	$H_n$	шт	2	1	-

## Продовження таблиці 5.2

3	Вартість всього обладнання	$K_{об}$	грн	2 880 000	980 000	$K_{об} = K \cdot H_n$ $K_{об(\bar{b})} = 1440000 \cdot 2 = 2880000$ $K_{об(n)} = 980000 \cdot 1 = 980000$
4	Вартість виробничих приміщень	$K_{вп}$	грн	99000	88000	$K_{вп} = S \cdot \kappa_{\partial} \cdot H_n \cdot \Pi_n$ $K_{вп(\bar{b})} = 9 \cdot 1,1 \cdot 2 \cdot 5000 = 99000$ $K_{вп(n)} = 16 \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 5000 = 88000$
5	Загальна сума капітальних вкладень	$K_{кв}$	грн	2979000	106800	$K_{кв} = K_{об} + K_{вп}$ $K_{кв(\bar{b})} = 2880000 + 99000 = 2979000$ $K_{кв(n)} = 980000 + 88000 = 1068000$

Для розрахунку собівартості одиниці продукції попередньо визначаємо: з заробітною платою  $C_{зн}$ ; амортизацією, утриманням та ремонтом обладнання  $C_{ам}$ ; вартістю електроенергії  $C_e$ ; ремонтом та утриманням виробничою площею  $C_{пл}$ . Дані показники є складовими частинами собівартості одиниці продукції, розрахунок якої наведено у таблиці 5.3

Таблиця 5.3 – Розрахунок собівартості одиниці продукції

№ пп	Найменування показників	Умовні познач.	Одиниці виміру	Варіанти		Формули, розрахунок
				Базовий	Проектний	
1	Заробітна плата	$C_{зн}$	грн	588060	392040	$C_{зн} = n \cdot T \cdot K_{\partial з}$ $C_{зн(\bar{b})} = 12000 \cdot 45 \cdot 1,089 = 588060$ $C_{зн(n)} = 12000 \cdot 30 \cdot 1,089 = 392040$

## Продовження таблиці 5.3

2	Амортизація, утримання та ремонт обладнання	$C_{ам}$	грн	435456	148176	$C_{ам} = \frac{K \cdot H_n \cdot (a_a + a_y)}{100}$ $C_{ам(\bar{b})} = \frac{1440000 \cdot 2 \cdot (11,48 + 3,64)}{100} = 435456$ $C_{ам(n)} = \frac{980000 \cdot 1 \cdot (11,48 + 3,64)}{100} = 148176$
3	Вартість електроенергії	$C_e$	грн	150267	150224	$C_e = N \cdot \kappa_n \cdot F \cdot H_n \cdot C_e \cdot \kappa_{зо}$ $C_{e(\bar{b})} = 11,67 \cdot 0,9 \cdot 2008 \cdot 2 \cdot 4,75 \cdot 0,75 = 150267$ $C_{e(n)} = 30 \cdot 0,7 \cdot 2008 \cdot 1 \cdot 4,75 \cdot 0,75 = 150224$
4	Ремонт та утримання виробничої площі	$C_{пл}$	грн	2376	2112	$C_{пл} = \frac{S \cdot \kappa_{\partial} \cdot H_n \cdot C_n \cdot a_n}{100}$ $C_{пл(\bar{b})} = \frac{9 \cdot 1,1 \cdot 2 \cdot 5000 \cdot 2,4}{100} = 2376$ $C_{пл(n)} = \frac{16 \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 5000 \cdot 2,4}{100} = 2112$
5	Собівартість випуску продукції	$C$	грн	1082914	599359	$C = C_{zn} + C_{ам} + C_e + C_{пл}$ $C_{(\bar{b})} = 588060 + 435456 + 150267 + 2376 = 1176159$ $C_{(n)} = 392040 + 148176 + 150224 + 2112 = 692552$

Очікуваний річний економічний ефект від впровадження у виробництво способу чорнової обробки отворів мідним електрод-інструментом електричною дугою визначаємо за формулою:

$$E_p = [C_{(\bar{b})} - C_{(n)}] + E_n [K_{\kappa(\bar{b})} - K_{\kappa(n)}] \quad (5.1)$$

$$E_p = (1176159 - 692552) + 0,15(2979000 - 106000) = 770257 \quad \text{грн.}$$

## ВИСНОВКИ

1. Розроблено практичні основи прогнозування технологічних характеристик та підвищення ефективності процесу РОД отворів мідними електродами-інструментами. Вперше отримано математичну модель відносного лінійного зносу мідного ЕІ при РОД отворів в умовах трьохфакторного експерименту ( $I$ ,  $U$ ,  $P_{cm}$ ) та виявлено ступінь впливу змінних факторів. Показано, що на знос одночасно та практично рівномірно впливають усі три фактора. Модель дозволила мінімізувати величину зносу до 4,9 %, що у 6 разів менше, порівняно з відомими експериментальними даними.

2. Отримано математичну модель бічного міжелектродного зазору  $\delta_b$ . Показано, що зазор повністю визначається лише одним фактором – силою технологічного струму  $I$ . Саме тому  $I$  є головним керуючим фактором. Із підвищенням сили струму зазор збільшується.

В умовах експерименту бічний міжелектродний зазор змінювався у межах від 0,05 мм до 0,10мм.

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

4. Отримано математичну модель продуктивності обробки отвору  $M$ . Показано, що на продуктивність обробки найбільш впливає такий фактор, як сила технологічного струму  $I$ , тому його слід визнати головним, керуючим (ступінь впливу – 77,3 %). Із підвищенням  $I$  продуктивність обробки збільшується. Вплив напруги на електродах  $U$  на  $M$  – у 3,4 рази менший (22,7

%), але має істотне значення. Із підвищенням напруги  $M$  збільшується. Позитивний вплив сили технологічного струму та напруги на продуктивність обробки, з фізичної точки зору, пояснюються введенням в зону обробки додаткової енергії та, як відомо, теплової природою електричної ерозії. В умовах експерименту продуктивність обробки отворів способом РОД з використанням мідного ЕІ змінювалася у межах від  $297 \text{ мм}^3/\text{хв.}$  до  $493 \text{ мм}^3/\text{хв.}$

5. Отримано математичну модель питомої продуктивності обробки отвору  $M_a$ . Показано, що на питому продуктивність обробки отвору впливає лише один фактор – сила технологічного струму  $I$ , тому його слід визнати головним, керуючим (ступінь впливу – 100 %). Із підвищенням  $I$  питома продуктивність обробки зменшується. В умовах експерименту питома продуктивність обробки отворів способом РОД з використанням мідного ЕІ змінювалася у межах від  $3,68 \text{ мм}^3/\text{А}\cdot\text{хв.}$  до  $5,94 \text{ мм}^3/\text{А}\cdot\text{хв.}$

6. Отримано математичну модель питомої витрати електро-енергії  $a$ . Показано, що, найбільший вплив на питому витрату електроенергії оказує сила технологічного струму  $I$ , тому його слід визнати головним, керуючим (ступінь впливу – 51,3 %). Із підвищенням  $I$  питома витрата електроенергії збільшується. В умовах експерименту питома витрата електроенергії процесу РОД отворів з використанням мідного ЕІ змінювалася у межах від  $8,92 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{кг}$  до  $15,80 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{кг}$ .

7. В результаті аналізу гідродинамічного режиму робочої рідини при вилученні продуктів ерозії із МЕЗ за напрямком знизу вгору показано, що найбільш складні умови евакуації продуктів ерозії спостерігаються у вертикальному каналі електрода-інструмента, в якому на частку діє, з одного боку, сила ваги  $G$ , а з другого – сила гідродинамічного тиску  $F_v$ , та сила Архімеда. Доведено, що існує така критична швидкість робочої рідини, нижче якої продукти ерозії не вилучаються із робочої зони.

8. Запропоновано новий спосіб обробки електричною дугою малих отворів, який відрізняється тим, що обробку здійснюють при видаленні

робочої рідини разом з продуктами ерозії із технологічного каналу в електроді-інструменті за напрямком зверху вниз, тобто з використанням гравітаційної сили. Спосіб дозволяє ефективно вилучати продукти ерозії навіть з малих за діаметром каналів і тим самим забезпечує обробку отворів діаметром менше трьох міліметрів. Процес здійснюється без утворення технологічного виступу.

9. Виконані експериментальні випробування процесу прошивання наскрізних отворів діаметром 2 мм, глибиною 5,6 мм мідним ЕІ. Показано, що процес характеризується, з одного боку, великою швидкістю прошивання ( $V = 5$  мм/хв.), яка приблизно у 1,5 рази за аналогічних умов перебільшує швидкість електроімпульсної обробки, а з другого боку, підвищеним лінійним зносом мідного ЕІ.

10. Показано, що в умовах експерименту гідравлічний опір течії робочої рідини в технологічному каналі мідного електрода-інструмента (діаметр каналу 1 мм) був настільки великий, що для забезпечення певного рівня гідродинамічного тиску потоку на дугу є потреба в підвищенні статичного тиску на вході в зазор до рівня 6...7 МПа. Останнє є технічним обмеженням насосної установки, що використовувалася. На підставі отриманих експериментальних даних запропоновано наступний оптимальний режим для РОД отворів діаметром 2 мм з відносним лінійним зносом мідного ЕІ на рівні 5 %: сила технологічного струму – 1...3 А; робоча напруга на дузі – 120...150 В; статичний тиск робочої рідини на вході в МЕЗ – 6...7 МПа; полярність обробки – пряма.

## ВСТУП

### Актуальність теми

Сучасними методами обробки отворів є методи електро-ерозійної обробки, які дозволяють обробляти будь-який за твердістю електропровідний матеріал (наприклад, загартовані сталі та тверді сплави), а також отримувати отвори складного (не круглого) перерізу при використанні простого поступального руху електрода-інструмента (ЕІ).

Одним із найбільш перспективних високопродуктивних методів електроерозійної обробки отворів є спосіб розмірної обробки металів електричною дугою (РОД), який відомий за роботою Носуленка В. І. [1]. У порівнянні з відомими способами електроерозійної обробки, спосіб РОД дозволяє збільшити продуктивність обробки приблизно на порядок і більше, зменшити приблизно в два рази питомі витрати електроенергії та в 3-5 разів знизити вартість джерел живлення технологічним струмом [2].

При обробці отворів способом РОД електрична дуга горить в торцевому міжелектродному зазорі (МЕЗ) між електроодом-інструментом (ЕІ) та електроодом-заготовкою (ЕЗ) в потужному поперечному потоці робочої рідини. Її енергетичні та геометричні параметри, що обумовлюють технологічні характеристики процесу РОД, залежать не тільки від сили технологічного струму  $I$  та динамічного тиску робочої рідини в зазорі  $P_0$ , як показано в роботах [1 – 4], але й від інших умов, зокрема, як буде показано нижче, від величини напруги  $U$  на електродах. Так, напруга на електродах, разом з іншими факторам, суттєво впливає на відносний лінійний знос мідного ЕІ при обробці малих отворів. Необхідність використання мідного ЕІ для РОД малих отворів (діаметром менше трьох мм) обумовлюється суттєвими технічними складностями виготовлення трубчастого ЕІ із графіту, як більш електроерозійностійкого матеріалу, у зв'язку механічною міцністю останнього.

Отримані в роботі математичні трьохфакторні моделі відносного лінійного зносу мідного ЕІ та інших технологічних характеристик даного

процесу (продуктивності обробки, питомої продуктивності обробки, питомої витрати електроенергії, шорсткості обробленої поверхні та величині бічного міжелектродного зазору) дозволять прогнозувати їх та оптимізувати режим виготовлення отворів способом РОД. Рішення даної проблеми і обумовлює актуальність теми.

### **Мета і задачі досліджень**

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

Поставлена мета реалізується шляхом вирішення наступних задач:

- обґрунтування технологічної схеми формоутворення отвору способом РОД;

- розробка та аналіз математичних моделей, що обумовлюють технологічні характеристики точності, якості та продуктивності процесу РОД отворів мідним ЕІ;

- аналіз технологічної схеми формоутворення та інтенсифікація процесу РОД малого отвору мідним ЕІ.

### **Об'єкт і предмет дослідження**

Об'єктом дослідження є процес РОД отворів. Предметом дослідження є технологічні характеристики процесу РОД отворів мідним ЕІ.

### **Методи дослідження**

Теоретичні дослідження проводилися на основі загальних положень теорії електроерозійної обробки, що розроблена Б. М. Золотих, Г. М. Мещеряковим та теорії процесу РОД, розробленої В. І. Носуленко.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. А. с. 368965 СССР, МКИ В23Р 1/02. Способ электрофизической обработки металлов / В. И. Носуленко (СССР). - № 1223593/25-8; заявл. 04.03.68; Не подлежит опубл. в откр. печати.
2. Носуленко В. И. Розмірна обробка металів електричною дугою: Автореф. дис...д-ра техн. наук: 05.03.07 / НТУУ «КПІ». – К., 1999. – 36 с.
3. Носуленко В. И. Размерная обработка металлов стационарной электрической дугой: Автореф. дис...канд.. техн.. наук: 05.03.04 / ТПИ. – Тула, 1978. – 26 с.
4. Носуленко В. И. Размерная обработка металлов электрической дугой / В. И. Носуленко, Г. Н. Мещеряков // Электронная обработка материалов. – 1981. – С. 19-23.
5. А. с. 70010. Способ обработки металлов и иных токопроводящих материалов / Б. Р. Лазаренко, Н. И. Лазаренко (СССР). – опубл. в 1971 г., Бюл. № 7.
6. Лазаренко Б. Р. Изыскание новых применений электричества / Б. Р. Лазаренко, Н. И. Лазаренко // Электронная обработка материалов. – 1977. - № 5. – С. 5-19.
7. Лазаренко Б. Р. Физика искрового способа обработки металлов / Б. Р. Лазаренко, Н. И. Лазаренко. – М., ЦБТИ, Министерство электропромышленности СССР. – 1946.
8. Исследование, разработка и внедрение технологии и оборудования для размерной обработки дугой штампов и деталей отрасли: Отчёт по НИР № 61.02.86 / КИСМ. – № ГР 0186006645; Инд. № 09890018514. – Кировоград: 1990. – 100 с.
9. Электроразрядная обработка металлов / [Левинсон Е. М., Лев В. С., Гуткин Б. Г., Лившиц А. Л., Уткин Л. А.]. Л.: Машиностроение, 1971. 256 с.
10. Лакирев С. Г. Обработка отверстий. Справочник / С. Г. Лаки рев. – М.: Машиностроение, 1984. – 208 с.

11. Коваленко В. С. Технология и оборудование электрофизических методов обработки материалов. Учебное пособие / В. С. Коваленко. – К.: Вища школа, 1983. – 176 с.

12. Бирюков Б. Н. Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки / Б. Н. Бирюков. – М.: Машиностроение, 1981. – 128 с.

13. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: В 2 т. Учебное пособие / [Артамонов Б. А., Волков Ю. С., Дрожалова В. И. и др.]; под ред. Смоленцева В. П. – М.: Высшая школа, 1983. – Т. 1: Обработка материалов с применением инструмента. – 247 с.

14. Размерная электрическая обработка металлов: Учеб. пособие для студентов вузов / [Артамонов Б. А., Винницкий А. Л., Волков Ю. С., Глазков А. В.]; под ред. Глазкова А. В. – М.: Высш. шк., 1978. – 336 с.

15. Фотеев Н. К. Технология электроэрозионной обработки / Н. К. Фотеев. – М.: Машиностроение, 1980. – 184 с.

16. Kamenskikh, A.A., Muratov, K.R., Shlykov, E.S., Sidhu, S.S., Mahajan, A., Kuznetsova, Y.S., Ablyaz, T.R.: Recent trends and developments in the Electrical Discharge Machining Industry: A review. *J. Manuf. Mater. Process.* 2023,7, 204. <https://doi.org/10.3390/jmmp7060204>.

17. Лазаренко Б. Р. Электроискровая обработка токопроводящих материалов / Б. Р. Лазаренко, Н. И. Лазаренко. – М.: Изд. АН СССР, 1958.

18. Золотых Б. Н. Связь чистоты поверхности после электроэрозионной обработки с параметрами единичных лунок / Б. Н. Золотых // Вестник машиностроения. – 1959. – № 10.

19. Мещеряков Г. Н. Некоторые физические принципы создания разновидностей обработки металлов концентрированными источниками энергии / Г. Н. Мещеряков, В. И. Носуленко, Н. Г. Мещеряков, В. М. Боков, Ю. В. Коваленко // Труды Всесоюзной научно-технической конференции «Комбинированные электроэрозионно-электрохимические методы размерной обработки металлов». – Уфа: УАИ, 1983. – С. 7-11.

20. Nugroho, B., Yahya, A., Mat Sidek, A. R., Andromeda, T., Khamis, N. H., Current Pulse Generated by Spark of Electrical Discharge Machining (EDM). *IOP Conference Series: Journal of Physics*, 2020. IOP Publishing, 1529:042109. doi:10.1088/1742-6596/1529/4/042109.

21. Говоркян Г. Г. Закономерности искажения переходных участков электрод-инструмента при электроимпульсной обработке / Г. Г. Говоркян // Электрофизические и электрохимические методы обработки. Вып. 5. – М.: НИИМАШ, 1968.

22. Каталог электрофизических и электрохимических станков. – М.: НИИМАШ, 1978. – 228 с.

23. Материалы и методы изготовления фасонных электродов-инструментов электроэрозионных копировально-прошивочных станком. – М.: НИИМАШ, 1975. – 143 с.

24. А. с. 747675 СССР, МКИ В23Р 1/00, В23Р 1/12. Способ электроэрозионной обработки полостей и электрод-инструмент для его осуществления / М. К. Мицкевич, И. А. Бакуто, Ж. А. Мрочек, С. Н. Терехов; № 2651403/25-08; заявл. 01.08.78; опубл. 15.07.80, Бюл. № 26.

25. А. с. 874294 СССР, МКИ В23Р 1/00. Способ электро-эрозионной обработки полостей и электрод-инструмент для его осуществления / И. А. Бакуто, С. Н. Терехов, М. К. Мицкевич, Ж. А. Мрочек; опубл. 23.10.81, Бюл. № 39.

26. Алексеенко П. В. Области эффективного применения способа разнорежимной обработки / П. В. Алексеенко, М. К. Мицкевич, С. Н. Терехов // Электронная обработка металлов. – 1987. – № 1. – С. 5-8.

27. Хренов К. К. Электрическая сварочная дуга / К. К. Хренов. – Москва-Киев: Машгиз, 1949.

28. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / [Амитан Г. Л., Бай супов И. А., Барон Ю. М. и др.]; под ред. В. А. Волосатова. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение. 1988. – 719 с.

29. Савушкин В. И. Электроконтактная прошивка центральных отверстий в прессовом инструменте / В. И. Савушкин // Электрофизические и электрохимические методы обработки. – М.: НИИМАШ. – 1977. – № 7.

30. Боков В. М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою. Монографія / В. М. Боков. – Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс – ЛТД», 2002. – 300 с.

31. Боков В. М. Розмірна обробка електричною дугою кувальних штампів. Монографія / В. М. Боков. – Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс – ЛТД», 2012. – 178 с.

32. Носуленко В. І. Розмірна обробка металів електричною дугою: дис. ... доктора техн. наук: 05.03.07 / Носуленко Віктор Іванович. – Кіровоград, 1998. – 386 с.

33. Попова М. І. Прогнозування технологічних характеристик та інтенсифікація процесу розмірної обробки електричною дугою складно профільних отворів: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.07 / Попова Маргарита Іванівна. – Кіровоград, 2001. – 182 с.

34. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1080. – 304 с.

35. Боков В. М. Методологія наукових досліджень / В. М. Боков. – Кіровоград: КІСГМ, 1993. – 64 с.

36. Расчёты экономической эффективности новой техники. Справочник под общ. ред. К.М. Великанова. – Л.: Машиностроение, 1989.

37. Copeland T., Coler T., Murrin J. Valuation: Measuring and Managing the Value of Companies. New York: John Wiley&Sons Inc., 1990. 576 p.

38. Козловський В.О. Техніко-економічні обґрунтування та економічні розрахунки в дипломних проектах та роботах. Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ. 2003. – 75 с.